

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE A/MIRA –BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention d'un diplôme Master en Génie Civil

Option : Structures

Thème

**Etude de l'activité pouzzolanique du sable de
Sahara broyé.**

Réalisé par :

M^{elle} BENHAMMOUCHE Sarah.
M^{elle} BENSAIDOUNE Amina.

Encadré par :

Mr CHELOUAH Nasser.

Soutenu Publiquement le : 06/07/2019

Devant le jury:

Mr BOUZIDI.
Mme ATTIL.

Année Universitaire : 2018/2019.

REMERCIEMENTS :

En préambule à ce mémoire, nous souhaitons adresser ici nos remerciements à :

Notre créateur (DIEU) pour nous avoir donné de la force à accomplir ce travail.

Notre promoteur Monsieur Chelouah Nasser, pour l'implication qu'il a pu avoir tout au long de ce projet, son suivi, ses conseils et ses orientations.

Tous les membres de jurys, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner ce mémoire et pour leur bienveillante attention.

Nous adressons notre profonde gratitude au technicien de laboratoire Mr ZOUBIRI Dj pour sa disponibilité et sa compréhension au niveau du laboratoire.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements et gratitude à nos familles et à tous

nos proches et amis qui nous ont toujours soutenus et encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

AMINA et SARAH.

DEDICACES :

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents, Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour

Dont ils ne cessent de me combler, ceux qui ont toujours sacrifié pour me voir réussir. Que dieu vous procure bonne santé et longue vie.

A mon frère SALIM, à toutes mes sœurs : NAZIHA, LILIA, SELMA, MON ADORABLE JUMELLE SILYA et MELISSA. Sans oublié ma chère cousine HASSIBA pour son énorme soutien.

A mon adorable nièce IMENE, à mon neveu HAMZA, à qui je souhaite la bienvenue au monde.

Une spéciale dédicace à ma meilleure copine DJIDJI, qu'elle puisse trouver ici mes sincères remerciements pour son aide et son soutien.

A mes amies d'enfance : FATIMA, NASSIMA et CHAHINEZ.

A mes chers amis : FAFA, SABINE, FAZIA, NASSIMA, DJEMY, NOUNOU et MASSI.

A ma chère binôme SARAH.

A ma copine de chambre SERENA.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

BENSAIDOUNE Amina.

DEDICACES :

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études, Que dieu vous procure bonne santé et longue vie.

A mes chères frères DADOU et MEHDI, à ma très chère sœur DRIFA.

A mes grands-parents.

A mes chers oncles et tantes : AZZEDINE, NABIL, TOUFIK, NADJET, SAMIRA,
RATIBA.

A mes adorables copines BEHNOUZ et NOUNOU

A mes chers amis: HOUSSAM, MASSI, MOUMA, IMENE, OUIZA, LOUNDJA, AMAL,
SABINE et FAZIA.

A ma binôme : AMINA.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis
merci.

BENHAMMOUCHE Sarah.

Table des matières

Liste des figures	I
Liste des tableaux	III
Liste d'abréviations	IV
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique	3
1.1. Généralités sur le ciment portland	3
1.1.1. Aperçu historique	3
1.1.2. Ciment Portland.....	3
1.1.3. Etapes de fabrication des ciments	4
Fabrication par voie humide	4
Fabrication par voie semi-humide.....	4
Fabrication par voie semi-sèche.....	4
Fabrication par voie sèche.....	4
1.1.3.1. Extraction et préparation de la matière première	5
1.1.3.2. Cuisson	6
➤ Préchauffage	6
➤ Cuisson	6
1.1.3.3. Refroidissement du clinker.....	7
1.1.3.4. Broyage du clinker	7
1.1.3.5. Le stockage et les expéditions	8
1.1.3.6. Le contrôle de qualité du ciment.....	8
1.1.4. Les constituants du ciment Portland	8
1.1.4.1. Le clinker	8
➤ La composition chimique	9
1.1.4.2. Le gypse (CaSO ₄)	10
1.1.5. Hydratation du ciment Portland.....	10
1.1.5.1. Les différents hydrates formés lors de l'hydratation du ciment Portland	11
➤ Hydratation du silicate tricalcique C ₃ S (Alite)	11
➤ Hydratation du silicate bicalcique C ₂ S (Bélite)	11
➤ Hydratation des aluminates tricalciques C ₃ A	12
➤ Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C ₄ AF.....	13
➤ Hydratation de Magnésium MgO et la Chaux libre CaO	13
1.1.5.2. Mécanismes d'hydratation d'un ciment Portland.....	13

Table des matières

➤ période de gâchage	13
➤ période dormante	13
➤ période de prise ou accélération	13
➤ période de ralentissement	13
1.1.6. Principales catégorie de ciment.....	14
1.1.7. Les ajouts minéraux	14
1.1.7.1. Principaux ajouts minéraux inertes	14
1.1.7.2. Les ajouts minéraux actifs.....	15
1.1.7.3. L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil	15
➤ l'intérêt du point de vue technique	15
➤ Intérêt du point de vue économique	15
➤ Intérêt du point de vue environnemental	15
1. 2. Généralités sur les pouzzolanes.....	16
Introduction.....	16
1.2.1. Définition d'une pouzzolane naturelle	16
1.2.2. Réaction pouzzolanique	16
1. 2.3. Mécanisme de la réaction pouzzolanique	17
1. 2.4. Facteurs influençant la réaction pouzzolanique.....	18
1.2.5. Classification des pouzzolanes selon leur réactivité	18
♦ Les verres volcaniques	19
♦ Les tufs volcaniques	19
♦ Argile ou schiste argileux calcinés	19
♦ Silice opaline	19
1. 2.6. Les pouzzolanes issues des déchets agricoles	19
La cendre de balle de riz	19
♦ La combustion des balles de riz	20
1. 2.7. Les pouzzolanes issues des déchets industriels	21
1.2.7.1. Les cendres volantes	21
1. 2.7.2.Fumée de silice	21
1. 2.7.3.Boue de sable	21
1. 2.7.4 .Le laitier de haut fourneau	21

Table des matières

➤ Les LHF cristallisés	21
➤ Les LHF vitrifié	21
1.2.8. Essais de prédiction de la réaction pouzzolanique	22
1.2.8.1. Les déterminations chimiques	22
➤ Essai de Frattini	22
➤ Essai de Chapelle.....	22
➤ Essai de chaux saturé.....	23
1.2.8.2. Essais mécaniques	23
1.2.9. Méthodes d'amélioration de la réaction pouzzolanique	23
1.2.9.1 Activation mécanique	23
1.2.9.2 Activation thermique	24
1.2.9.3 Activation chimique	24
Conclusion	26
Chapitre 2 : Matériaux et méthodes	27
2.1. Introduction	27
2.2. Matériaux utilisés	27
2.2.1. Le ciment	27
2.2.2. Le sable	29
➤ Le module de finesse.....	30
2.2.3. L'eau de gâchage.....	30
2.2.4 Les additions (sable broyé lavé et non lavé)	30
2.3. Méthode d'essais	36
2.3.1 Echantillonnage (NF P 18-533)	36
➤ Prélèvement sur le tas	36
➤ Quartage	37
2.3.2. Confection des mortiers	37
➤ Les éprouvettes prismatiques (4*4*16) cm ³ selon la norme EN 196-1	38
1-composition du mortier	38
2-Malaxage du mortier	38
3-moulage des éprouvettes	39
4- Conservation des éprouvettes	39
5- Décoffrage des éprouvettes	39

Table des matières

➤ Les éprouvettes cubiques (5*5*5) cm ³ selon la norme ASTM C-311	40
1-composition du mortier	40
2-Malaxage et moulage du mortier.....	41
2.3.3. Essai de consistance	41
➤ Objectif de l'essai	41
➤ Principe de l'essai	41
➤ Conduite de l'essai	42
2.3.4. Essai de prise	43
➤ Objectif de l'essai	43
➤ Principe de l'essai	43
➤ Conduite de l'essai	44
2.3.5. La résistance à la compression	45
➤ But de l'essai	45
➤ Principe de l'essai	45
➤ Equipement nécessaire	45
➤ Conduite de l'essai	46
2.3.6. L'indice d'activité pouzzolanique	46
• Selon la norme ASTM C618-89.....	47
• Selon la norme EN 196 Partie 5	47
• Selon la norme ASTM C311	47
Conclusion	47
Chapitre 3 : Résultats et discussions	48
3.1. Introduction	48
3.2. Les essais de caractérisation d'un liant	48
3.2.1. Essai de consistance	48
3.2.2. Essai de prise	49
3.3. Essai de compression.....	51
3.3.1. La résistance à la compression des éprouvettes cubiques (5*5*5) cm ³ selon la norme ASTM C311.....	51
3.3.2. La résistance à la compression des éprouvettes selon la norme EN 196-1	52

Table des matières

3.4. Indice d'activité pouzzolanique	53
3.5. Conclusion.....	54
Conclusion générale	55
Références bibliographiques	
Annexes	
Résumé	

Liste de figures

Les Figures		Page
Figure 1- 1	La poudre du ciment Portland.	4
Figure 1- 2	Les étapes de fabrication du ciment Portland.	5
Figure 1- 3	Four rotatif à ciment.	7
Figure 1- 4	Etapes de fabrication du ciment.	8
Figure 1- 5	Les nodules du Clinker.	9
Figure 1- 6	Microphotographie d'un clinker.	9
Figure 1- 7	Cristal de Portlandite (lamelles hexagonales) (X) entre des CSH(#), (O): pore capillaire.	12
Figure 1- 8	Image des cristaux d'ettringite obtenue en microscopie à balayage.	12
Figure 1- 9	Balles de riz.	20
Figure 1- 10	Cendre de balles de riz	20
Figure 1- 11	Les différentes méthodes d'activation selon Shi	23
Figure 2- 1	Analyse granulométrique du sable.	29
Figure 2- 2	Etuvage du sable de Sahara.	31
Figure 2- 3	broyage du sable.	31
Figure 2- 4	le tamisage.	31
Figure 2- 5	Lavage du sable.	32
Figure 2- 6	Les volumes cumulatifs en % en fonction du diamètre de la particule en (μm) mesuré au laser.	35

Liste de figures

Figure 2- 7	Prélèvement sur le tas.	37
Figure 2- 8	Quartage.	37
Figure 2- 9	Malaxeur de capacité de 5L (laboratoire génie civil Université de Bejaia).	39
Figure 2- 10	La cure des éprouvettes dans l'eau.	40
Figure 2- 11	La cure des éprouvettes cubiques.	41
Figure 2- 12	Essai de consistance.	43
Figure 2-13	Essai de prise.	44
Figure 2- 14	Presse hydraulique pour l'essai mécanique de la compression.	45
Figure 2- 15	Schéma expliquant l'essai de compression.	46
Figure 3- 1	Variation de la consistance.	48
Figure 3- 2	Début de prise.	49
Figure 3- 3	Fin de prise.	50
Figure 3- 4	La résistance à la compression des mortiers avec aditions (SNL40 et SL40) selon la norme ASTM C311.	51
Figure 3- 5	Résistance à la compression des mortiers avec aditions (SNL40 et SL40) selon la norme EN196-1.	52
Figure 3- 6	Indice d'activité de la résistance de (SNL40, SL40) substitué dans le ciment à différents pourcentages.	53
Figure 3- 7	Indice d'activité de (SNL40, SL40) substitué à 20%.	54

Liste de tableaux

Tableaux		Page
Tableau 1- 1.	Composition chimique du clinker de ciment portland ordinaire	10
Tableau 1- 2	Composition minéralogique du Clinker.	10
Tableau 1- 3	Principales catégories de ciment.	14
Tableau 1- 4	Classification des ajouts selon leur réactivité.	15
Tableau 1- 5	Classification des pouzzolanes selon leur réactivité	18
Tableau 2- 1	Analyses cimenterie chimiques du ciment CEM I - 42.5 N-SR3 (LAFARGE Bejaia).	27
Tableau 2- 2	Propriétés physiques du ciment CEM I - 42.5 N-SR3 (cimenterie LAFARGE Bejaia).	28
Tableau 2- 3	Analyse granulométrique du sable.	29
Tableau 2- 4	Analyses chimiques du SL40 μ m et SNL40 μ m.	33
Tableau 2- 5	ASTM C618-89 Exigences relatives à une pouzzolane naturelle à utiliser comme addition dans un ciment portland	34
Tableau 2- 6	Les volumes cumulatifs en % en fonction du diamètre de la particule en (μ m) mesuré au laser.	35
Tableau 2- 7	Composition des deux mortiers selon la norme ASTM C-311.	40
Tableau 3- 1	Essai de consistance	48

Notations et Abréviations

Abréviations et symboles	Notations
CO_2	Dioxyde de carbone
CaCO_3	Calcaire
SL	Sable de Sahara lavé
SNL	Sable de Sahara non lavé
SL40	Sable de Sahara lavé et broyé à un diamètre inférieur à 40 micromètre
SNL40	Sable de Sahara non lavé et broyé à un diamètre inférieur à 40 micromètre
CaO	La chaux
SiO_2	La silice
Al_2O_3	L'alumine
Fe_2O_3	L'oxyde de fer
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_3\text{S})$	Le silicate tricalcique (Alite)
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_2\text{S})$	Le silicate bicalcique (Belite)
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{C}_3\text{A})$	L'aluminate tricalcique
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 (\text{C}_4\text{AF})$	L'alumino-ferrite tétracalcique
MgO	La magnésie
SO_3	Anhydride sulfurique
K_2O	L'oxyde de potassium
Na_2O	L'oxyde de sodium
CaSO_4	Le gypse
$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} (\text{CSH})$	Silicate de calcium hydraté
$\text{Ca}(\text{OH})_2 (\text{CH})$	L'hydroxyde de calcium
$\text{H}_2\text{O} (\text{H})$	L'eau
$\text{C}_3\text{A} \cdot 3(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) \cdot \text{H}_3\text{S}_2$	L'étringite
$\text{C}_3\text{A} (\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) \cdot \text{H}_1\text{S}_2$	Monosulfoaluminate

Notations et Abréviations

C-A-H	Aluminate de calcium hydraté
E/C	Eau/Ciment
LHF	Le laitier de haut fourneau
ATG	L'analyse thermogravimétrique
DRX	Diffraction des rayons X
KOH	La potasse
NaOH	La soude
PH	Potentiel hydrogène
NA	Norme nationale
MgCO₃	La dolomite
M F	Le module de finesse
BET	Brunauer-Emmet-Teller
I	Indice d'activité pouzzolanique
Rc	Resistance à la compression
MT	Mortier témoin

Introduction générale

Introduction générale

Le ciment Portland est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde grâce à ses performances et son coût compétitif. Il est utilisé dans la construction mondiale comme un liant hydraulique. Il entre dans la composition du béton, auquel il confère notamment sa résistance.

L'industrie cimentaire cause d'énormes nuisances pour l'environnement tout au long de son processus de fabrication, à travers l'émission de poussière polluante, gaz nocifs, bruit et vibrations des machines durant l'exploitation en usine ou lors de destruction des roches dans les carrières ainsi que l'épuisement des ressources naturelles. Elle est responsable d'environ 5-7 % d'émission mondiale du CO₂ [1], ce qui contribue au réchauffement climatique. Ces émissions proviennent principalement de deux sources complémentaires :

-Les émissions énergétiques liées aux très hautes températures produites lors du processus de fabrication de ciment.

-Les émissions dues au phénomène de décarbonatation du calcaire (CaCO₃) sous l'effet de la température.

Il s'ajoute aussi les émissions dues au transport des matières premières et à la consommation électrique.

Le défi de l'industrie du ciment consiste à rechercher de nouvelles formulations de ciment à faible impact environnemental pour l'économie d'énergie et la préservation des ressources naturelles. Dans ce contexte, plusieurs recherches ont été avancées.

Une des solutions alternatives à ce problème est de substituer partiellement le clinker dans le ciment par des matériaux pouzzolaniques tels que la pouzzolane naturelle, métakaolin, les déchets industriels (La fumée de silice, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et les cendres de mâchefer de charbon) et les déchets agricoles tel que les cendres de balle de riz. Ces additions minérales composées principalement de silice ou de silice et d'alumine présentent une activité chimique dite "pouzzolanique" qui leur permet de réagir avec la chaux du ciment pour former des composés semblables aux hydrates du ciment.

D'une part l'utilisation de ces matériaux apporte une amélioration des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires (mortier et béton) et d'une autre part ils ont pour objectif de réduire la consommation de clinker, et donc la réduction de l'émission de CO₂,

Introduction générale

contribuant d'une manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Tenant compte de ces avantages, une autre voie s'ouvre qui est l'utilisation des pouzzolanes naturelles qui peuvent être calcinées dans un four ou transformées.

Les pouzzolanes ayant une faible réaction pouzzolanique doivent être activées par plusieurs méthodes, à savoir la méthode mécanique, thermique, ou chimique. Ces méthodes améliorent la résistance mécanique et l'activité chimique de la silice et de l'alumine contenues dans ces matériaux.

Le présent travail rapporte l'étude expérimentale de l'activité pouzzolanique avec le ciment Portland des poudres de sable de Sahara lavé (SL), non lavé (SNL), et broyé à un diamètre inférieur à 40 micromètre, dont on a déterminé l'indice d'activité pouzzolanique selon les normes EN 196-1, ASTM C-618 et ASTM C-311.

Pour présenter cette étude, on a structuré notre mémoire en trois chapitres:

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

Ce chapitre est destiné aux notions générales du ciment Portland, sa fabrication et ses propriétés. Il comporte aussi des généralités sur les pouzzolanes ainsi que leur réaction avec le ciment Portland, la citation des différentes méthodes d'évaluation de l'activité pouzzolanique, et les modes existants d'activation des pouzzolanes

Chapitre 2: Matériaux et méthodes.

Le deuxième chapitre est consacré à l'expérimentation. Cette partie est basée sur la caractérisation des matériaux utilisés (ciment, SL40 et SNL40) ainsi que les méthodes d'essais réalisés sur les pâtes de ciments et les mortiers.

Chapitre 3 : Résultats et discussions.

Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus et les interprétations appropriés des résultats de cette étude.

La conclusion générale : ce mémoire s'achève par une conclusion générale des travaux réalisés et présente des perspectives en ce qui concerne l'utilisation de sable de Sahara broyé dans les ciments.

Chapitre 1 :

Synthèse bibliographique

1.1. Généralités sur le ciment portland

1.1.1. Aperçu historique [2]

Le mot ciment vient du latin "caementum", qui signifie mortier, liant des maçonneries. Le terme d'origine a été utilisé pour les liants hydrauliques (qui ont la capacité de durcir au contact de l'eau).

Les Romains utilisaient de la chaux comme mortier. Ils amélioraient ce liant en y ajoutant des cendres volcaniques et des briques pilées et obtenaient ainsi un liant hydraulique, intermédiaire entre une chaux et un véritable ciment. De grands ouvrages tels les amphithéâtres, les thermes ou les aqueducs ont été construits à base de ce liant; dont certains sont encore conservés.

Le principe est resté longtemps inexpliqué jusqu'à la fin du XVIII^e siècle. Plusieurs ingénieurs ont cherché à le comprendre expérimentalement. Dans sa quête, en 1759, l'Anglais John Smeaton produit un mortier aussi dur que de la pierre en mélangeant des chaux hydrauliques et des cendres volcaniques.

En 1817, le Français Louis Vicat découvre les principes chimiques des ciments et définit les règles de fabrication du ciment hydraulique. Il est considéré comme l'inventeur du ciment moderne, mais il publie ses travaux sans prendre de brevets.

C'est l'Écossais Joseph Aspdin qui fait breveter en 1824 le ciment "Portland", obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon. La dénomination "Portland", est en relation avec l'aspect (couleur et dureté) présenté par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre de la presqu'île de Portland (Sud de l'Angleterre).

En 1872, Messieurs Dufosse et Henry établirent la première usine de production de ciment Portland à Cronfestu (en Belgique), Dès la fin du 19^{ème} siècle, le béton moderne à base de ciment Portland devient un matériau de construction largement répandu.

L'industrie des ciments est vite devenue une industrie de masse traitant des quantités énormes de matériaux. De nos jours, la production mondiale dépasse largement le milliard de tonnes par année.

1.1.2. Ciment Portland

Le ciment est appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau. Cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. [2]

Le ciment Portland est sous forme d'une poudre grise obtenue par co-broyage du gypse (3à5%) et du clinker. Ce dernier se forme par cuisson à haute température (1450°C) d'un

mélange de 80 % de calcaire et 20 % d'argile environ. Le clinker est composé essentiellement 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 . [3]



Figure 1- 1 La poudre du ciment Portland.

1.1.3. Etapes de fabrication des ciments

Il existe 4 procédés de fabrication du ciment suivant l'état de la nature des matières premières et suivant certaines conditions économiques :

Fabrication par voie humide : Dans ce procédé, le cru est une pâte assez liquide obtenue par addition d'eau (environ 42 %) aux matières premières finement broyées, Elle est ensuite brassée énergiquement dans de grands bassins.

Fabrication par voie semi-humide:

Le même principe que la voie humide est suivi, sauf que la pâte va être filtrée au travers d'un filtre presse pour arriver entre 17 et 21 % d'eau puis introduite dans un préchauffeur, puis dans un four rotatif plus court que celui utilisé pour le processus de voie humide.

Fabrication par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche) :

Le cru dans ce processus est une farine obtenue par broyage et homogénéisation des matières premières, qui est ensuite agglomérée sous forme de boulettes avant la cuisson.

Fabrication par voie sèche: [2] et [4-6]

C'est le procédé le plus récent et le plus répandu car il est moins énergivore. Dans ce qui suit nous citerons les différentes étapes de fabrication du ciment par voie sèche :

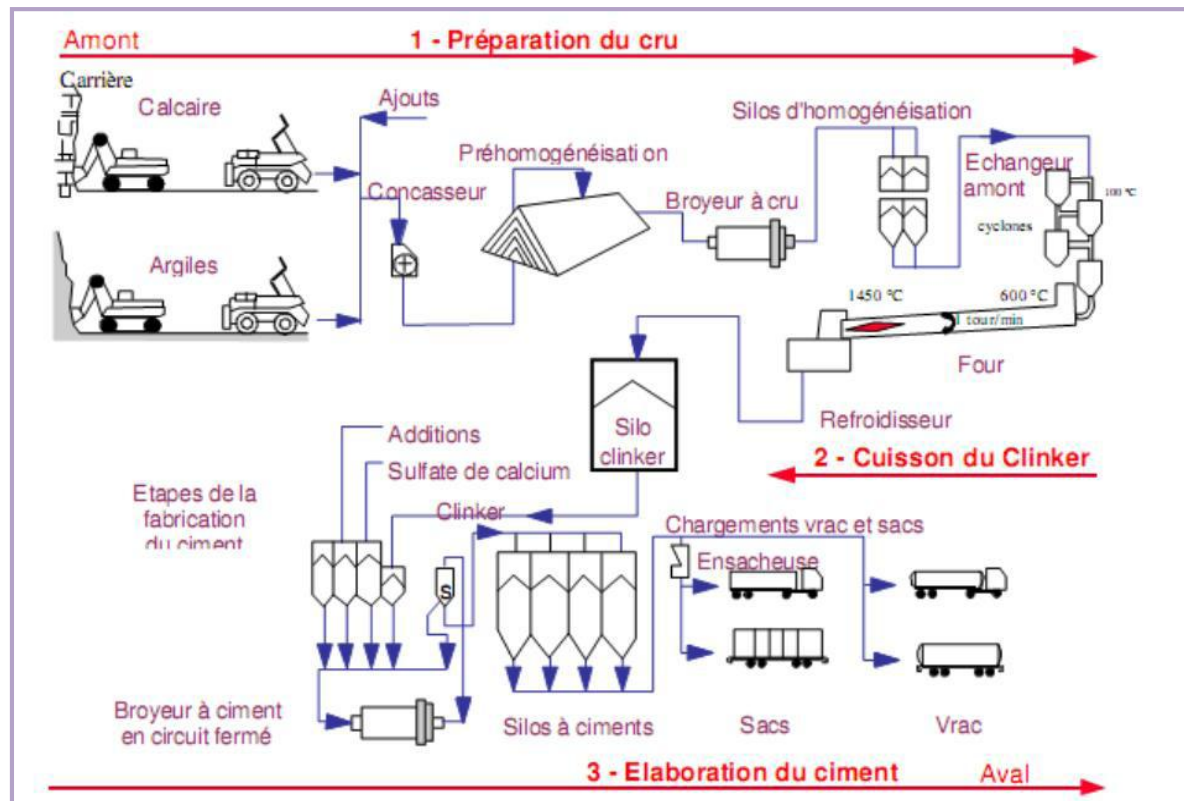


Figure 1- 2 Les étapes de fabrication du ciment Portland. [2]

1.1.3.1. Extraction et préparation de la matière première

Les matières premières qui sont à la base de la fabrication du ciment (calcaire et argile) sont extraites de carrière à ciel ouvert. Ces minéraux naturels sont prélevés des parois rocheuses à la pelle mécanique, par ripage au bulldozer ou par abattage à l'explosif. Elles sont ensuite acheminées par dumpers où à l'aide de convoyeurs à bandes vers le hall de concassage à l'entrée de la cimenterie qui est construite à proximité. Les blocs de roches sont alors réduits par le concasseur à une taille maximum de 80 mm. Ils sont ensuite échantillonnés en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine, silice, etc.) et aboutir ainsi à la composition chimique idéale. L'ensemble des matières premières après leur concassage, sont stockées dans des réserves. Pour homogénéiser le mélange, il sera stocké dans un hall de pré homogénéisation où la matière est disposée en couches horizontales superposées puis reprise verticalement.

Le mélange préparé dans le hall de pré-homogénéisation, est dosé, séché et broyé afin de réduire la roche en une poudre très fine, de taille micrométrique. C'est le "cru de ciment". D'autres minéraux sont en général ajoutés afin de corriger la composition chimique du mélange. Sa composition est dans des proportions bien définies :

- carbonate de calcium (CaCO_3) : 77 à 83 % ;
- silice totale (SiO_2) : 13 à 14 % ;

- alumine (Al_2O_3) : 2 à 4 % ;
- oxyde ferrique (Fe_2O_3) : 1,5 à 3 %.

1.1.3.2. Cuisson

➤ Préchauffage

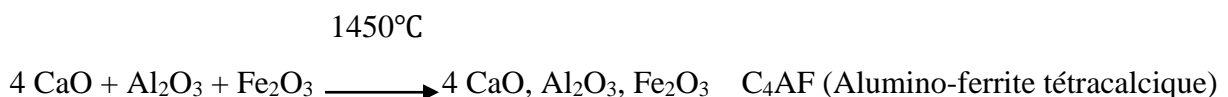
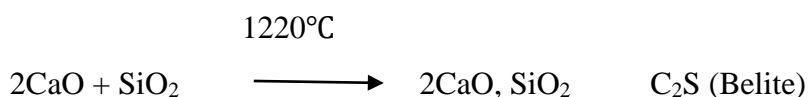
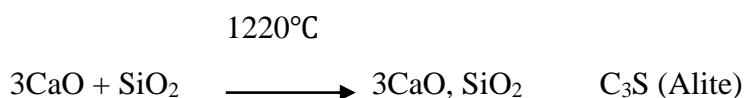
La farine crue est portée à une température de 850°C dans la tour de préchauffage: le cru descend en tourbillons dans les cyclones successifs à contre-courant des gaz chauds. Ce qui permet de réduire la quantité de CO_2 du matériau (phénomène de décarbonatation partiel).

➤ Cuisson

Le cru précédemment préchauffée pénètre ensuite dans un four à calcination rotatif garni de briques réfractaires, horizontal (légèrement incliné) et cylindrique de 60 à 90 m de long et de 4 à 5 m de diamètre. La flamme de cuisson est produite par une tuyère de haute technologie dans laquelle sont injectés les combustibles (coke de pétrole ou charbon broyé, également de combustibles de substitution issus de la valorisation de résidus et de déchets d'autres industries). Le cru progresse à travers des zones de plus en plus chaudes jusqu'à atteindre les 1450°C . Ce parcours peut varier entre 20 minutes et 1 heure, selon les techniques de production employées.

Durant ce processus, un ensemble de réactions chimiques se produisent dans la matière en fusion conduisant à l'obtention des combinaisons moléculaires attendues pour obtenir le clinker.

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.



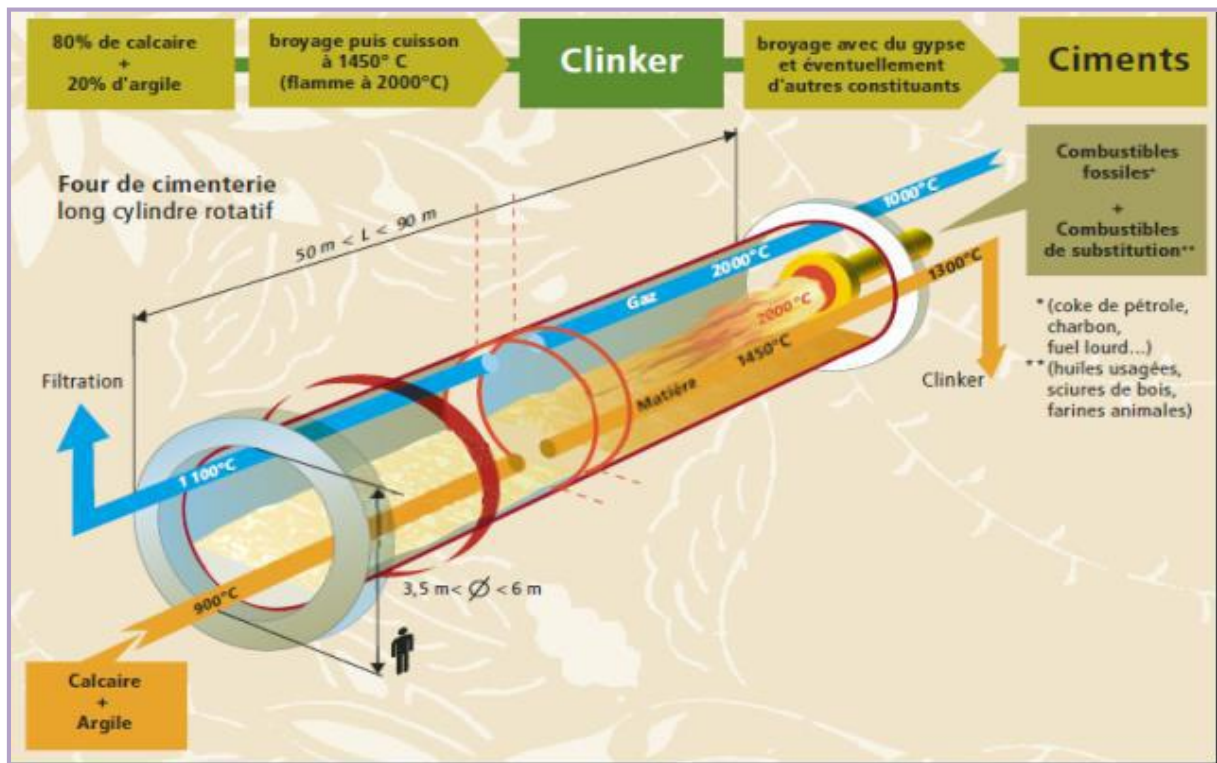


Figure 1- 3 Four rotatif à ciment. [7]

1.1.3.3. Refroidissement du clinker

Le clinker obtenu à la fin de la cuisson sous forme de granules de quelques centimètres, subit un refroidissement brutal à l'air jusqu'à atteindre une température de l'ordre de 100°C, ce qui fige les phases formées à hautes températures finalisant ainsi sa transformation. Il est ensuite acheminé dans le hall de stockage.

Pour les refroidisseurs les plus performants, l'énergie thermique est restituée et réutilisée pour le préchauffage de la farine crue, ce qui améliore considérablement l'impact environnemental du produit.

1.1.3.4. Broyage du clinker

Pour activer les propriétés physico-chimiques du clinker, il est finement broyé avec une quantité de gypse (3 à 5% en poids). Le gypse est indispensable à la régulation de prise du ciment. Le mélange est réduit en une poudre fine $< 80 \mu\text{m}$; On obtient alors le ciment "Portland". On peut encore le co-broyer avec d'autres ajouts qui peuvent développer un pouvoir liant, tels que:

- le laitier de hauts fourneaux (résidus de la sidérurgie)
- les cendres volantes de centrales électriques

- les fillers calcaires (granulats)
- les pouzzolanes naturelles ou artificielles.

Les dosages se font dans les proportions décrites dans la norme européenne des ciments courants, NF EN 197-1.

1.1.3.5. Le stockage et les expéditions

Enfin, le ciment est stocké dans des silos avant d'être expédié aux chantiers de construction, soit en vrac assurée par des camions-citernes, soit dans des sacs conditionnés.

1.1.3.6. Le contrôle de qualité du ciment

Des échantillons sont automatiquement prélevés et analysés de façon très rigoureuse à chacune des étapes de la transformation de la matière.

La qualité d'un ciment se reconnaît par la régularité de sa composition et de ses performances.



Figure 1- 4 Etapes de fabrication du ciment.

1.1.4. Les constituants du ciment Portland

1.1.4.1. Le clinker

Le clinker est le produit sorti du four de la cimenterie et refroidi rapidement. Il se présente sous forme de nodules durs et cristallisés de couleur grise foncée [8] et d'un diamètre compris entre 5 et 40 mm [7].

C'est le constituant principal hydraulique des ciments courants. Il est constitué principalement de silicates, aluminates et d'aluminoferrites calciques.



Figure 1- 5 Les nodules du Clinker.

➤ **La composition chimique**

Les principaux constituants du Clinker sont:

Le silicate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S)

Le silicate bicalcique $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S)

L'aluminate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)

L'aluminoferrite tétracalcique $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)

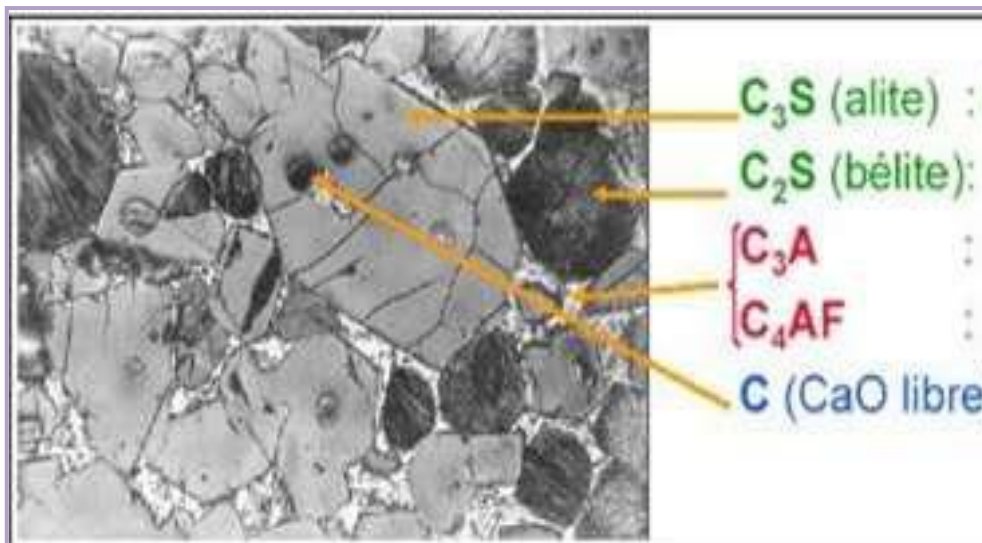


Figure 1- 6 Microphotographie d'un clinker. [9]

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O , K_2O), de la magnésie (MgO), et diverses traces de métaux. [2]

La composition chimique et minéralogique moyenne du clinker est présentée dans les deux tableaux qui suivent :

Tableau 1- 1 Composition chimique du clinker de ciment portland ordinaire. [7]

Composants du clinker	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
Notations 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

Tableau 1- 2 Composition minéralogique du Clinker. [10]

Composants	Teneurs limites (%)	Teneur moyenne(%)
C_3S	40-70	60
C_2S	00-30	15
C_3A	02-15	08
C_4AF	00-15	08

1.1.4.2. Le gypse (CaSO_4)

C'est une roche de sulfate de calcium hydraté (CaSO_4), très abondante à l'état naturel, qui se déshydrate à une température avoisinant les 100 °C [11]. Il est ajouté au clinker (qui est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable) lors du broyage pour ralentir sa prise. La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en C_3A dans le liant, car la prise rapide est due à la célite (C_3A) qui s'hydrate rapidement tandis que ses hydrates deviennent compacts et se cristallisent [2].

1.1.5. Hydratation du ciment Portland

L'hydratation du ciment regroupe un nombre important de réactions chimiques complexes qui se produisent dès la mise en contact du ciment avec de l'eau. Ces réactions conduisent à la formation de silicates ou d'aluminates calciques hydratés qui sont insolubles dans l'eau et de

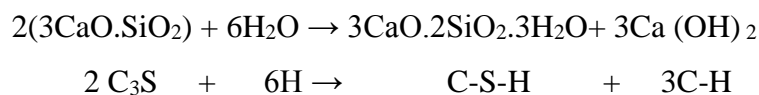
la chaux hydratée. Ces composés entraînent la prise, ce qui conduit à de bonnes résistances mécaniques du ciment. [12]

Pour comprendre les changements chimiques et physiques qui se produisent au cours de l'hydratation du ciment portland, il est essentiel d'étudier séparément les réactions des silicates et des aluminates.

1.1.5.1. Les différents hydrates formés lors de l'hydratation du ciment Portland

➤ Hydratation du silicate tricalcique C₃S (Alite) [4] [13-14]

L'hydratation du silicate tricalcique produit des gels de silicate de calcium hydraté (3CaO.2SiO₂.3H₂O) qui est le composant essentiel qui confère la résistance au ciment, et l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂. La réaction du C₃S avec l'eau est la suivante :



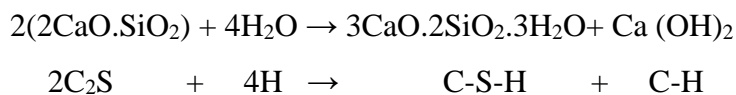
Les hydrates obtenus au cours de l'hydratation du C₃S sont:

-Les silicates de calcium hydraté, occupant entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Les C-S-H ont une structure en feuillets faiblement cristalline et contiennent des particules extrêmement fines (inférieure à 100 Å). Le gel a une surface spécifique très élevée (100 - 700 m²/g).

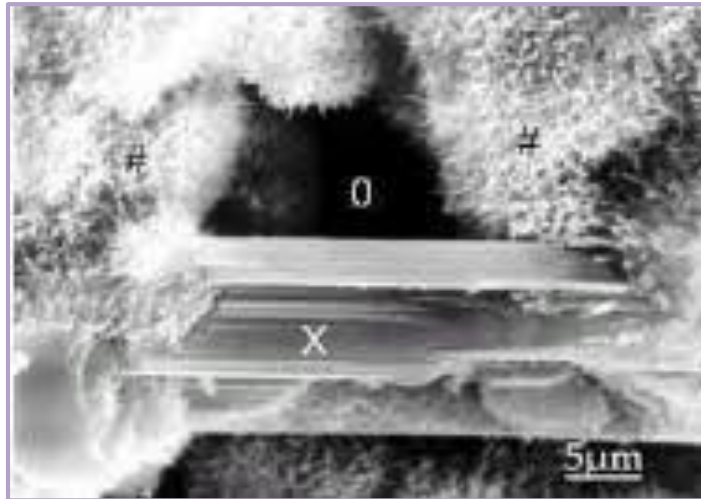
-L'hydroxyde de calcium C-H (Portlandite) occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance. Sa présence peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate.

➤ Hydratation du silicate bicalcique C₂S (Bélite)

La réaction du C₂S avec l'eau est la suivante :



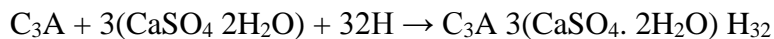
La Bélite a une vitesse d'hydratation plus faible que l'Alite. L'hydratation de C₃S produirait 61% de gel de C-S-H et 39% de C-H alors que l'hydratation de C₂S produirait 82% de gel de C-S-H et seulement 18% de C-H. Comme conséquence, une quantité plus élevée de C₂S dans le ciment donne des résistances plus importantes. Pour la résistance au jeune âge, plus de C₃S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée [3]



**Figure 1- 7 Cristal de Portlandite (lamelles hexagonales) (X) entre des CSH(#),
(O): pore capillaire. [14]**

➤ **Hydratation des aluminates tricalciques C₃A [14]**

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. L'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du gypse au clinker pour contrôler ces réactions. En présence du gypse, les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'étringite (trisulfoaluminate de calcium hydraté) qui se cristallise en aiguilles à base hexagonale. La réaction est donnée par:



Si le gypse ajouté au clinker n'est pas suffisant pour transformer tous les aluminates en étringite, il apparaîtra donc, secondairement un monosulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales.

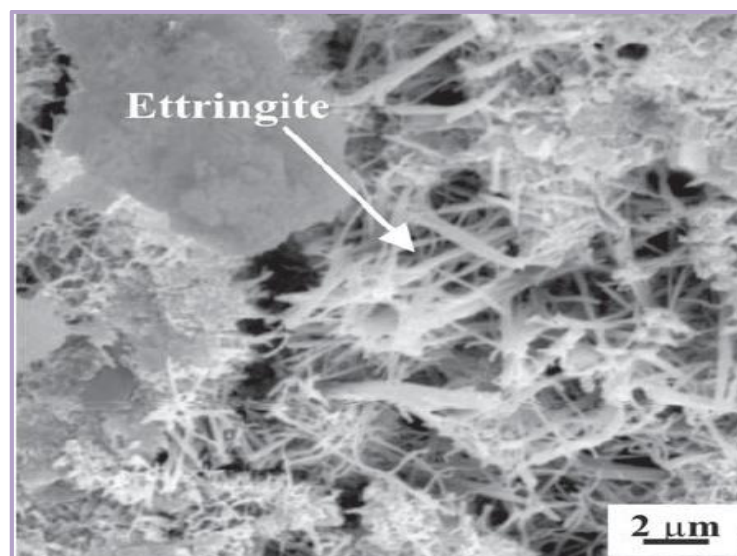
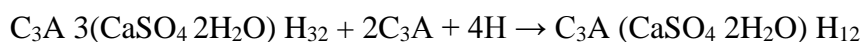
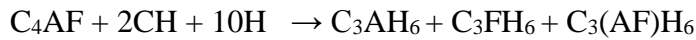


Figure 1- 8 Image des cristaux d'étringite obtenue en microscopie à balayage. [15]

➤ **Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C₄AF**

L'hydratation du C₄AF donne des produits structurellement similaires à ceux du C₃A, mais la réaction est beaucoup lente (la vitesse d'hydratation est plus faible) [4].

L'hydratation de C₄AF aboutit à la formation des cristaux mixtes très stables C₃(AF)H₆ [11]



➤ **Hydratation de Magnésium MgO et la Chaux libre CaO**

-La chaux libre provient de la décarbonation du calcaire. Elle ne doit pas se trouver à plus de 5% dans le clinker afin d'éviter son expansion en présence d'eau.

-De l'oxyde de magnésium MgO, encore appelé périclase, qui non combiné peut être à l'origine d'une expansion par réaction avec l'eau, ce qui influe défavorablement sur la stabilité du ciment durci.

1.1.5.2. Mécanismes d'hydratation d'un ciment Portland [3] [11]

L'évolution de l'hydratation du ciment est comme suit :

➤ **Période de gâchage**

Cette période débute dès le contact entre l'eau et le ciment. Elle est très rapide et dure quelques minutes. Le C₃A et le C₃S réagissent immédiatement avec l'eau et forment de l'ettringite et des gels de silicate de calcium hydraté.

➤ **période dormante**

La période dure quelques heures. Le dégagement de chaleur est faible. Durant cette période des ions Ca²⁺et OH⁻ sont libérés. Le PH de la solution augmente ce qui ralentit la dissolution des constituants.

➤ **Période de prise ou accélération**

Cette période débute lorsque la concentration en ions Ca²⁺et OH⁻ de la solution devient critique. La conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. La portlandite se précipite et les C-S-H se forment rapidement. Cette activité chimique dégage beaucoup de chaleur et la pâte devient de plus en plus solide.

➤ **période de ralentissement**

Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. Pour que l'hydratation se poursuive, il faut que l'eau diffuse à travers les pores de gel du C-S-H. La chaleur dégagée diminue. La quantité d'eau au départ doit être suffisante pour hydrater tout le ciment.

1.1.6. Principales catégorie de ciment

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires, sont classés en fonction de leur composition en cinq types principaux comme le montre le tableau ci-dessous :

Tableau 1- 3 Principales catégories de ciment. [3]

Désignations	Notation	Clinker (%)	Autres constituants(%)	Constituant secondaires (%)
Ciment Portland	CPA-CEM I	95 à 100		0 à 5
Ciment Portland Composé	CPJ-CEM II/A	80 à 94	6 à 20	0 à 5
	CPJ-CEM II/B	65 à 79	21 à 35	0 à 5
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35 à 64	36 à 65	0 à 5
	CHF-CEM III/B	20 à 34	66 à 80	0 à 5
	CLK-CEM III/C	5 à 19	81 à 95	0 à 5
Ciment Pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	65 à 90	10 à 35	0 à 5
	CPZ-CEM IV/B	45 à 64	36 à 55	0 à 5
Ciment au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40 à 64	18 à 30	0 à 5
	CLC-CEM V/B	20 à 39	31 à 50	0 à 5

1.1.7. Les ajouts minéraux

Ce 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. Leur pourcentage dans la masse varie suivant le but de l'addition et le rôle qu'ils peuvent jouer. Ils sont classés selon la norme NF EN 197 1 en ajouts minéraux inertes et actifs [10] :

1.1.7.1. Principaux ajouts minéraux inertes

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques qui améliorent les propriétés physiques du ciment Portland: ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau. Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et les Schistes calcinés

1.1.7.2. Les ajouts minéraux actifs

- La pouzzolane : naturelle ou artificielle.
- La fumée de silice.
- Les cendres volantes.
- Le laitier de haut fourneau.

Tableau 1- 4 Classification des ajouts selon leur réactivité. [10]

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement Réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, terres a diatomées)
	Faiblement Réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

1.1.7.3. L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil➤ **L'intérêt du point de vue technique [10]**

- Amélioration de la résistance mécanique des ciments à long terme.
- L'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.
- Les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration en réduisant la chaleur d'hydratation.

➤ **L'intérêt du point de vue économique**

Le ciment Portland est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment nécessitent relativement moins d'énergie, et sont moins coûteux que le ciment Portland. [3]

➤ **L'intérêt du point de vue environnemental**

- La substitution d'une fraction de clinker permet de réduire l'émission des gaz à effet de serre (CO₂). Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO₂.
- La valorisation des résidus industriels récupérés et recyclés comme produit de remplacement partiel du ciment Portland réduit le taux de pollution et préserve les ressources naturelles .

1. 2. Généralités sur les pouzzolanes

Introduction

Les pouzzolanes naturelles ou artificielles, sont exploitées comme addition ou en substitution d'une partie du ciment. La finesse des pouzzolanes, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin, gouvernent leurs propriétés cimentaires.

1.2.1. Définition d'une pouzzolane naturelle

« Pouzzolane » est un terme qui provient de Pouzzoles, (en latin Pulvis Puteolana), nom d'un port italien situé au pied de Vésuve à Naples, riche en sables volcaniques [16], qui, il y a plus de 2000 ans, était utilisé avec de la chaux naturelle en tant que matériaux de liaison pour de nombreuses structures [17].

On désigne par pouzzolanes naturelles les produits pyroclastiques (qui signifient brisé par le feu), qui sont des projections des éruptions volcaniques [16]. Ce sont, selon la norme ASTM C618, des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui tout seul ne possèdent pas de propriétés liantes, mais sous forme de poudre très fine et en présence d'eau réagissent chimiquement avec la chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), à des températures ordinaires. Ce qui forme des composés à des propriétés liantes. Ils contiennent 60 à 85% de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3) [18].

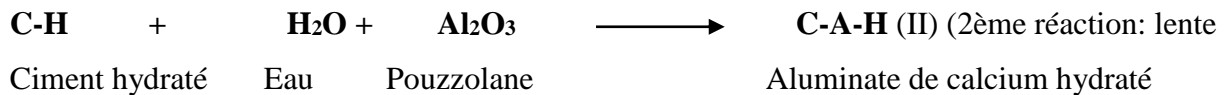
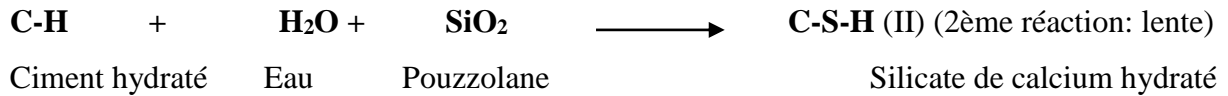
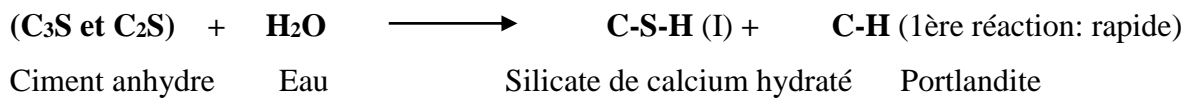
Selon leurs origines, les pouzzolanes naturelles peuvent se diviser en deux grandes catégories [17] :

- les matériaux d'origine volcanique : les tufs, les cendres volcaniques, la pierre ponce et les zéolites.
- les matériaux d'origine sédimentaire : comme les diatomées.

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre. Les variétés de Pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Algérie côté ouest du Nord à l'heure actuelle, comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin.

1.2.2. Réaction pouzzolanique

On appelle une réaction pouzzolanique l'interaction chimique entre l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) issu de l'hydratation du ciment et la silice (SiO_2) amorphe de la phase vitreuse de la pouzzolane et/ou l'alumine (Al_2O_3) qui provienne de la pouzzolane [4], ce qui induit donc à une réduction de la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ au bénéfice de la formation des hydrates de type C-S-H, C-A-H ou C-A-S-H; Cela augmente la résistance mécanique et la perméabilité du mélange permettant ainsi une meilleure répartition de ces derniers dans la matrice cimentaire et un affinage des pores.



1.2.3. Mécanisme de la réaction pouzzolanique

Au cours de l'hydratation du ciment Portland, il se forme sur chacun des grains une couche de produits d'hydratation, principalement du C-S-H, qui devient de plus en plus épais, parallèlement, l'hydroxyde de calcium formé se sépare partiellement de la solution interstitielle sous forme de cristaux hexagonaux en paillettes. Ces derniers réagissent à leur tour avec la silice et/ou l'alumine de la pouzzolane pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et/ou d'aluminates de calcium hydratés (C-A-H) [4].

L'étude du mécanisme de la réaction pouzzolanique est essentiellement basée sur le mécanisme d'hydratation de chaque composé du ciment individuellement en présence de la pouzzolane :

Ogwa et ses collaborateurs [19] ont proposé un mécanisme pour la réaction C_3S -pouzzolane. D'après ces auteurs, la réaction des grains de C_3S avec l'eau est accélérée par la présence de particules pouzzolaniques qui crée des sites de germination pour les produits de réaction. De plus, la dissolution de C_3S est favorisée par la réaction des ions calcium avec la pouzzolane.

Les travaux de Garcia Diaz ont permis de mettre en évidence l'existence de deux régimes cinétiques pour la réaction pouzzolanique du métakaolin :

- un régime à court terme dont la vitesse d'avancement de la réaction (pourcentage de métakaolin réagissant) est une fonction croissante de la surface externe initiale des particules de métakaolin.
- un régime à long terme dont la vitesse d'avancement de la réaction est une fonction décroissante de l'indice d'agglomération (rapport de la surface intragranulaire sur la surface totale) [20].

1.2.4. Facteurs influençant la réaction pouzzolanique

La réaction pouzzolanique comme toute réaction chimique est affectée par plusieurs paramètres. D'une manière générale on cite [21]:

-La nature des phases actives : la silice (SiO_2) et/ou l'alumine (Al_2O_3).

-La proportion des réactifs :

- la teneur en silice et en alumine, qui varient d'une pouzzolane à une autre.
- le rapport chaux/pouzzolane qui est optimisé pour chaque mélange.
- le rapport E/C.

- La finesse de la pouzzolane : plus le matériau n'est plus fin, sa réactivité pouzzolanique est importante.

-La durée de cure.

-Les effets thermiques : des températures très élevées ou très basses peuvent accélérer ou retarder la réaction.

-Présence d'adjuvants chimiques (tels que les bases) [18].

-Le PH de la solution interstitielle [22].

1.2.5. Classification des pouzzolanes selon leur réactivité

L'activité pouzzolanique est l'ensemble des réactions qui se produisent entre les pouzzolanes broyées, la chaux et l'eau [21]. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le Tableau ci-dessous [8] :

Tableau 1- 5 Classification des pouzzolanes selon leur réactivité [8].

Type de la réactivité	Réactivité	Matériaux
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, trassphonolithe, terres à diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines

Les pouzzolanes naturelles peuvent se départager, selon leur principal constituant qui réagit avec la chaux, en quatre grandes catégories [18] :

- ♦ les verres volcaniques : leurs réactivité à la chaux est essentiellement attribuable au verre d'aluminosilicate inaltérés (composante du verre volcanique). Ils se caractérisent par une structure désordonnée (vitreuse) et une grande surface spécifique. On cite à titre d'exemple : les pouzzolanes de Santorin en Grèce avec une surface spécifique qui est entre 3 800 et 15 500 m^2/kg .
- ♦ les tufs volcaniques : se sont des résultantes de la soumission des cendres volcaniques à des effets hydrothermiques (formation des minéraux zéolitiques). Leur réactivité à la chaux provient de la réaction d'échange de bases entre le calcium de la chaux et les alcalis que renferment les tufs.
- ♦ Argiles ou schistes argileux calcinés : composés en grande partie de minéraux argileux qui, après un traitement thermique en générale entre 500 et 1100 °C, se décomposent et forment une structure d'aluminosilicates amorphe, ce qui facilite la réaction avec la chaux à des températures ordinaires. On cite comme exemple : le Surkhi en Inde, l'Hombre en Egypte.

NB : pas toute argile ou schiste argileux calcinés induit une bonne réactivité pouzzolanique. Les produits d'argile renferment une grande quantité de quartz et de feldspath (minéraux très cristallin). Après calcination, ils ne vont pas mener à une bonne réactivité.

- ♦ Silice opaline : Les matériaux opalins, les terres à diatomées et le gel de silice.

L'Opale : il se façonne sous forme d'un gel de silice hydratée dans les sédiments où les oxydes solubles ont été lessivés des minéraux.

Les terres à diatomées : d'origine organogène. Elles renferment de la silice gélatineuse.

Exemple : Les terres à diatomées en Algérie (à Alger).

1.2.6. Les pouzzolanes issues des déchets agricoles

La cendre de balle de riz :

On appelle une balle de riz, l'enveloppe protectrice d'un grain de riz. Elle est constituée d'un squelette de silice amorphe rempli de matière organique avec un pourcentage qui varie entre (70-80%) : principalement de la cellulose, la lignine, le pentosane et un faible pourcentage d'autres matières organiques. Elle est aussi composée de matières minérales non-organiques.

Cette écorce est considérée comme un déchet agricole. Vue son faible cout ainsi que son problème de traitement, plusieurs chercheurs ont pensé à la valoriser. De ce fait, diverses applications ont été mises en place. Comme exemple, elles sont utilisées comme fertilisant en

agriculture, comme additif dans le ciment ou la chaux et comme matériau pouzzolanique ou encore comme combustible de qualité inférieure [23] et [24].



Figure 1- 9 Balles de riz. [25]

La combustion des balles de riz :

Durant la combustion de la balle de riz, la matière organique volatile est brûlée, produisant de la cendre de balle de riz. La masse de ces cendres est d'environ 25% de la masse initiale des balles [26]. Il s'agit d'un matériau poreux, conservant la microstructure cellulaire du matériau de départ, riche en silice ; si les conditions de calcination et également de la quantité restante de carbone sont bien contrôlées. La silice sera principalement amorphe, ce qui est un critère très important pour le comportement pouzzolanique du matériau [23].



Figure 1- 10 Cendre de balles de riz.

1.2.7. Les pouzzolanes issues des déchets industriels

1.2.7.1. Les cendres volantes

Vers 1930, l'expression cendre volante a été créée par l'industrie de l'énergie électrique.

La première documentation sur leur utilisation dans la fabrication du béton a été élaborée par Davis et ses collaborateurs en Amérique du nord, 1937 [18]. Cette dernière est un sous-produit de la combustion du charbon pulvérisé, utilisé dans les chaudières des centrales thermiques. Des installations de dépoussiérage captent les fines particules résiduelles contenues dans les gaz de combustion pour éviter leur dispersion dans l'atmosphère (réduire la pollution).

La phase réactive des cendres volantes est leur enveloppe vitreuse riche en silice (la vitrification de l'enveloppe est due au mode de refroidissement).

1.2.7.2. Fumée de silice

Les fumées de silice sont des particules de très petite taille (environ $0,1\mu\text{m}$) issues de l'industrie de l'acier. Ces particules sont principalement composées de silice amorphe (>85%) et présentent des propriétés pouzzolaniques plus élevées que celles des pouzzolanes naturelles en raison de sa forte teneur en silice amorphe [27]. Elles permettent de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique .

1.2.7.3. Boue de sable

La boue de sable est issue du traitement du sable riche en quartz après son traitement dans la fabrication du verre [4]. La boue de sable dans son état brute, ne représente aucune activité pouzzolanique ; mais peut être valorisée en tant que matériau pouzzolanique en la soumettant à un traitement thermique ou hydrothermique. [28]

1.2.7.4. Le laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte. Il est obtenu par refroidissement des constituants non-métalliques et/ou non absorbés par la fonte et non gazeux. Selon le mode de refroidissement, on distingue deux types de LHF [16] et [29] :

- Les LHF cristallisés : sont obtenus par un refroidissement lent à l'air libre qui les transforme en une roche dure. Au début de la solidification, le laitier est arrosé (pour en abaisser la température). Il est ensuite fragmenté et concassé
- Les LHF vitrifiés : contrairement aux LHF cristallisés, ces laitiers sont obtenus par un refroidissement brusque en soumettant une trempe (arrosage violent d'eau sous haute pression), ce qui lui confère une structure vitreuse lui permettant de développer des propriétés similaires à celles du ciment.

1.2.8. Essais de prédiction de la réaction pouzzolanique

Pour classer un matériau comme étant pouzzolanique, on doit tout d'abord évaluer son activité pouzzolanique, qui se caractérise par deux aspects distincts [30] :

- ♦ la quantité totale de l'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer.
- ♦ la cinétique de la fixation de la chaux.

Plusieurs méthodes ont été développées pour caractériser l'existence de la réaction pouzzolanique. Elles sont généralement basées sur les déterminations chimiques, et cela en utilisant les techniques de diffraction des rayons X (DRX), l'analyse thermogravimétrique(ATG), et le titrage chimique. Il y a d'autres méthodes qui permettent d'évaluer l'activité pouzzolanique comme les essais mécaniques.

1.2.8.1 Les déterminations chimiques

➤ Essai de Frattini :

Ce test consiste à suivre l'évaluation de la concentration en chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dans une solution contenant un pourcentage variant entre 6 et 55% de la pouzzolane test et du ciment CEMI (la chaux provient de l'hydratation du ciment), conservée à 40°C pendant 8 à 15 jours. Si la concentration de la solution en chaux est inférieure à l'isotherme de sa solubilité théorique, le matériau est alors jugé comme pouzzolanique [31].

Les résultats de ce test seront donnés sous forme d'un graphe en fonction de la concentration dissoute de OH^- en abscisse, et de Ca^{2+} (ce qui nous rapporte sur la concentration en CaO) en ordonnées. Sur le même graphe, on trace la courbe de la solubilité de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Les résultats du test qui se situent au-dessous de la courbe indiquent une consommation de la chaux, ce qui est attribué à une activité pouzzolanique, ceux au-dessus de la courbe indiquent une absence d'activité pouzzolanique.[32].

Note : on doit s'assurer que le système de l'essai ne contient pas une autre source de Ca^{2+} dissoute.

➤ Essai de Chapelle:

Ce test consiste à suivre l'évolution de la quantité d'hydroxyde de calcium fixée par la pouzzolane dans des conditions connues, et cela par détermination de la quantité d'hydroxyde de calcium résiduelle dans une solution saturée en chaux contenant le matériau test après 24 h de contact à 90°C. La différence de quantité d'hydroxyde de calcium résiduelle au bout de 24 h entre la solution contenant le matériau testé et la solution de contrôle représente la quantité de chaux fixée par le matériau. [8]

➤ **Essai de chaux saturé:**

Le test chaux saturée est une méthode simplifiée de l'essai de Frattini. Cette méthode consiste à ajouter une quantité recommandée de chaux hydratée à la pouzzolane testée au début ; après 2, 7 et 28 jours on mesure la concentration de la chaux résiduelle qui reste non combinée dans la solution [4] et [8].

1.2.8.2 Essais mécaniques

Pour évaluer l'activité pouzzolanique d'un matériau, on compare la résistance mécanique de deux types de mortiers : On substitue le ciment par un pourcentage de l'addition à tester dans le premier type et par une addition inerte (exemple calcaire) dans le second. Si les résultats obtenus montrent que le mortier contenant le matériau testé, est plus résistant que l'autre, on conclue que ce matériau présente une activité pouzzolanique.

1.2.9. Méthodes d'amélioration de la réaction pouzzolanique

Dans le but d'améliorer la réactivité pouzzolanique de certains matériaux, on les fait subir une activation et cela en les traitants par plusieurs méthodes.

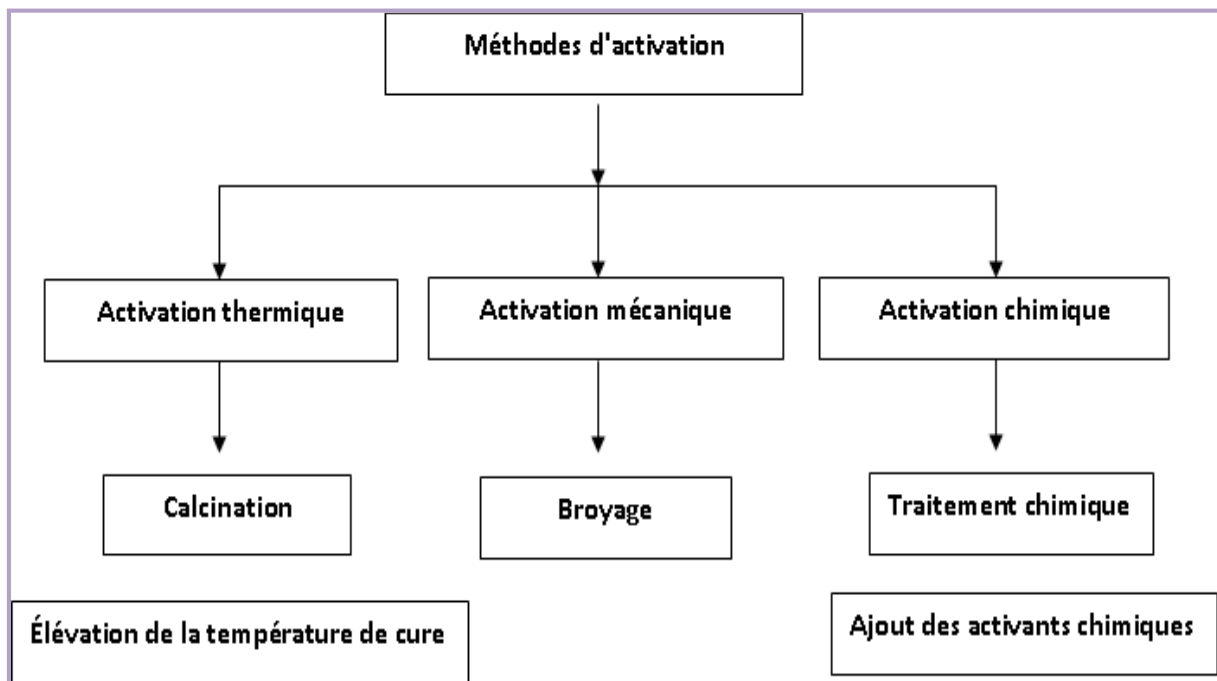


Figure 1- 11 Les différentes méthodes d'activation selon Shi [33].

1.2.9.1. Activation mécanique

La méthode mécanique consiste à effectuer un broyage poussé du matériau. Ce broyage rend le matériau plus fin ce qui augmente sa réactivité (plus la surface spécifique est élevée, plus la réactivité chimique est importante) [34].

La structure de la surface des minéraux est détruite lors du broyage ce qui crée des valences électriques libres qui conduisent facilement aux réactions physicochimiques du matériau et donc à une activité pouzzolanique [35].

Ce traitement possède un avantage fonctionnel qui concerne l'amélioration des propriétés mécaniques et la durabilité du ciment, ainsi que la diminution de sa chaleur d'hydratation ce qui diminue la fissuration. De plus, il a un avantage écologique qui est la diminution de l'émission de CO₂ par l'industrie cimentière et économique car le montant d'activation mécanique n'est pas élevé. [4]

1.2.9.2. Activation thermique

La réaction pouzzolanique est observable sur des matériaux qui comportent des phases minérales dans lesquelles la silice et l'alumine sont partiellement mobilisables. Seules, la silice et l'alumine des phases vitreuses des pouzzolanes sont effectivement réactives [36].

La calcination cause l'effondrement du réseau cristallin permettant ainsi un passage d'une phase ordonnée en une phase désordonnée ; un refroidissement brusque fige la silice en phase vitreuse. Les températures optimales pour lesquelles s'effectuent les décompositions des minéraux varient d'un matériau à l'autre ainsi qu'en fonction des conditions expérimentales de balayage,... etc. [37]

Les matériaux volcaniques tels que les pouzzolanes sont naturellement calcinés car ils sont produits par la fusion des roches à des hautes températures à l'intérieur du volcan ce qui forme le magma, qui est ensuite évacué à l'extérieur après l'explosion du volcan, tout de même ces matériaux peuvent être traités pour améliorer leurs pouzzolanité. [38]

1.2.9.3. Activation chimique

Une activation chimique consiste à ajouter des substances chimiques sous forme de solutions liquides ou sous forme de poudre à un matériau riche en silice et/ou en alumine afin d'activer ou améliorer sa réactivité pouzzolanique. Ce traitement entraîne une modification de la structure des minéraux par des réactions chimiques entre ces derniers et l'activateur ajouté [4]. Ils peuvent jouer le rôle d'accélérateur ou de retardateur de durcissement du ciment composé, Ceci est en fonction de leur nature et le pourcentage utilisé ainsi que la composition chimique de l'ajout pouzzolanique [39].

Les activateurs chimiques peuvent être ajoutés pendant le broyage de la pouzzolane naturelle ou pendant le mélange du béton contenant une pouzzolane. L'activation chimique exige moins d'équipement supplémentaire contrairement à l'activation mécanique et thermique qui nécessitent plus d'équipements et d'énergie [40].

La littérature déborde de travaux traitant l'activation chimique des additions minérales. Il en résulte que l'augmentation de la réactivité de ces matériaux passe par 3 étapes [41] :

1. La dissolution des espèces solubles dans la phase alcaline.
2. Une réorganisation et une diffusion des ions dissous avec la formation de petites structures coagulées.
3. La croissance et la condensation de ces structures pour former les produits hydratés.

Des solutions hautement alcalines à base de la soude (NaOH) ou de la potasse (KOH) sont utilisées afin de dissoudre les ions de silicium et d'aluminium des matériaux pouzzolanique et former une pâte de géopolymère conduisant à une amélioration de la résistance au jeune âge de la matrice cimentaire résultante [39].

On peut également utiliser des matériaux riches en acide sulfurique, tels que le sulfate de calcium (gypse CaSO_4) et le sulfate de sodium (Na_2SO_4) pour l'activation. Le sulfate de calcium agit comme un véritable réactif puisqu'il se combine avec les éléments de la pouzzolane solubilisé par l'eau et donne naissance au tri-sulfoaluminate de calcium [38].

En termes de résistance, Qian et ses collaborateurs ont trouvé que l'addition de l'activant sulfate de sodium Na_2SO_4 augmente davantage la résistance d'un mortier (chaux +cendre volante) que l'activation mécanique de la cendre volante seule [42].

La production d'étringite est influencée par l'ajout de Na_2SO_4 et de K_2SO_4 , ce qui contribue au développement précoce de la résistance des mortiers composés de cendres volantes et de ciment.

L'activation chimique d'une matrice cimentaire incorporant 25% de métakaolin par les sulfates alcalins (Na_2SO_4 , K_2SO_4), permet l'accélération de l'hydratation à court terme qui favorise l'amélioration des performances mécaniques [33].

Conclusion :

L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux Ca(OH)_2 à la suite de la réaction d'hydratation du C_3S et C_2S (30% de la masse du ciment), qui contribue peu à la résistance de la pâte cimentaire hydratée. De plus, ce composé peut être assez facilement lessivé par de l'eau, augmentant ainsi la porosité et la perméabilité dans le bétonné, cela influencera négativement sur sa durabilité. Face à ces contraintes, une autre alternative est adaptée : la substitution du ciment par des ajouts cimentaires qui vont réagir avec la chaux libérée pour donner des C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau et cela par diminution de la porosité de la matrice cimentaire. La consommation de la chaux libérée par le ciment lors de son hydratation peut se faire en présence d'un matériau pouzzolanique, mais elle doit être limitée pour garder le milieu basique de la matrice cimentaire.

L'utilisation de ces ajouts, en consommant la portlandite, améliore les propriétés physico-chimiques du ciment, et développent les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires (mortier et béton). Leur substitution dans les ciments permet de réduire les émissions à effet de serre, ce qui se traduit par une fabrication peu polluante et économique des ciments.

Chapitre 2 :

Matériaux et méthodes

2.1. Introduction

Les caractéristiques des matériaux utilisés ont une influence directe sur les résultats d'étude, donc une connaissance approfondie des matériaux et leur caractéristiques s'avère indispensable pour toute recherche.

Les méthodes de caractérisation sont normalisées. Les normes peuvent varier en fonction du type de matériau à étudier, son application, et des résultats recherchés. Les normes exigent les conditions expérimentales, le nombre d'échantillons à tester, la forme et la taille qu'ils doivent respecter, ainsi que le mode opératoire à suivre.

Ce chapitre sera consacré aux différents matériaux utilisés et leurs caractéristiques, ainsi que les méthodes d'essais effectués sur ces matériaux.

2.2. Matériaux utilisés

2.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans tous les essais est un ciment Portland type CEM I - 42.5 N-SR3 conforme à la norme nationale NA 442 version 2013 et à la norme Européenne EN 197-1, provenant de la centrale à béton LAFARGE BEJAIA, avec un taux en C₃A limité à 3%. Cette quantité est nécessaire pour réagir avec le gypse en présence de l'eau afin de réguler la prise du ciment en formant l'étringite primaire.

Si la limite de 3% est dépassée et en présence du gypse, un autre hydrate qui est l'étringite secondaire peut se former, ce qui peut être néfaste pour le ciment en provoquant des fissurations par son expansion.

Le ciment utilisé est conçu pour des constructions susceptibles de subir l'action des sulfates. Ce ciment a une durée de début de prise supérieure à 60 min et de fin de prise entre 240 et 400 min (NA 230). Il développe après 2 jours une résistance en compression supérieure à 10 MPa et à 28 jours une résistance supérieure à 42.5 MPa. (Voir Annexe A)

La composition chimique du ciment est donnée comme suit :

**Tableau 2- 1 Analyses cimenterie chimiques du ciment CEM I - 42.5 N-SR3
(LAFARGE Bejaia).**

Perte au feu à 1000 C° (NA5042)	0.5 à 3%
Teneur en sulfates(SO3)	1.8 à 3%
Teneur en oxydes de magnésium MgO	1.2 à 3 %
Teneur en Chlorures(NA5042)	0.01 à 0.05 %

D'après le **Tableau 2- 1** :

- La perte au feu du ciment à 1000°C, nous renseigne sur la présence du CaO libre dans le ciment issu de la décarbonatation du calcaire. Elle est entre 0.5% et 3%. Cette valeur est repérée selon les normes et elle ne doit pas dépasser 5%. Si elle dépasse cette limite, la chaux vive CaO issue de la décarbonatation du calcaire en contact avec l'eau, se gonflera et provoquera des fissurations dans le ciment durci.
- La teneur en sulfate issu du dosage en gypse pour réguler la prise est respectée.
- La teneur en oxyde de magnésium MgO (périclase), issu de la décarbonatation de la dolomite MgCO₃ mélangé au calcaire CaCO₃, est relativement faible. La présence de MgO en excès peut provoquer en contact avec l'eau des expansions dans le ciment durci.
- La teneur en chlorures est extrêmement faible et le risque de corrosion des armatures est écarté.

Les propriétés physiques de ce ciment sont données dans le tableau qui suit :

**Tableau 2- 2 Propriétés physiques du ciment CEM I - 42.5 N-SR3
(Cimenterie LAFARGE Bejaia).**

Consistance normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm^2/g) (NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28jours ($\mu m/m$)	<1000
Expansion (mm)	≤ 2
Chaleur d'hydratation (j/g)	< 270

D'après le **Tableau 2- 1** :

- La finesse du ciment suivant la méthode de Blaine est entre 3200 et 3800 cm^2/g selon la norme NA231. Si la finesse du ciment est inférieure à 3200 cm^2/g , le ciment est grossier ce qui induit une réaction d'hydratation lente. Une finesse du ciment au-dessus de 3800 cm^2/g donne un ciment extrêmement fin ce qui provoque une réaction d'hydratation rapide. Cette fourchette est respectée.

2.2.2. Le sable

Le sable utilisé est un sable provenant de la carrière Bouandas, Wilaya de Setif. Le sable a été tamisé à un tamis de 5 mm et étuvé à 105° C.

Ci-dessous le tableau représentant l'analyse granulométrique du sable :

Tableau 2- 3 Analyse granulométrique du sable

Poids de L'échantillon (g)	Tamis (mm)	Poids des Refus partiels(g)	Poids des Refus cumulés (g)	Refus Cumulés en %	Tamisât Cumulés en %
1000	5	6.2	6.2	0.62	99.38
	2.5	478.1	484.3	48.8	51.2
	1.25	282.4	766.7	77.26	22.74
	0.63	167.2	933.9	94.11	5.89
	0.315	31.3	965.2	97.26	2.74
	0.16	24	989.2	99.68	0.32
	Fond	3.1	992.3	100	0.00

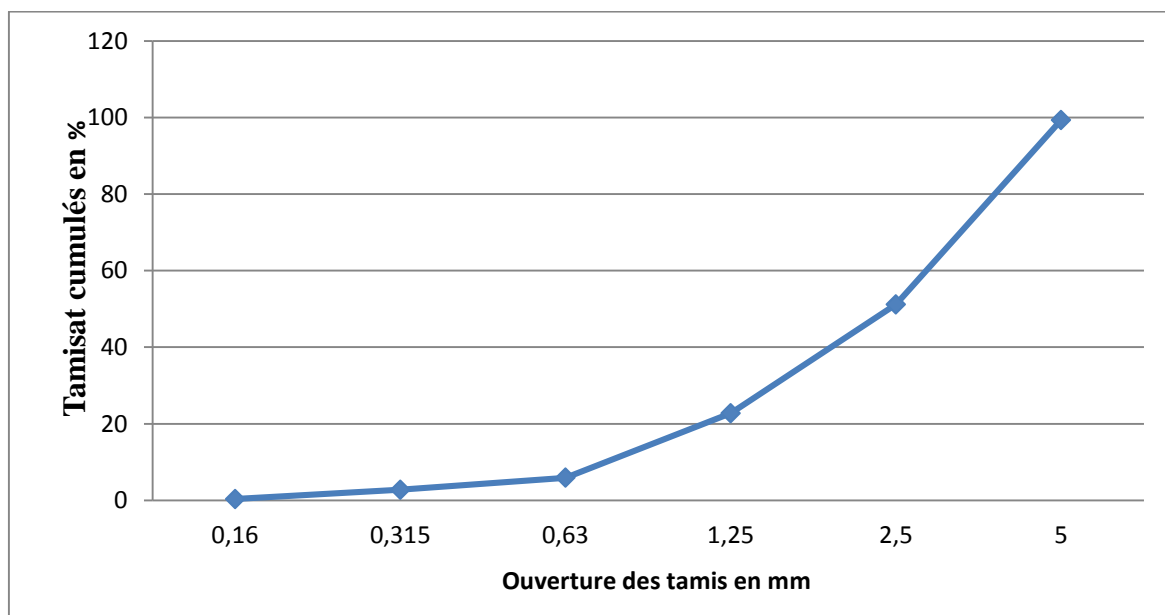


Figure 2- 1 Analyse granulométrique du sable.

➤ Le module de finesse

-Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

-Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF).

- Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.

-Selon la norme française [NFP 18-540], le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés, exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm.

Lorsque MF est comprise entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins.
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel.
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

Pour notre cas : $MF = (99.68 + 97.26 + 94.11 + 77.26 + 48.8 + 0.62) / 100 = 4.18$

Le sable utilisé est un sable dont le module de finesse est de l'ordre de 4.18 : Ce sable est extrêmement grossier.

La courbe ci-dessus confirme les résultats du module de finesse. Sur la courbe, le refus du tamis 0,16 mm est de l'ordre de 99,68 pourcent. Cela montre que le sable manque de particules fines.

A partir de 1 mm la courbe est très ascendante et donne un refus en grosses particules très important.

2.2.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation des pâtes et des mortiers est l'eau du robinet.

2.2.4 Les additions (sable broyé lavé et non lavé)

Ce sable est issu de la région de Tamanrasset.

Préparation du sable non lavé broyé inférieur à 40 μm (SNL40):

Pour obtenir une poudre de sable non lavé, on a procédé par les étapes suivantes :

-**séchage** : Nous avons séché une quantité de sable de Sahara pendant 24h dans une étuve à 105°C.



Figure 2- 2 Etuvage du sable de Sahara.

-**broyage** : Nous avons procédé par un broyage du sable séché à l'aide d'un broyeur à percussion, ensuite manuellement avec un mortier et pilon jusqu'à l'obtention d'une poudre fine.



Figure 2- 3 Broyage du sable.

-**tamissage** : la poudre est ensuite tamisée sur un tamis de 40 μ m.



Figure 2- 4 le tamissage.

-le tamisât sera utilisé comme addition dans notre étude.

Préparation du sable lavé et broyé inférieur à 40 μm (SL40):

Pour obtenir une poudre de sable lavé, on a procédé par les étapes suivantes :

-**lavage** : Nous avons lavé une quantité de sable de Sahara dans un tamis de 2 mm pour éventuellement éliminer les particules argileuses.

-**séchage** : Cette quantité de sable a été séchée pendant 24h dans une étuve à 105°C.

-**broyage** : Nous avons procédé par un broyage du sable séché à l'aide d'un broyeur à percussion, ensuite manuellement avec un mortier et pilon jusqu'à l'obtention d'une poudre fine.

-**tamissage** : la poudre est ensuite tamisée sur un tamis de 40 μm

-le tamisât sera utilisé comme addition dans notre étude.



Figure 2- 5 Lavage du sable.

- Les surfaces spécifiques Blaine des deux additions finement broyé (SNL40 et SL40) sont mesurés par l'appareil « Coulter SA 3100 Surface area and pore size analyser », en utilisant la méthode Brunauer-Emmet-Teller (BET), et sont donné comme suit :

Sable SL40: BET: 2,569 m²/g

Sable SNL 40: BET: 11, 285 m²/g

L'analyse chimique du sable de Sahara a donné les résultats suivant :

Tableau 2- 4 Analyses chimiques du SL40 et SNL40.

Eléments	Valeurs(%)	
	SL40	SNL40
PF105 °C	0,5	0,9
PF950°C	1,2	2,4
SiO ₂	67,2	63,8
Al ₂ O ₃	16,6	17,0
Fe ₂ O ₃	2,7	3,4
CaO	2,4	2,5
MgO	0,4	0,7
TiO ₂	0,35	0,45
MnO	0,05	0,06
K ₂ O	4,56	4,42
Na ₂ O	4,29	3,92
SO ₃	0,4	< 0,1

Interprétation du tableau

- La perte au feu à 105°C est due à l'évaporation de l'eau contenue dans les deux matériaux SNL40 et SL40. La perte au feu à 105 °C du SL40 est de 0.5%. Cette valeur fait repère à l'absorption d'humidité par le matériau. De même pour le SNL40 qui présente une valeur de 0.9%. La différence entre les deux valeurs est probablement due à la présence des particules poussiéreuses qui ont un pouvoir d'absorption important.
- La perte au feu à 950°C est due à la décarbonatation du calcaire. Les deux matériaux SNL40 et SL40 ont une faible perte au feu à 950 °C, cela prouve que ces matériaux utilisés contiennent un taux faible de calcaire. La perte au feu à 950 °C du SNL40 est double de celle du SL40, cela est dû au lavage.

Tableau 2- 5 ASTM C618-89 Exigences relatives à une pouzzolane naturel à utiliser comme addition dans un ciment portland.

Les exigences		Les valeurs trouvées		Observations	
		SL40	SNL40	SL40	SNL40
Al₂O₃ + SiO₂ +Fe₂O₃	Minimum 70%	86.5	84.2	Vérifiée	Vérifiée
SO₃	Maximum 4%	0.4	< 0.1	Vérifiée	Vérifiée
La teneur en humidité	Maximum 3%	0.5	0.9	Vérifiée	Vérifiée
Perte au feu à 950 °C	Maximum 10%	1.2	2.4	vérifiée	Vérifiée
Teneur en particule fine sur le tamis 45µm	Maximum 5%	10	3	n'est pas vérifiée	Vérifiée

D'après le **Tableau 2- 5**

- Pour le SNL40 les 5 exigences d'ASTM C-618-89 sont vérifiées, par contre la teneur en particules fines sur le tamis 45µm n'est pas vérifiée pour le SL40. Cela parce que le sable non lavé contient plus de particules fines que le sable lavé. (voir **Figure 2-6**)

-La distribution des tailles des particules a été analysée par diffraction au laser (Beckman Coulter LS-100) et nous a donné les résultats suivant :

Tableau 2- 6 Les volumes cumulatifs en % en fonction du diamètre de la particule en (μm) mesuré au laser.

Diamètre (μm)	Volume cumulatif en pourcentage	
	SL40	SNL40
5	25,1	40,4
10	37,8	57
32	74	88,1
63	99,4	99,9
100	100	100
125	100	100
250	100	100
500	100	100

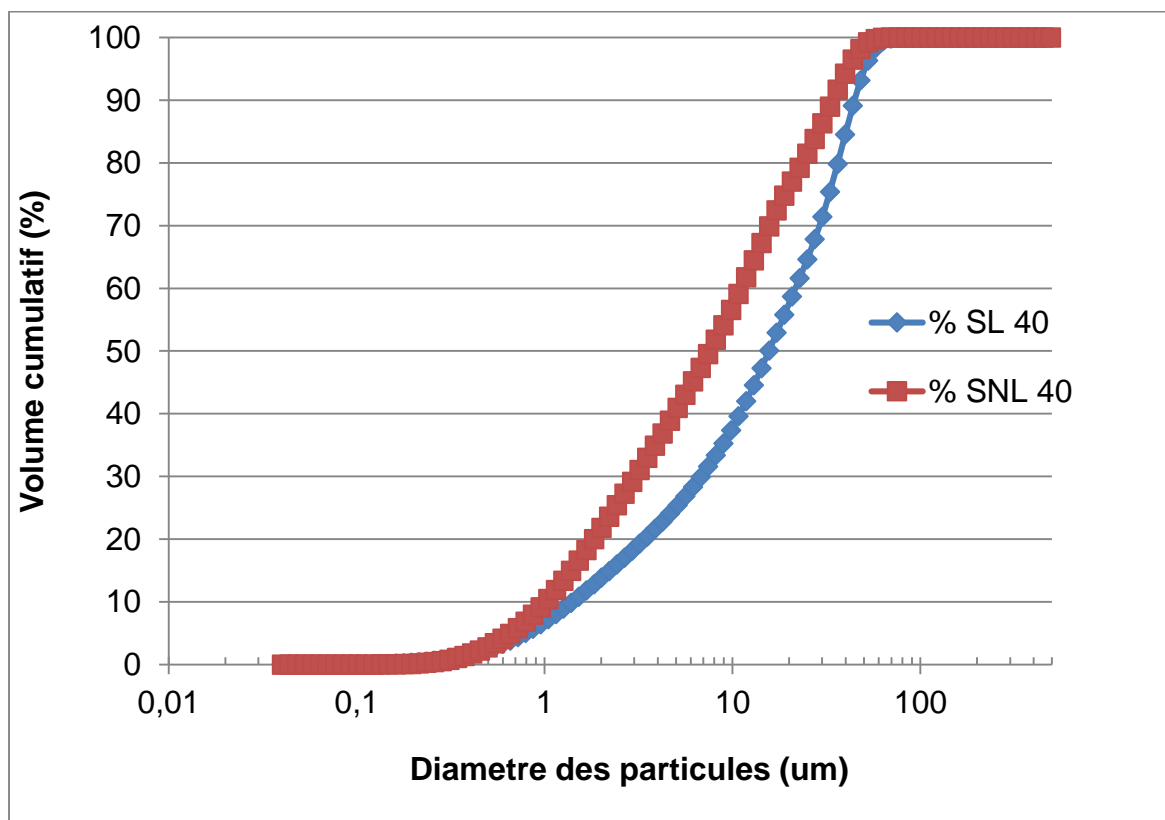


Figure 2- 6 Les volumes cumulatifs en % en fonction du diamètre de la particule en (μm) mesuré au laser.

Interprétation des résultats :

D'après le tableau (**Tableau 2- 6**) et le graphe de la figure (**Figure 2- 6**), Nous constatons que :

- La courbe du SNL40 est au-dessus de la courbe du SL40 à partir de 1 μm , cela indique que le SNL40 contient plus de particules fines que le SL40, tel que 60% de volume du SNL40 sont des particules ayant un diamètre inférieur à 10 μm ; par contre le SL40 contient juste 40%. Le sable du Sahara contient des particules poussiéreuses de couleur rouge. Lors de son lavage, ces particules ont été éliminées. Donc le SNL40 présente un taux élevé en fines par rapport au sable SL40.
- Le volume des particules ayant un diamètre inférieur à 40 μm est d'environ 100% pour les deux additions (SL40, SNL40) ; Cela confirme le tamis utilisé 40 μm .
- Ce résultat est confirmé par le calcul de la surface spécifique selon Blaine. La surface spécifique du SNL40 est de l'ordre de 11.285 m^2/g par contre celle du SL40 est de l'ordre de 2.569 m^2/g .

2.3. Méthode d'essais**2.3.1. Echantillonnage (NF P 18-533)**

Lors du prélèvement des quantités nécessaires pour nos essais en laboratoire, il faut faire en sorte que ces échantillons soient représentatifs des matériaux où le prélèvement a été fait.

Le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

- Prélèvement au niveau de la carrière d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai ;
- Au laboratoire: prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui doit être également représentative de l'échantillon de départ.

➤ Prélèvement sur le tas

Lorsqu'un matériau est mis en stock, la distribution des éléments n'est pas toujours homogène à travers le tas. On prélèvera donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble.

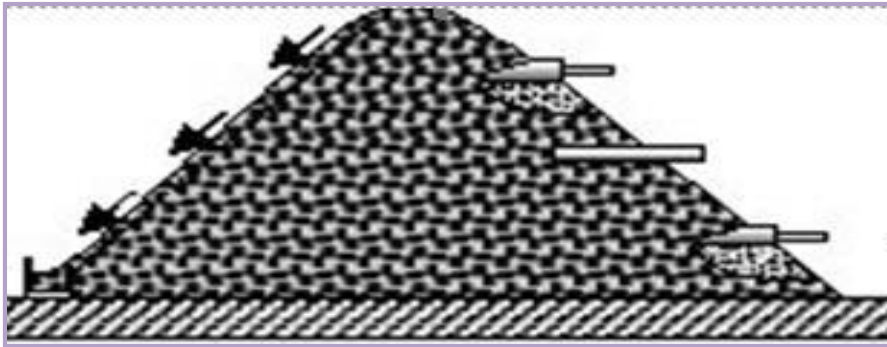


Figure 2- 7 Prélèvement sur le tas.

➤ Quartage

L'échantillon est divisé en quatre parties égales, dont on ne retient que la moitié en réunissant deux parties opposées. Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué. L'opération pouvant se répéter trois ou quatre fois, on obtient ainsi un échantillon représentatif du matériau initial. (Voir **Figure 2-8**)

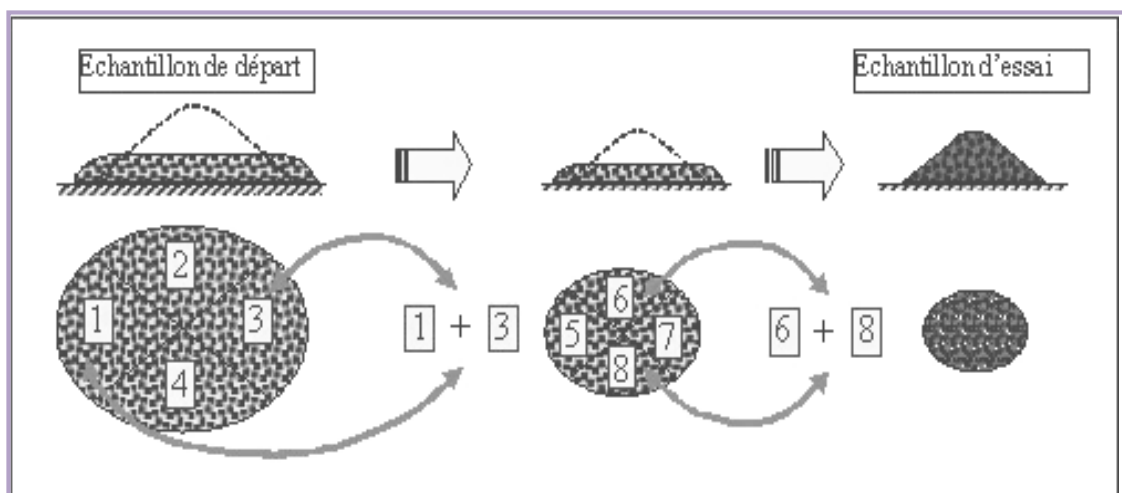


Figure 2- 8 Quartage.

2.3.2. Confection des mortiers

On a confectionné deux sortes d'éprouvettes. Des éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ conforme a la norme EN 196-1 et des éprouvettes cubiques de $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ selon la norme ASTM C-311.

-pour chaque éprouvette, on prépare trois exemplaires, et on prend la moyenne des résultats obtenus. Ceci afin de prendre en considération les erreurs qui peuvent être commis lors de la manipulation, les imprécisions du matériel utilisé ainsi qu'aux conditions imprévisibles.

➤ **Les éprouvettes prismatiques (4*4*16) cm³ selon la norme EN 196-1**

1-composition du mortier

Les proportions utilisées pour la confection du mortier sont les suivantes :

- (450 ± 2) g de ciment.
- (1 350 ± 5) g de sable 0/5 de carrière Bouandas.
- (225 ± 1) g d'eau.
- (E/C=0.5)

Deux séries de mortiers ont été réalisés. Chacune avec son type d'addition (SL40 et SNL40), et un taux de substitution variant (5%,10%,15%et 20%). En plus des deux séries, un mortier témoin a été confectionné avec 0% d'addition, qui sert de référence dans cette étude.

L'addition est ajoutée en substitution massique du ciment avec un rapport E/C=0.5. La température adoptée pour cette étude est de 20C°.

2-Malaxage du mortier

La même procédure de gâchage a été utilisée pour tous les mortiers :

- Introduire le ciment et l'addition dans la cuve du malaxeur ; mettre le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 30 secondes.
- Introduire régulièrement le sable et malaxer le mélange pendant 60s.
- Introduire l'eau et malaxer pendant 60s.
- Arrêter le malaxeur. Pendant les 15 premières secondes enlever le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci à l'aide d'une spatule.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 secondes.

Toutes les mesures ont été prises par une même balance et tous les mélanges ont été fabriqués dans un malaxeur d'une capacité maximale de 5 L. (voir **Figure 2-9**).



Figure 2- 9 Malaxeur de capacité de 5L (laboratoire génie civil Université de Bejaia).

3-moulage des éprouvettes

-Mouler les éprouvettes immédiatement après la préparation du mortier, ensuite on les vibre à l'aide d'une table vibrante jusqu'à absence de la montée des bulles d'air.

4- Conservation des éprouvettes

Après vibration et arasage du mortier frais, les éprouvettes sont recouvertes de matière plastique pendant 24 heures afin d'éviter l'évaporation d'eau qui peut entraîner des fissures dues au retrait.

5- Décoffrage des éprouvettes

Après le démoulage, les éprouvettes sont plongées dans l'eau à une température de 20°C pendant 28 jours.



Figure 2- 10 La cure des éprouvettes dans l'eau.

-peser les éprouvettes avant et après la cure d'eau.

➤ **Les éprouvettes cubiques (5*5*5) cm³ selon la norme ASTM C-311**

1-Composition du mortier

Pour avoir un mortier de test, nous avons remplacé 20% de la masse de la quantité de ciment utilisée dans le mortier de contrôle par deux types d'additions (SL40 et SNL40). Pour chaque mélange de mortier nous avons réalisé 3 cubes 5*5*5 cm³. Une fois les éprouvettes cubiques confectionnées, elles sont laissées dans les moules pendant 24 heures. Après le démoulage, les éprouvettes sont plongées dans l'eau jusqu'au 28^{ème} jour de test d'activité pouzzolanique. Le tableau ci-dessous donne la composition du mortier de teste et du mortier de contrôle :

Tableau 2- 7 Composition des deux mortiers selon la norme ASTM C-311.

Mortier de contrôle	Mortier de teste
500 g de ciment Portland	400 g de ciment Portland
1375 g de sable	100 g d'addition (SL40 ou SNL40)
242 ml d'eau	1375 g de sable
	242 ml + 5 ml d'eau

-Selon la norme ASTM C-311, la quantité d'eau de gâchage est de 242 ml+5ml pour les mortiers de test. Cette augmentation est due à la présence des particules fines dans les additions utilisées qui exigent une quantité plus importante d'eau par rapport au mortier témoin pour avoir une même consistance.

2-Malaxage et moulage du mortier

On suit les mêmes étapes citées auparavant.



Figure 2- 11 La cure des éprouvettes cubiques (5*5*5).

2.3.3. Essai de consistance (selon la norme EN 196-3)

L'attention des utilisateurs est de plus en plus attirée par les propriétés des mortiers et des bétons à l'état frais, avant la prise et le durcissement. Les caractéristiques du mortier et du béton sont fondamentales et varient avec la nature du liant, le dosage en eau et le mode de préparation. La pâte de ciment de consistance normalisée a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée. L'eau nécessaire à une telle pâte est déterminée par des essais de pénétration sur pâte à quantités d'eau différentes, L'état pâteux intermédiaire entre liquide et solide est caractérisé par sa consistance qui peut être molle, plastique ou bien ferme. L'essai de consistance doit être réalisé suivant les prescriptions ordinaires, c'est à dire à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et à une hygrométrie supérieure à 65%.

➤ Objectif de l'essai

L'essai de consistance permet de déterminer la quantité d'eau optimale pour gâcher un liant afin d'obtenir une pâte normale. La pâte obtenue a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée

➤ Principe de l'essai

L'essai est réalisé pour trouver la quantité d'eau optimale qui doit être mélangé avec une masse de liant, dans laquelle la sonde de l'appareil de Vicat ne s'enfonce que de (6 ± 1) mm du fond du moule.

➤ Conduite de l'essai

Avant de commencer l'essai, il faut mouiller et égoutter le godet et le batteur du malaxeur pour obtenir les résultats estimés.

- Peser $500g \pm 1g$ de ciment et le verser dans le godet du malaxeur.
- Gâcher le ciment avec 242 g d'eau.
- Malaxer la pâte pendant 90 secondes à vitesse lente.
- Arrêter pendant 15 secondes, démonter le godet et remettre avec une spatule toute la pâte adhérente à la cuve au-delà de la zone de malaxage.
- Remonter le godet et malaxer durant 90 secondes à vitesse rapide.
- Remplir le moule tronconique avec la pâte obtenue, et araser la surface en prenant appui sur le bord du moule.
- Porter le moule plein sur l'appareil de Vicat, et régler le niveau zéro de la sonde (la sonde est tangente avec le bord du moule).
- Centrer le moule dans l'axe de la sonde, abaisser la sonde avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte, et desserrer la vis pour que la sonde pénètre sous son poids propre dans la pâte.
- Après 30 secondes, noter la valeur de l'enfoncement « d » lue sur l'index de l'appareil :
 - Si $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, l'essai est concluant et la consistance est normale.
 - Si $d = 5 \text{ mm}$, la pâte est trop mouillée et il faut recommencer l'essai avec moins d'eau.
 - Si $d = 7 \text{ mm}$, la pâte est trop ferme et il faut recommencer l'essai avec plus d'eau.
- Répéter l'essai avec des teneurs en eau différentes jusqu'à trouver $d=6\text{mm} \pm 1 \text{ m}$



Figure 2- 12 Essai de consistance.

2.3.4. Essai de prise (selon la norme EN 196-3)

Les réactions qui se passent dès l'instant où l'eau est ajoutée au ciment et qui se poursuivent dans le temps, sont très complexe. L'hydratation est modifiée lorsque le ciment reçoit des constituants secondaires (laitier de haut fourneau, cendres volantes de centrale thermique etc...), ou des adjuvants chimiques. Les constituants anhydres du ciment mis en présence d'eau, donneraient naissance à une solution sursaturée. Des hydrates se formeraient dans cette solution et précipiteraient en donnant des microcristaux : cela correspondrait au début de prise. L'essai de prise doit être réalisé à une température de 20°C et à une hygrométrie supérieure à 90%.

➤ Objectif de l'essai

L'essai de prise permet de déterminer le temps de prise, ce qui correspond au temps écoulé du moment de gâchage du ciment jusqu'au début de prise.

➤ Principe de l'essai

L'essai est réalisé pour mesurer le début de prise sur pâte à consistance normalisée à l'aide d'un appareil classique de Vicat équipé d'une aiguille de diamètre 1.13 mm. Le début de prise est l'intervalle de temps passé entre l'instant de gâchage du liant et celui où l'aiguille de Vicat

s'arrête à une distance du fond du moule de (4 ± 1) mm. La fin de prise est obtenue lorsque l'enfoncement de la sonde n'est que 0.5 mm.

➤ **Conduite de l'essai**

Avant de commencer l'essai, il faut mouiller et égoutter le godet et le batteur du malaxeur.

- Préparer une pâte à consistance normalisée.

Le temps t_0 est celui de moment de gâchage du liant.

- Remplir immédiatement le moule tronconique de pâte et araser la surface en prenant appui sur le bord du moule.

- Régler le niveau zéro de l'aiguille.

- Centrer le moule dans l'axe de la sonde, abaisser la sonde avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte, et desserrer la vis pour que la sonde pénètre sous son poids propre dans la pâte.

- Après 30 secondes, noter la valeur de l'enfoncement « d » lue sur l'index de l'appareil

-Placer le moule dans une armoire humide (20 ± 1) °C et 90% d'humidité relative.

- Procéder de la même façon à des intervalles de temps de 5 mn près, jusqu'à l'observation du début de prise et la fin de prise.

Note :

Les essais de prise et de consistance ont été réalisés sur les deux séries de pâtes avec un type d'addition différent (SL 40 et SNL40) et en variant le taux de substitution du ciment à chaque fois (0%,5%,10% ,15%,20%).



Figure 2- 13 Essai de prise.

2.3.5. La résistance à la compression (selon la norme EN 196-1 et ASTM C-311)

C'est l'essai couramment utilisé sur les bétons ou les mortiers à l'état durci. La précision des résultats de l'essai de la résistance à la compression est affectée par plusieurs paramètres : le type des matériaux et leurs dimensions, la préparation des faces d'essai ...etc.

Actuellement, cet essai est le plus révélateur des décisions à prendre pour juger la qualité d'un mortier ou d'un béton durci.

➤ **But de l'essai**

Le but de cet essai est de suivre l'évolution de la résistance pour chaque combinaison de mortier élaboré, pour les âges de 7 jours, 14 jours et 28 jours après le coulage des éprouvettes.

Dans notre cas on s'est intéressé aux résultats obtenus à 28 jours.

➤ **Principe de l'essai**

Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section de l'éprouvette.

➤ **Equipement nécessaire**

- Une presse hydraulique.



Figure 2- 14 Presse hydraulique pour l'essai mécanique de la compression.

➤ **Conduite de l'essai**

- On choisit la surface la plus lisse, puis on centre l'éprouvette sur la presse d'essai.
- Appliquer le chargement jusqu'à la rupture de l'éprouvette.
- Soit (S) la section orthogonale de l'éprouvette, la résistance R_c , est exprimée en MPa et a pour expression :

$$R_c = F/S$$

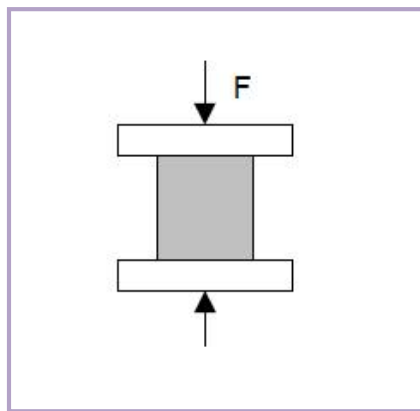


Figure 2- 15 Schéma expliquant l'essai de compression.

Avec : **F** : charge de rupture exprimée en MN.

S : surface de l'éprouvette en m^2 .

2.3.6. L'indice d'activité pouzzolanique

L'indice d'activité est un paramètre qui décrit quantitativement le degré de réaction pouzzolanique. Il est donné par le rapport entre les résistances à la compression d'éprouvettes normalisées d'un mortier avec p% d'ajout à tester et d'un mortier témoin avec 100% de ciment.

$$I = R_p / R_0$$

Avec :

I= indice d'activité pouzzolanique.

R_p = résistance à la compression du mortier avec p% d'ajout en masse de ciment.

R_0 = résistance à la compression du mortier témoin avec 100% de ciment.

- **Selon la norme ASTM C618-89**

Un matériau est considéré comme pouzzolanique si son indice d'activité I est supérieur ou égale à 75 pourcent.

L'indice d'activité pouzzolanique doit être vérifié sur éprouvette prismatique $4*4*16 \text{ cm}^3$ pour chaque cas d'addition (5, 10, 15 et 20 pourcent). On calcule ensuite l'indice d'activité pouzzolanique. Si cet indice d'activité est pour une valeur de substitution supérieure ou égale à 75 pourcent, cela veut dire qu'à cette substitution, La résistances à la compression est optimale. Si toutes les valeurs de l'indice d'activité pouzzolanique sont inférieures à 75 pourcent, on conclue que l'addition substituée ne présente aucun signe d'activité pouzzolanique.

- **Selon la norme EN 196 Partie 5**

Les éprouvettes prismatiques sont réalisées selon la norme EN 196 partie-1. On trace la courbe des résistances à la compression des mortiers en fonction des substitutions en pourcentage (0, 5, 10, 15, 20 pourcent). Si on trouve un optimum de résistance à la compression pour une substitution quelconque, cela veut dire qu'à cette valeur, il y'a une forte activité pouzzolanique. Par contre si la courbe de résistance à la compression diminue en fonction du dosage, les additions substituées ne présentent aucun signe d'activité pouzzolanique.

- **Selon la norme ASTM C311**

Les éprouvettes cubiques $5*5*5 \text{ cm}^3$ sont confectionnées selon la norme ASTM C311. L'indice d'activité pouzzolanique doit être calculé sur éprouvette cubique $5*5*5 \text{ cm}^3$ pour un seul cas de substitution qui est de 20 pourcent selon la norme ASTM C 311. On compare cet indice d'activité pouzzolanique à la valeur de 0,75.

Conclusion

La connaissance des caractéristiques des matériaux utilisés est nécessaire afin d'analyser les essais réalisés. Les méthodes sont aussi importantes et peuvent s'impliquer à l'analyse des résultats.

Chapitre 3 :

Résultats et discussions

3.1. Introduction

Ce chapitre est réservé aux résultats des différents essais effectués au laboratoire sur des mortiers à base de deux additions (SNL40 et SL40) avec des pourcentages variés (0%, 5%, 10%, 15% et 20%).

Ces résultats portent sur les essais de caractérisation d'un liant (essai de consistance, essai de prise) et l'évolution de la résistance mécanique (compression) à 28 jours.

3.2. Les essais de caractérisation d'un liant

3.2.1. Essai de consistance

Tableau 3- 1 Essai de consistance.

Substitution en pourcentage	Rapport E/C en pourcentage	
	SNL40	SL40
0	28	28
5	28,8	30
10	29,5	31
15	30,5	32
20	31,5	32

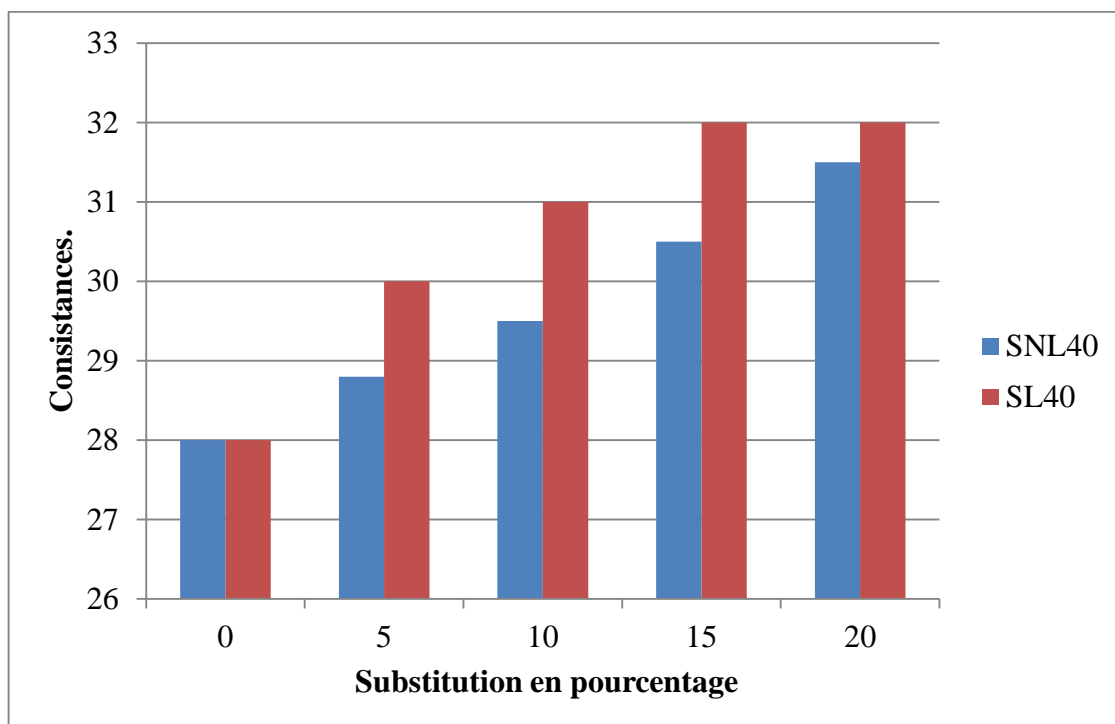


Figure 3- 1 Variation de la consistance.

Interprétation des résultats

D'après le **Tableau 3- 2** et la **Figure 3-1** nous observons :

- La pâte de ciment avec le SL40 donne un rapport E/C plus élevé que celui avec le SNL40. Cette différence montre que les consistances des pâtes avec SL40 sont légèrement meilleures que celles des pâtes avec le SNL40.
- Le mortier témoin présente un rapport E/C de 28% qui est le plus faible par rapport aux autres mortiers contenant les différentes additions (SNL40 et SL40), cela parce que ces dernières exigent une quantité plus élevée d'eau.
- Le rapport E/C augmente avec chaque augmentation du pourcentage d'ajout. En effet, les additions (SL40 et SNL40) absorbent une partie importante de l'eau destinée à l'hydratation du ciment. En conséquence, la quantité d'eau disponible pour l'hydratation du ciment anhydre et la formation des hydrates comme la portlandite et l'ettringite primaire est réduite.
- Le rapport E/C de mortier avec SNL40 est faible par rapport au mortier avec SL40. Le SNL40 présente des particules poussiéreuses qui exigent une demande en eau importante, donc il y'aura moins d'eau dans la matrice cimentaire.

3.2.2. Essai de prise

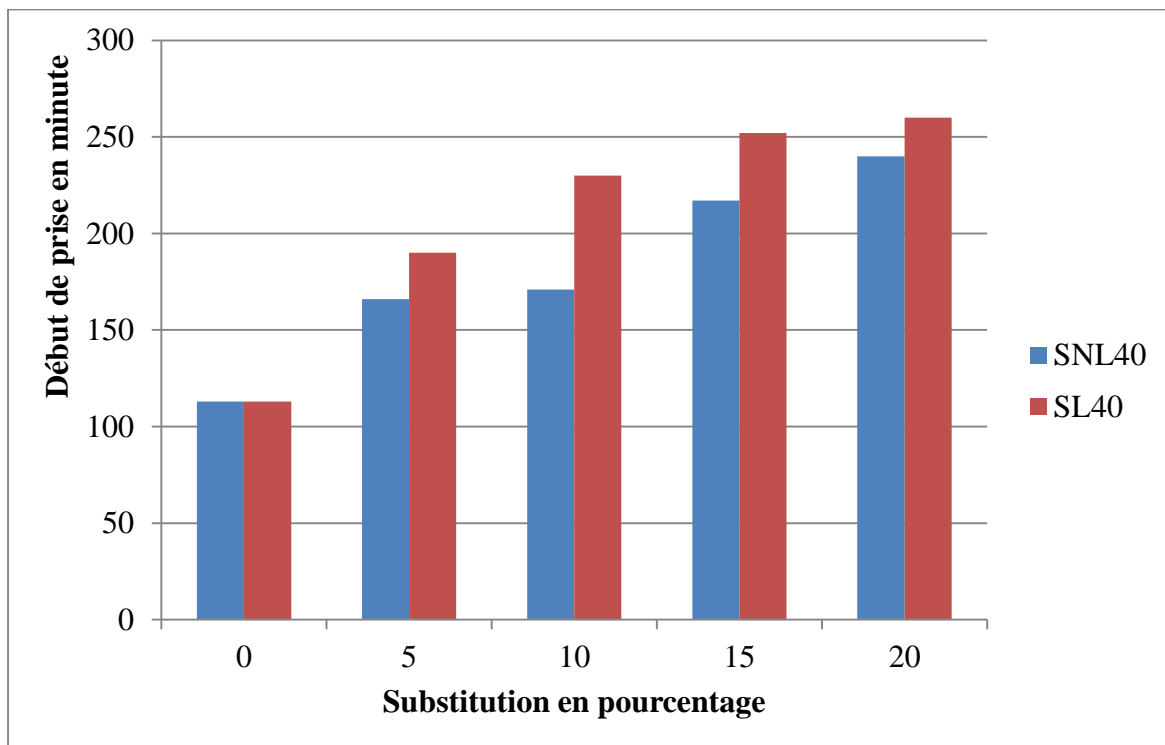


Figure 3- 2 Début de prise.

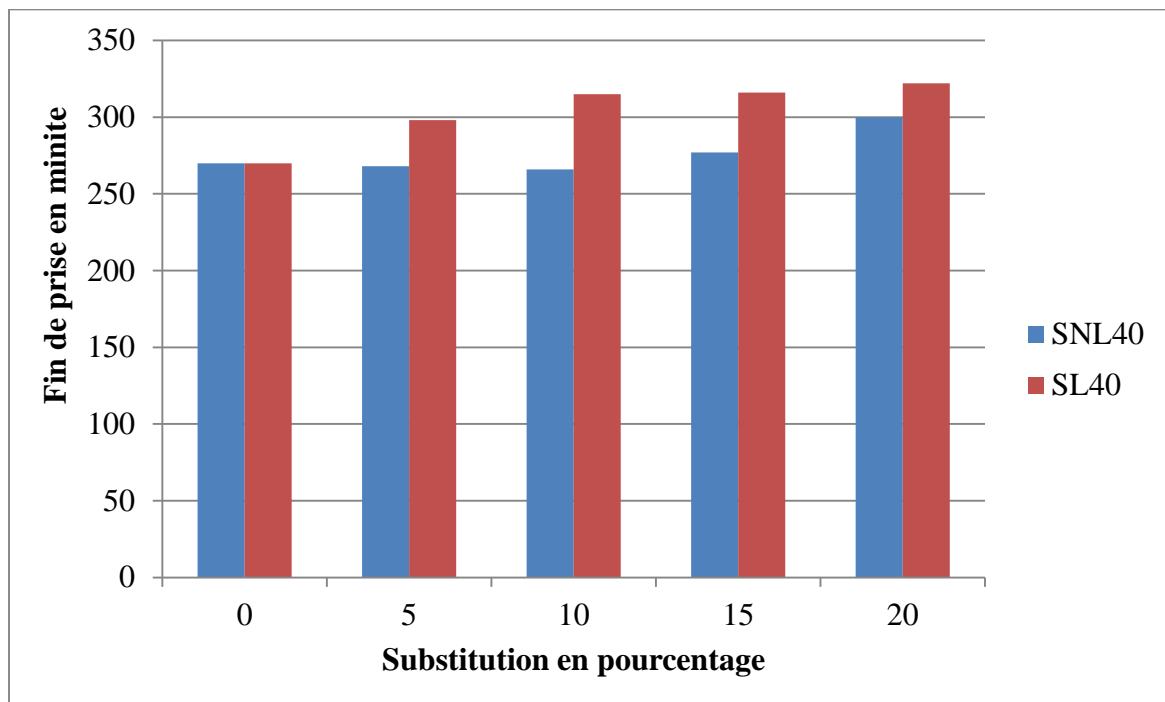


Figure 3- 3 Fin de prise.

Interprétation des résultats

- Les deux figures ci-dessus montrent l'augmentation du temps de prise (début et fin) des variantes SL40 et SNL40 par rapport au ciment portland, à cause de la soustraction d'une partie de clinker et son remplacement par du sable broyé lavé et non lavé, D'un autre côté une augmentation de ce temps est constatée avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.
- Le ciment avec SL40 présente un début et une fin de prise plus important que celui avec SNL40 à différents pourcentages. La quantité d'eau contenue dans le ciment avec SL40 est plus grande que celle dans le ciment avec SNL40 (voir la **Figure 3-1**).

L'eau joue le rôle d'un retardateur de prise.

3.3. Essai de compression

3.3.1. La résistance à la compression à 28 jours des éprouvettes cubiques (5*5*5) cm³ selon la norme ASTM C311 (voir Annexe B)

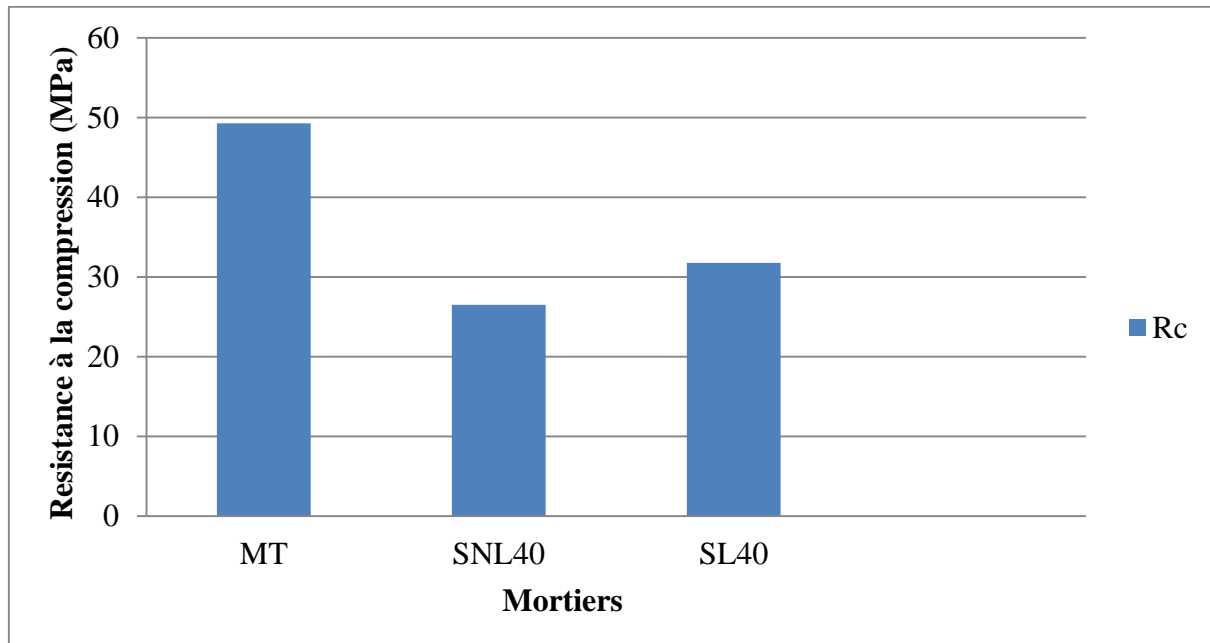


Figure 3- 4 La résistance à la compression des mortiers avec aditions (SNL40 et SL40) selon la norme ASTM C311.

Interprétation des résultats

A partir de la **Figure 3- 4** on constate que :

- La résistance à la compression du mortier SNL40 est faible par rapport au mortier SL40 pour un dosage en addition de 20% selon la norme ASTM C311.

Le mortier SNL40 contenant plus de particules fines que le mortier SL40. Ces particules n'ont pas contribué au développement de la résistance à la compression du mortier, Elles doivent jouer le rôle d'obturer les pores de ce dernier.

Les fines poussiéreuses contenues dans le mortier SNL40 sont probablement argileuses car aucune contribution à la résistance en compression n'est observée.

3.3.2. La résistance à la compression des éprouvettes selon la norme EN 196-1 (voir Annexe B)

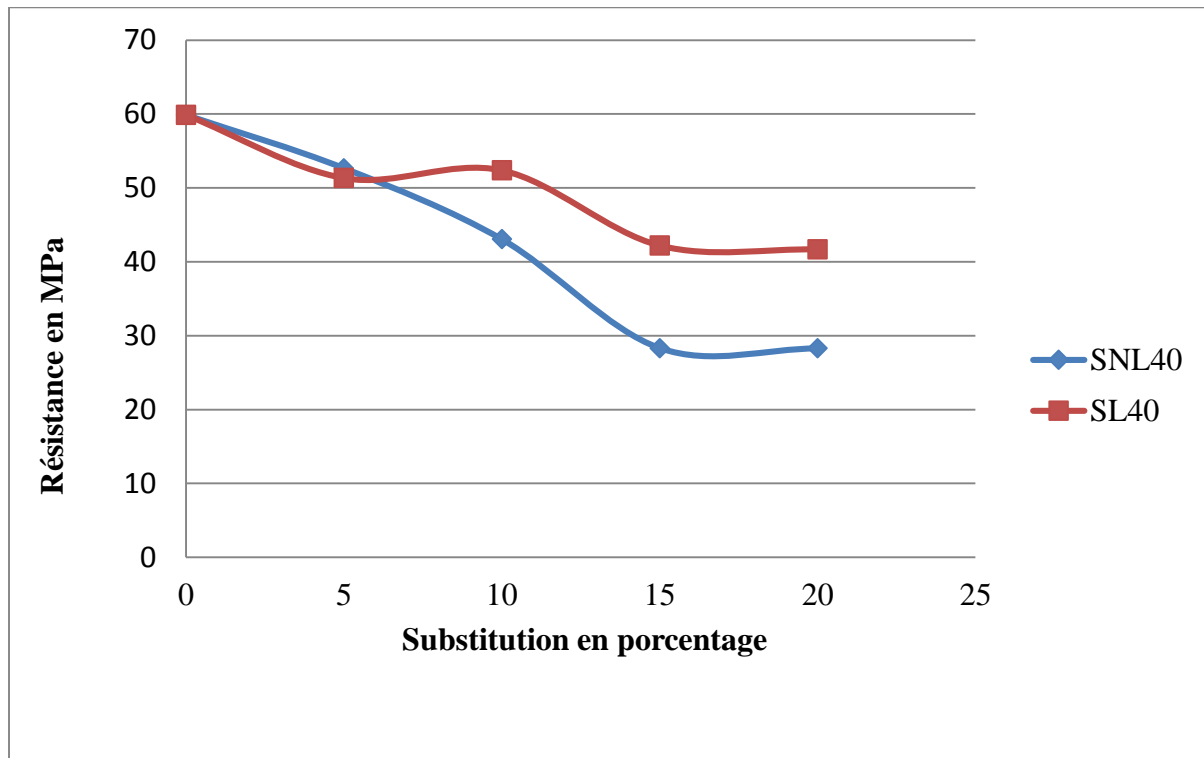


Figure 3- 5 Résistance à la compression des mortiers avec additions (SNL40 et SL40) selon la norme EN196-1.

Interprétation des résultats

Le graphe de la **Figure 3- 5** montre une chute de résistance à la compression à 5% d'addition pour les deux mortiers avec SNL40 et SL40.

Le mortier avec SL40 montre une augmentation de résistance à la compression à 10%, Ceci s'explique par le fait que ce mortier présente une consistance meilleure et en conséquence une compacité adéquate (voir le diagramme des consistances **Figure 3- 1**). Par contre la résistance du mortier avec SNL40 faible par rapport à celle du mortier avec SL40 à 10%.

Le SNL40 confirme la présence des particules argileuses qui adsorbent l'eau de gâchage et en conséquence donne une consistance moins meilleure que celle du mortier avec SL40.

Selon la norme EN 196-5, les deux sables (SL40 et SNL40) utilisés ne présentent aucun signe d'activité pouzzolanique en raison de la chute de la résistance à la compression en fonction du dosage d'addition.

3.4. Indice d'activité pouzzolanique (voir Annexe C)

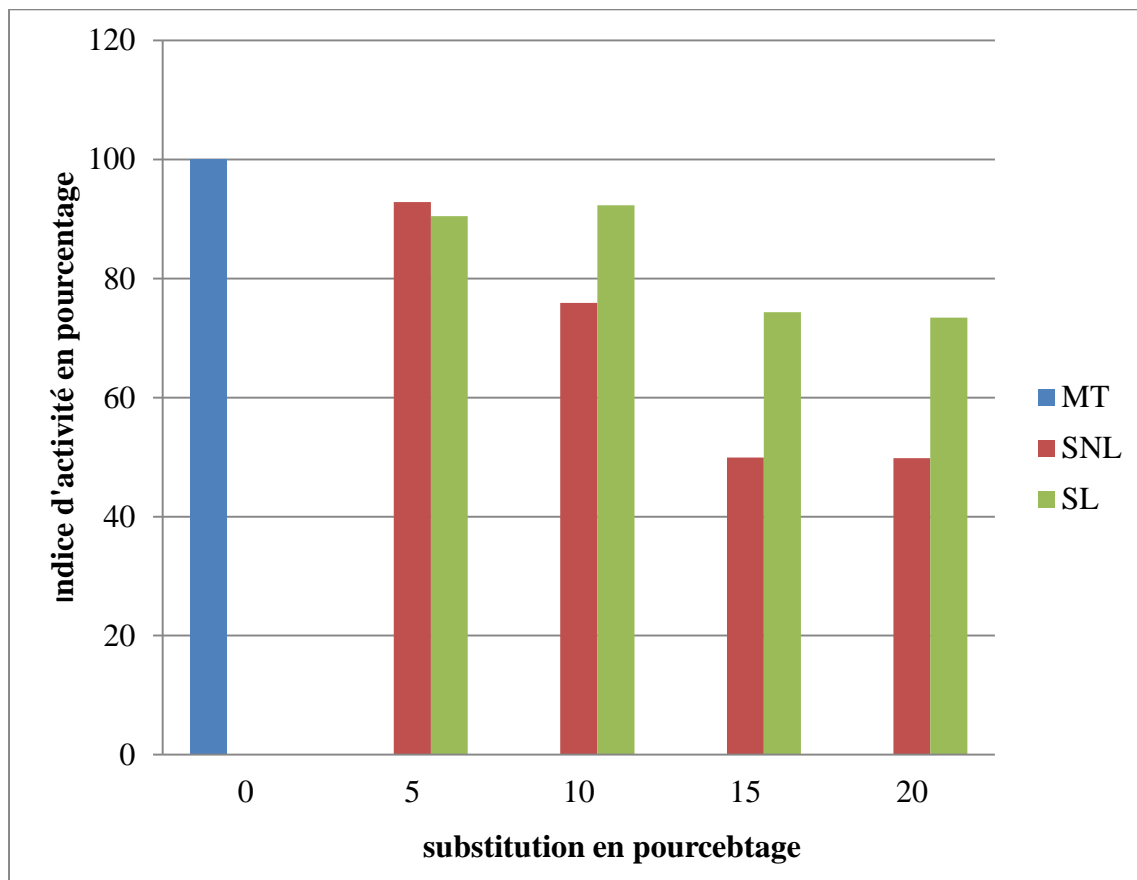


Figure 3- 6 Indice d'activité de la résistance de (SNL40, SL40) substitué dans le ciment à différents pourcentages selon la norme ASTM C-618.

Interprétation des résultats

Selon le graphe de la **Figure 3-6**, nous observons que :

- A 5% et 10% de substitution du ciment par le SL40, l'indice d'activité pouzzolanique est supérieur à 75% (seuil exigé par la norme ASTM C-618).
- Le SL40 comme substituant du ciment à 10% présente un meilleur indice d'activité pouzzolanique.

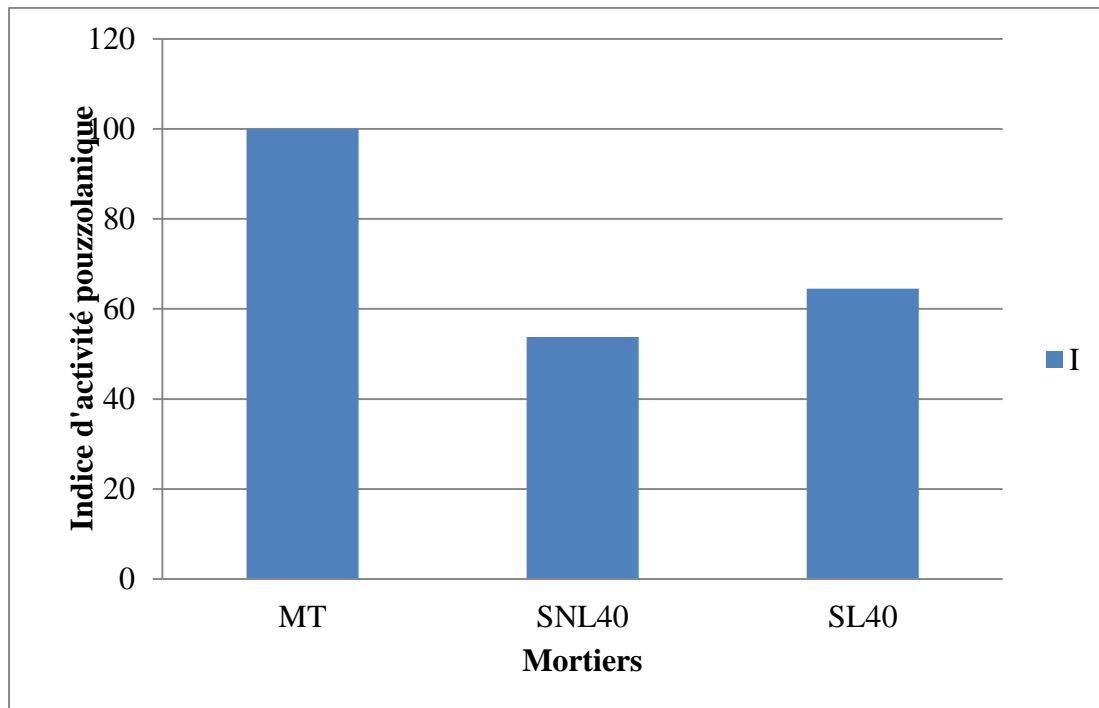


Figure 3- 7 Indice d'activité pouzzolanique de (SNL40, SL40) substitué à 20% selon la norme ASTM C-311.

Interprétation de résultats

D'après la **Figure 3-1**, nous remarquons que l'indice d'activité pouzzolanique des deux additions (SNL40 et SL40) est inférieur à 75% exigé par la norme ASTM C-311.

L'inactivité de ces deux additions est liée à la présence des particules poussiéreuses dans le SNL40 et aussi au manque de particules plus fines qui réagissent avec la chaux du ciment libéré lors de l'hydratation pour former du C-S-H.

3.5. Conclusion

Les résultats obtenus dans cette étude peuvent mener aux conclusions suivantes :

- Le sable du Sahara lavé et non lavé, finement broyé de diamètre inférieur à 40 μm , à 20% de substitution du ciment ne présente aucune activité pouzzolanique (selon la norme ASTM C-311).
- L'introduction de 5% à 10 % de SL40, permet au mortier de développer une résistance supérieure à la résistance d'un mortier contenant du SNL40 à même taux de substitution.
- Pour que le sable de Sahara nous donne un mortier plus résistant qu'un mortier sans addition, on doit améliorer son activité pouzzolanique, comme par exemple effectuer un broyage poussé allant jusqu'à 20 μm et moins pour rendre l'addition plus réactive avec la chaux du ciment. En parallèle avant le broyage, le sable doit être lavé pour éliminer les particules poussiéreuses qui sont peut-être argileuses.

Conclusion générale

Et perspectives

CONCLUSION GENERALE ET PRESPECTIVES

Dans le but de répondre à l'objectif fixé pour notre PFE, qui est l'étude expérimentale de l'activité pouzzolanique de sable du Sahara avec le ciment Portland type CEM I - 42.5, nous avons mené une évaluation par des essais mécaniques sur des mortiers contenant diverses fractions de sables broyé lavé et non lavé inférieurs à $40\mu m$.

La norme ASTM C-618 fournit l'une des méthodes les plus applicables pour évaluer les pouzzolanes naturelles. Cependant certains résultats de recherche montrent des contradictions entre les performances des pouzzolanes dans le mortier. D'autres traitements sont alors nécessaires. Ces traitements analysent les propriétés chimiques et physiques des pouzzolanes naturelles au moyen de la norme ASTM C-618 et de test complémentaires à savoir les méthodes de la norme EN 196-5, études de diffractions aux rayons X (DRX) et de microscopie électronique à balayage (MEB), teneur en résidus insolubles et essais thermogravimétriques ...etc.

Le test de l'activité pouzzolanique ne doit en aucun cas se limiter au test d'indice d'activité pouzzolanique. D'autres tests doivent être réalisés pour évaluer la performance pouzzolanique du matériau.

Les résultats obtenus montrent que les propriétés pouzzolaniques sont inexistantes dans les additions utilisées selon la norme **EN 196-5**, et faibles via la norme **ASTM C-618** et ne donnent aucunement de performances aux mortiers. Donc, il est nécessaire en perspective d'utiliser un sable propre et finement broyé atteignant un diamètre inférieur à $20\mu m$ pour une éventuelle réaction du sable avec la chaux du ciment libérée lors de son hydratation.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] : N.Savado, Élaboration et caractérisation d'un éco-ciment à base de poudre de mâchefer de charbon, Thèse de Doctorat, Université Bretagne Loire, 2017.
- [2] : L.Aouididi, Caractérisation d'un ciment à base de pouzzolane, Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2016.
- [3] : H.Ismail et D.Ait-Amrane, Etude de l'influence des ajouts cimentaires sur l'activité pouzzolanique des mortiers, Mémoire Master, Université A.Mira de Bejaia, 2012.
- [4]: D.Gerryville, Etude et amélioration de l'activité pouzzolanique de certains matériaux silicates pour une substitution partielle du clinker dans le ciment Portland, mémoire de Magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran-Mahamed Boudiaf.
- [5] : H. Mebarki, Etude comparative des clinkers de l'ouest Algérien : Analyse Physico-chimique et Applications, Mémoire Master, Université de Tlemcen, 2013.
- [6] : A.Ghermaoui, Effets de certains métaux sur les propriétés physico-chimiques des mortiers de ciment de Béni-Saf sans ou avec ajout de pouzzolane, Mémoire Master, Université ABOU BAKR BELKAID -TLEMCEM, 2015.
- [7] : M.Yahia, Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment, Mémoire Master, 2016.
- [8] : M.Bouhmid, Elaboration d'un éco-ciment pouzzolanique à base de vase de barrage hydraulique traitée et déchet de brique de construction, Mémoire de Magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf, 2011.
- [9] : E. Romilliat, Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2006.
- [10] : A.Belhocine et N.Nagoudi, Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux, Mémoire Master, Université KASDI Merbah Ouargla, 2014.
- [11] : L.Adjtoutah et F.Bouzidi, Utilisation de Metakaolin dans le ciment, Mémoire Master, Université A.Mira de Bejaia, 2016.
- [12] : A.D.Benredouane, Etude de l'activité pouzzolanique de la zéolithe X synthétisée à partir d'aluminosilicates naturels, Mémoire de Magister, 2012.

Références bibliographiques :

- [13] : P.Kiran, Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range, Mémoire Master, Virginia polytechnic institute and state university, 1998.
- [14]: Z.Bitari, Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux (calcaire) sur le comportement mécanique du mortier, Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2016.
- [15]: E. Gemelli et al, Assessment of industrial wastes in mortar layers deposited on stainless steel sheets of sinks, Santa Catarina State University, 2004.
- [16] : N.Chelouah, cours matériaux innovants, Master1, Université de Bejaia.
- [17] : K.Samimi, Contribution à l'étude de la durabilité des BAP dans les milieux agressifs : effets des pouzzolanes naturelles, thèse de doctorat, Université Bretagne Loire, 2016.
- [18] : Malhotra, V.M. 1987. Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton. Publié par le centre canadien de la technologie et de l'énergie, Ottawa, Canada.
- [19]: K.Ogawa et al, The mechanism of the hydration in the system C3S-pozzolana, Central Research Laboratory Onoda Cement Co., Ltd., Tokyo, Japan, 1980.
- [20]: Eric Garcia-Diaz, Réactivité pouzzolanique des métakaolinites : Corrélations avec les caractéristiques minéralo-géologiques des kaolinites, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Des Mines De SAINT-ETIENNE, 1995.
- [21] : P.SEGUI, Elaboration de liants hydrauliques routiers à base de pouzzolane naturelle ou de cendre volante de papeterie, thèse de doctorat, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2011.
- [22] : R.Idir, Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique, thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [23] : E.Halleux, Valorisation des cendres de balles de riz pour la production de matériaux pouzzolaniques à Madagascar, Master ingénieur, Université de Liège, 2013.
- [24] : W.Wilson, Bétons durables à base de cendres d'écorces de riz, Mémoire de Maitrise, Université DE SHERBROOKE, 2012.

Références bibliographiques :

- [25] : L.HEMAN et I.GADOUM, Etude de l'influence des cendres du grignon d'olive comme addition sur les caractéristiques physico-mécaniques du béton, Mémoire Master, Université A.Mira de Bejaia, 2018.
- [26] : A.Farooq et M.Danish, Use of rice huskash as an admixture to substitute of Portland cement in concrete, Al-Falah school of engineering and technology, Faridabad, Haryana, India,2018.
- [27]: T.Guimer, Contribution de l'addition minérale sur les caractéristiques physico-mécaniques des liants et mortiers, Mémoire de Magister, Université MOHAMMED KHEIDER - BISKRA, 2007.
- [28] : D.Geryville et al, Elaboration de pouzzolanes artificielles à partir de déchets industriels pour une substitution partielle du clinker dans le ciment Portland,
- [29] : P. Rossi, Laitiers de haut-fourneau - Origine, production et caractéristiques, 2014.
- [30] : M.Bessnouci, impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat, Mémoire de Magister, Université ABOU BAKR BELKAID -TLEMCEM, 2010.
- [31]:Sajedi F, Razak H, Compraison of different methods for activation of ordinary Portland cement-slag mortars, Construction and building materials,2011.
- [32]: S. Donatello, Comparison of test methods to assess pozzolanic activity, Centre for Environmental Control and Waste Management.
- [33]:F.Saidat, Activation chimique du métakaolin dans une matrice cimentaire, thèse de doctorat, Université de TOULOUSE, 2013.
- [34]: Zivko Sekulic et al, Mechanical activation of various cements, Institute for Technology Nuclear and Other Minerals Raw Materia, Franshe d Epere 86, Belgrade, Yugoslavia, 2004.
- [35]: Leo Brewer et J. Ling-Fai Wang, The ground state of gaseous CaO; a study of the Matrix spectra of Ca and CaO, Submitted to Journal of Chemical Physics, 1971.
- [36]:A.Semcha, Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug, thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2006.

Références bibliographiques :

[37] : P.Mounanga, Étude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermophysiques, thèse de doctorat, Ecole doctorale de mécanique, thermique et génie civil de Nantes, 2004.

[38] : M.Amari, Activation chimique de la pouzzolane, Mémoire Master, Université de Bejaia Abderrahmane Mira-Bejaia, 2018.

[39]:C.Perlot, Influence de la décalcification de matériaux cimentaires sur les propriétés de transfert : Application au stockage profond déchets radioactifs, thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse U.F.R.P.C.A, 2005.

[40] : Caijun Shi, Comparison of different methods for enhancing reactivity of pouzzolans, CJS Technology Inc., 2116 Upland Drive, Burlington, Ontario, Canada L7M 2Z2, 2001.

[41]:J.Qian et al, Activation of blended cements containing fly ash, 2001, p1121-1127.

[42]:F.Saidat et al, Resistance à la compression et microstructure d'un liant à base de métakaolin activé par un sulfate alcalin, conférence internationale francophone, Liege, Belgique, 2018.

Références normatives :

NF EN 196-1 : Méthodes d'essais des ciments. Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques. Association Française de Normalisation (AFNOR). France.

NF EN 196-3 : Méthodes d'essais des ciments. Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité. Association Française de Normalisation (AFNOR). France.

NF EN 196-5 : Méthodes d'essais des ciments. Partie 5 : essai de pouzzolanité des ciments pouzzolaniques. Association Française de Normalisation (AFNOR). France.

NF EN 197-1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. Association Française de Normalisation (AFNOR). France.

ASTM C-311: Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete.

ASTM C618-89: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

Annexes



Mokaouem مقاوم بلوس Plus



Ciment Portland

NA 442 - CEM I 42,5 N-SR3

Mokaouem est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé.

Mokaouem

NA 442 - CEM I 42,5 N-SR3

Mokaouem NA 442 -CEM I 42,5 N-SR3 selon la NA 442 v 2013 et la EN 197-1II est conforme à la norme nationale NA 442 v 2013 et à la norme Européenne EN 197-1 avec un taux en C3A < 3%.

AVANTAGES PRODUIT



- Tout en étant un ciment de haute performance, **Mokaouem** protège la structure contre les agressions chimiques de l'environnement externe.
- Une meilleure durabilité pour les structures en béton.
- Une faible chaleur d'hydratation.











APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Les fondations et les structures à réaliser dans un milieu agressif
- Les travaux maritimes
- Les stations de dessalement et d'épuration
- Les travaux hydrauliques
- Les barrages et les digues de soutènement collinaire



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable (sec)  0/5	Gravillons (sec)  8/15mm 15/25mm	Eau (litres) 
Dosage pour béton C25/30	X 1 	+ X7 	+ X5  + X4 	+ 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

Formulation de béton à suivre dans le cas de l'absence d'une étude délivrée par un laboratoire"

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	0,5 à 3 %
Teneur en sulfates (SO3) (%)	1,8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,2 à 3
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0,01 à 0,05

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	> 60
Fin de prise (min)	240 à 400

• Composition minéralogique

	Valeur
Taux d'aluminate C3A	<3.0%

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥10
28 jours (MPa)	≥42.5

• Propriétés physiques

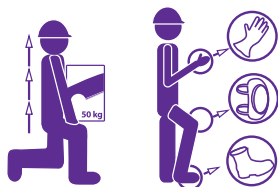
	Valeur
Consistance Normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Expansion (mm)	≤2,0
Chaleur d'hydratation	<270j/g

Ces valeurs sont données à titre indicatif et ne peuvent être considérées comme absolues

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- PROTÉGEZ VOTRE PEAU : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- MANUTENTION : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



Conditionnement:



Annexe B

La résistance à la compression des éprouvettes selon la norme EN 196-1

Substitution en pourcentage	Résistance à la compression en MPa	
	SNL40	SL40
0	59,885	59,885
5	52,67	51,3335
10	43,055	52,38
15	28,32	42,195
20	28,28	41,67

La résistance à la compression des éprouvettes cubiques (5*5*5) cm³ selon la norme ASTM C311

Les mortiers	Résistance à la compression
Mortier témoin	49,27
Mortier avec SNL40	26,5
Mortier avec SL40	31,78

Annexe C

Indice d'activité de la résistance de (SNL40, SL40) substitué dans le ciment à différents pourcentages selon la norme ASTM C-618

Substitution en pourcentage	Indice d'activité pouzzolanique		
	MT	SNL	SL
0	100		
5		92,8269299	90,4714487
10		75,8812125	92,3158266
15		49,9118787	74,365527
20		49,8413817	73,4402538

Indice d'activité de (SNL40, SL40) substitué à 20% selon la norme ASTM C-311

Les mortiers	Indice d'activité pouzzolanique
Mortier témoin	100
Mortier avec SNL40	53,7852649
Mortier avec SL40	64,5017252

Résumé

Dans le cadre de la recherche d'une fabrication économique et peu polluante des ciments, en substituant partiellement le clinker par des ajouts susceptible de développer des propriétés liantes. Ces ajouts améliorent les propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux cimentaires (mortiers et bétons) par le moyen de la réaction pouzzolanique. Nous allons étudier l'activité pouzzolanique d'un sable issu de Tamanrasset au Sahara algérien avec le ciment Portland CEM I - 42.5 et la possibilité de sa substitution dans le clinker. Dans le but de caractérisation des ciments à base de la poudre de sable du Sahara, des essais de consistance et de prise ont été réalisés sur des pâtes de ciment contenant deux types de poudre de sable : sable non lavé broyé d'un diamètre inférieur à $40\ \mu m$ (SNL40) et sable lavé broyé d'un diamètre inférieur à $40\ \mu m$ (SL40). Parmi les méthodes d'évaluation de la réaction pouzzolanique, nous avons utilisé la méthode mécanique (essai de résistance à la compression et l'indice d'activité pouzzolanique) sur deux types de mortiers (selon la norme ASTM C-311 et la norme EN 196-1) contenant les deux types d'addition. Les résultats obtenus montrent un manque d'activité pouzzolanique du sable broyé. Le sable étudié doit subir une amélioration à titre d'exemple un broyage plus poussé pour prétendre à une bonne activité pouzzolanique.

Mots-clés: Pouzzolane naturelle, L'activité pouzzolanique, L'indice d'activité, Ciment Portland.