

R

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira-Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil
Option : Structures

Thème :

Etat de l'art sur les propriétés des matériaux
cimentaires à base de pouzzolanes naturelles
chimiquement activée

Réalisé par :

- ✓ **BEKKOUCHE Riham**
- ✓ **ADIDOU Sabrina**

Encadré par :

- ✓ **M^{me} MEZIANI. M**

Soutenu Publiquement le:01/09/2020

Devant le jury :

- ✓ **M^{em} AREZKI. S**
- ✓ **M^r BOUZEROURA. M**

Promotion : 2019/2020

REMERCIEMENTS :

On tient dans un premier temps à remercier DIEU tout puissant de nous avoir donné la chance et le privilège d'étudier et de nous avoir permis d'en arriver là. Ainsi que nos parents qui nous ont toujours encouragés et soutenus durant toute la durée de nos études.

On adresse nos vifs remerciements à notre encadrante :
M^{me}MEZIANI Meriem ; pour avoir accepté de nous encadrer et qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que par l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a bien voulu nous consacrer.

On adresse aussi nos vifs remerciements aux membres des jurys pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.

On adresse nos remerciements à ceux qui ont toujours été disponibles pour nous faciliter la recherche et nous encourager.

Table des matières

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Liste des abréviations

Introduction Générale..... 1

Partie I : Synthèse bibliographique

I.1.Introduction.....4

I.2. ciment.....4

I.2.1. Problème lié à l'environnement5

I.2.2.Solution intervenant à l'impact environnemental7

I.2.3.Les ciment couramment utilisés.....8

I.2.4. Utilisation des ajouts en Algérie..... 10

I.3. Les pouzzolane.....10

I.3.1. La couleur des pouzzolanes.....11

I.3.2. Types de pouzzolane12

I.3.2.1. Pouzzolane naturelle.....12

I.3.2.2.Pouzzolane artificielle.....13

I.3.3. Effet de la pouzzolane.....13

I.3.3.1. A l'état frais.....13

I.3.3.2. A l'état durci.....13

I.3.4. Réaction pouzzolanique.....	14
I.3.5. Essais de pouzzolanicié et facteurs influençant.....	15
I.3.6. Optimisation de la pouzzolanicité.....	16
I.3.6.1. Activation thermique.....	17
I.3.6.1.1 Définition.....	17
I.3.6.1.2-La calcination.....	17
a- Calcination flash	18
b- Calcination industrielle.....	19
I.3.6.1.3- Augmentation de la température de cure.....	19
I.3.6.2. Activation mécanique	19
I.3.6.3. Activation chimique.....	20
I.3.6.4. Activation par les alcalins.....	20
I.3.6.5. Activation par les sulfates.....	21
I.3.7.Comparaison entre les différents types d'activation....	22
I.3.8.Evaluation de la réactivité pouzzolanique.....	23
I.4.Conclusion.....	25

Partie II : lecture approfondie et critique des références

II.1.Introduction.....	26
II.2.Les travaux réalisés dans la littérature.....	27
II.3.Méthode d'activation chimique.....	27

II.4.Conclusion.....37

Partie III : synthèse des données bibliographiques

III.1.Introduction.....38

III.2.Comparaison des résultats obtenus par les auteurs.....40

III.3.Conclusion et recommandations.....42

Conclusion générale et perspectives.....43

Résumé

Liste des figures

Figure I.1.: Répartition des émissions de CO ₂ selon leurs sources dans l'industrie cimentière.....	6
Figure I.2 : Origine des matériaux pouzzolanique.....	11
Figure.I.3.: les réactions d'hydratation ciment et de la pouzzolane.....	15
Figure I.4 : Les différentes méthodes d'activation selon [Shi 2001].....	17
Figure II.1. : Effet des activateurs chimique sur la résistance des pâtes de la chaux-cendres à faible teneur en calciums en fonction du temps.....	33
Figure II.2. : Effet des activateurs chimique sur la résistance des pâtes de chaux-cendres forte teneur en calciums en fonction du temps.....	33
Figure II.3. : Effet de l'addition de Ca(OH) ₂ sur la résistance à la compression des pâtes de clinoptilolite durcies à 50 °C pendant 28 jours.....	35
Figure II.4. : Résultats des tests de résistance à la compression pour les différentes concentrations de KOH.....	36

Liste des tableaux

Tableau II.1 : l'effet de la concentration de NaOH sur la résistance à la compression des mortiers.....	30
Tableau II.2 : résistance à la compression de 3 à 28 jours des mélanges M1 et M15 soumis à différentes températures pendant 24h et 48h.....	31
Tableau III.1 : Les résultats des différents tests sur l'activation chimique de la pouzzolane obtenus par certains chercheurs.....	39

Liste d'abréviation

Abréviations et symboles

Notation et Abréviations

Al_2O_3	Alumine
CaCO_3	Carbone de calcium
CaO	Chaux
CaCl_2	Chlorure de calcium
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Chlorure de calcium hydraté
CEM	Ciment portland
CO_2	Dioxyde de carbone
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hydroxyde de calcium
NaOH	Hydroxyde Sodium
SF_6	Hexafluorure de soufre
HFC	Hydrocarbures fluorés
PFC	Hydrocarbures perfluorés
CH	Hydrate de silicate de calcium
C-S-H	Hydrate de silicate de calcium
KOH	Hydroxyde de potassium
H_2O	Eau
$3\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	Oxyde ferreux et ferriques
Fe_2O_3	Oxyde ferrique
Na_2O	Oxyde de sodium
Na_2SiO_3	Silicate de sodium
C_3S	Silicate tricalcique
SiO_2	silice
CaSO_4	Sulfate de calcium
Na_2SO_4	Sulfate de sodium
MOH	les alcalis caustiques

Abréviations et symboles**Notation et Abréviations**

$M_2O \cdot nAl_2O_3$

les aluminates

$M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6) SiO_2$

les aluminosilicates

$M_2CO_3, MSO_3, M_3PO_4, MF$

les sels d'acides faibles non silicatés

M_2SO_4

les sels d'acides forts non silicatés

$M_2O \cdot nSiO_2$

les silicates,

Introduction générale

Introduction générale

Introduction Générale

Le ciment est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde puisque chaque année l'industrie du ciment produit environ plus 1,6 milliard tonnes de ciment Portland. Plus de 5 à 8% des émissions mondiales de (CO_2) sont induite de cette production. Cependant l'impact environnemental ne se limite pas à l'émission de (CO_2) pour ces matériaux de construction mais la production de ciment ordinaire provoque également la libération de (SO_3) et les (NO_x) qui accentuent l'effet de serre et causent les pluies acides. En plus, les ciments Portlands exigent pour leurs fabrications la consommation considérables d'énergie surtout pour l'élaboration de clinker. Pour pallier à ces problèmes et réduire l'impact environnemental des industries du ciment, les recherches ont été orientées vers l'élaboration des nouveaux matériaux avec une empreinte environnementale réduite durant les phases de fabrication et d'exploitation [1].

L'émergence aux plans national et international des enjeux environnementaux du développement durable a mis notamment en lumière les quantités importantes d'émissions de (CO_2) engendrées par la fabrication du ciment Portland. Les émissions de gaz à effet de serre sont liées, d'une part, à la consommation énergétique du clinker et, d'autre part, à la décarbonatation du calcaire. L'industrie cimentière serait ainsi aujourd'hui responsable d'environ 5% des émissions de (CO_2) liées aux activités humaines [2].

Cette contribution négative sur l'environnement, relativement importante, et la forte demande mondiale en ciment ont amené plusieurs équipes de chercheurs à s'intéresser à des liants alternatifs, possédant une plus faible empreinte CO_2 . Le principe de fabrication de tels liants consiste notamment à diminuer la part de clinker en le remplaçant par des additions minérales [3]. Ces dernières constituées, de produits naturels (pouzzolane, filler,...) ou co-produits industriels (laitiers de haut fourneau et cendres volantes), sont ajoutées au

Introduction générale

clinker lors de la phase de broyage ou directement dans le malaxeur à béton en substitution d'une partie du ciment [4].

D'une part, l'emploi de certains ciments comme les CEM I s'avère très discutable du point de vue environnemental. En effet, la fabrication du clinker (95% en masse des CEM I) nécessite une grande quantité d'énergie et provoque un dégagement significatif de (CO_2) dans l'atmosphère. A titre d'exemple, la production d'une tonne de ciment génère le rejet d'une tonne de (CO_2) [2]. D'autre part, depuis le protocole Kyoto, l'augmentation du prix de l'énergie et l'apparition d'écotaxes obligent à appréhender autrement la composition des bétons, tout en maintenant le même niveau de performance [3].

Pour pallier à cette problématique environnementale et économique, une des solutions pouvant être envisagée est l'emploi d'addition minérale en substitution partielle du ciment. Le métakaolin issu de la calcination de l'argile kaolinite s'avère être l'une des solutions les plus avantageuses d'un point de vue économique (grande ressource et disponible facilement), et ayant un faible impact environnemental [3].

Les matériaux cimentaires supplémentaires apparaissent ainsi comme alternatifs au ciment ordinaire puisqu'ils garantissent une bonne propriété mécanique. Ce procédé a gagné un intérêt potentiel vu leur avantages multiples au niveau de la mise en œuvre ainsi que pour leurs application. En effet, les matériaux alternatifs sont utilisés soit sous forme naturelle (argile, zéolite, pouzzolane naturelle...), soit co-produit (tel que laitier, fumé de silice, cendre volante...), ou de produit de synthèse (géopolymère, zéolite synthétisées ...), à température ambiante ou légèrement élevée ($<100\text{ }^\circ\text{C}$) par l'activation alcaline d'une source d'aluminosilicate dérivés de minéraux naturels, d'argiles calcinées ou de sous-produits industriels.

Le défi commun des chercheurs est de produire un ciment de qualité, à coûts réduits et ayant un faible impact environnemental. Un moyen de réalisation de cet objectif est de s'orienter de plus en plus vers le développement de ciments avec pouzzolanes naturelles en substitution

Introduction générale

partielle du clinker. Ou même le développement de bétons avec des pouzzolanes naturelles en substitution partielle du ciment. Ces pouzzolanes doivent présenter une certaine activité chimique, appelée « activité pouzzolanique » [5].

Dans ce contexte, différents travaux ont été effectués par plusieurs chercheurs. L'analyse des travaux de la littérature a permis d'aboutir au fait que plusieurs paramètres peuvent être pris en considération, tel que la composition, la texture et la forme des particules du matériau ainsi que sa pouzzolanicité et la méthode d'activation adoptée.

Dans ce modeste travail, on visualise l'influence de la méthode d'activation chimique, ainsi que l'influence de type de l'activateur chimique utilisé et son dosage sur le comportement d'une pouzzolane naturelle.

Pour cette raison, ce mémoire s'articule autour de trois parties :

- La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique qui comprend des généralités sur les pouzzolanes et leurs caractéristiques ainsi que les méthodes d'activations.
- La deuxième partie consiste à une lecture approfondie et critique des références. Dans cette partie on va s'intéresser d'une manière profonde aux travaux déjà réalisés, un peu partout dans le monde. Il s'agit de souligner le problème qu'il traite, la solution qu'il propose et les résultats obtenus pour chaque travail.
- La troisième partie consiste à réaliser une synthèse des données bibliographiques en dressant un bilan des travaux réalisés, afin de tirer des conclusions et suggérer des recommandations.

Partie I
Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

Dans cette première partie nous avons donné quelques notions et définitions générales sur le matériau ciment avec un petit passage historique, les problèmes et solutions à l'impact environnemental sont aussi discutées, comme nous avons parlé des pouzzolanes naturelles, leurs caractéristiques et leurs activations.

I.2. Le ciment

Le ciment est un mélange constitué de calcaire et d'argile, chauffé à haute température (1450 °C) dans un four en forme de tube, avant d'être refroidi brutalement. La matière extraite du four est dite « le clinker ». Il est broyé avec du sulfate de calcium, sous forme de gypse ou d'anhydrite, à raison de 3 à 5 %, c'est la formule classique du ciment dit Portland [6].

Pour fabriquer du ciment, il faut réunir quatre éléments principaux selon des dosages préétablis : la chaux (65 %), la silice (20 %), l'alumine (10 %), l'oxyde de fer (5 %). L'élément prépondérant étant le calcaire ou la craie. Les cimenteries sont d'ailleurs implantées à proximité d'importants gisements de ces matières.

L'ensemble de ces éléments, appelé cru, est ensuite traité en installations procédant par voie humide ou par voie sèche, suivant la teneur en eau du calcaire ou de la craie.

Dans la voie humide, le cru est broyé et malaxé avec de l'eau pour constituer une pâte liquide qui est homogénéisée et stockée dans de grandes cuves cylindriques. Cette pâte est ensuite introduite dans la partie supérieure du four.

Dans la voie sèche, le cru est séché puis broyé. Il est ensuite homogénéisé dans de grands silos. Il est enfin introduit sous forme pulvérulente dans une tour de préchauffage où la décarbonatation se déroule partiellement, avant d'entrer dans le four proprement dit [7].

Le ciment est une matière première irremplaçable. Sa fabrication est une industrie de base qui occupe une position dominante et conserve un fort potentiel de

croissance. Cependant le processus de fabrication du ciment engendre des incidences environnementales comme les émissions des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O), hydrocarbures fluorés (HFC), hydrocarbures perfluorés (PFC), hexafluorure de soufre (SF₆) mais surtout les émissions de poussières à tous les niveaux de la production, dont la forte et longue concentration dans l'air provoque des maladies respiratoires [2, 8]. Toutefois ce processus ne cesse d'être amélioré avec des technologies nouvelles afin de réduire ces impacts sur l'environnement.

I.2.1-Problème lié à l'environnement :

Le béton utilisé comme matériau de construction pose des problèmes en termes de respect de l'environnement. Le gros de la consommation d'énergie due au béton provient d'activités consommatrices d'énergie qui entraînent une émission plus ou moins forte de (CO₂) [4] :

- l'acheminement (transport en camion du béton ou des matières premières)
- la confection (mazout ou autre combustible pour cuire la roche en ciment)
- la consommation électrique pour brasser mécaniquement de grandes quantités de bétons.

On s'intéresse essentiellement à la conception et l'utilisation. La fabrication du ciment se fait à partir du calcaire, composé du fameux carbonate de calcium et nécessite un chauffage à très haute température (1450 °C) qui engendre d'importantes émissions de (CO₂), dont la réaction chimique est la suivante [2] :

Carbonate de calcium (CaCO₃) → chaux (CaO) + dioxyde de carbone (CO₂)

La fabrication du ciment représente environ 7 à 8 % des émissions totales de CO₂ à l'échelle du globe terrestre. Chaque tonne de ciment produite requiert l'équivalent de 60 à 130 kg de fuel (ou son équivalent) et une moyenne de 210 kWh. Le ciment Portland représente 930 kg de (CO₂) émis par tonne de ciment produite.

D'après une étude menée par le world business council for sustainable development, l'industrie cimentière est responsable de 5% des émissions de gaz à effet de serre liées à l'activité humaine. Pour l'industrie du ciment ces émissions sont principalement de deux sortes émissions énergétiques et émissions de procédé :

- Les émissions énergétiques sont liées à la production de l'énergie thermique nécessaire à la fabrication du clinker.
- Les émissions de procédé sont dues au fait que le (CO_2) fait partie des produits de la réaction chimique qui transforme le carbonate de calcium en clinker (décarbonatation du carbonate de calcium).

A ces deux sources principales il faut ajouter les émissions dues au transport des matières premières et à la consommation d'électricité. D'après une étude publiée en juin 2009 par la WBCSD, la quantité moyenne mondiale de (CO_2) émise par tonne de clinker produit était, en 2006, de 866 kg CO_2/t [9].

D'après un rapport antérieur de la WBCSD en 2002 la répartition du (CO_2) émis lors de la production de clinker se fait comme indiqué sur la **Figure I-1** [10].

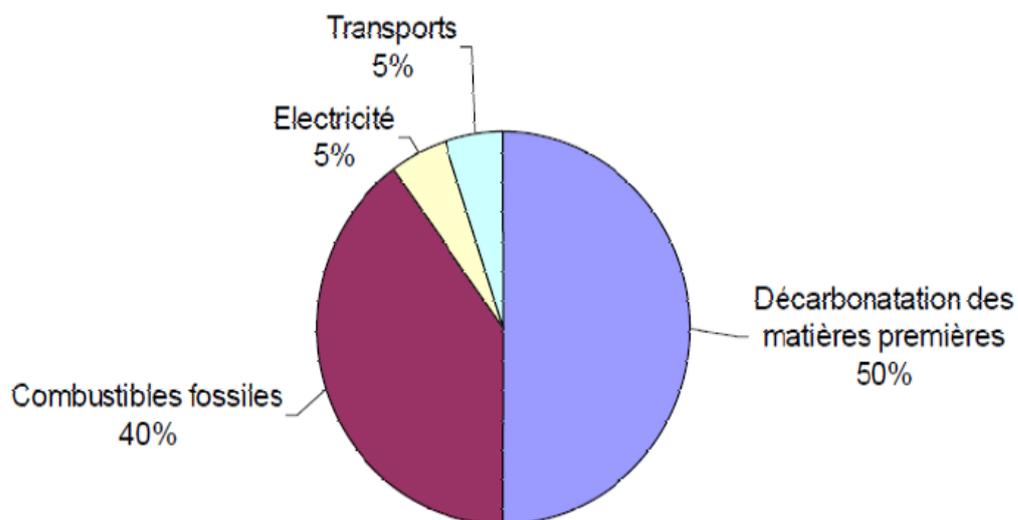


Figure I-1 : Répartition des émissions de (CO_2) selon leurs sources dans l'industrie cimentière [10].

De nos jours, les multiples objectifs qui visent à préserver notre environnement sont :

- La réduction des émissions de gaz à effet de serre.

- L'impact sur nos modes de développement futurs et donc en partie sur nos façons de construire.

I.2.2.Solution intervenant à l'impact environnemental

Les scientifiques et chercheurs dans le domaine du béton se mobilisent déjà depuis quelques années pour trouver des solutions plus durables pour la fabrication du béton [4].

- La première stratégie adoptée fut l'amélioration technologique des cimenteries mais cela représente un investissement coûteux et pas assez convainquant.
- La deuxième stratégie consiste à intervenir sur les compositions des matériaux dont deux stratégies se sont développées dans l'industrie cimentaire :
 - la première solution a pour objectif de réduire la quantité de béton fabriqué en produisant un béton de meilleure qualité. Ces bétons plus performants permettent ainsi de réduire le volume de matière nécessaire pour obtenir une résistance donnée.
 - La deuxième solution a pour objectif de développer des ciments dans lesquels une partie du clinker Portland est substituée par des additions minérales : fillers calcaires, ajouts pouzzolaniques (fumées de silice, cendres volantes, schistes calcinés) ou ajouts potentiellement hydrauliques (laitiers de haut-fourneau) : les différents types de ciment sont obtenus. En moyenne, ces ciments avec ajouts pourraient réduire les émissions mondiales dues au clinker d'environ 21 % [11].

Dans notre mémoire, on s'intéresse à la deuxième solution dont aujourd'hui, une grande partie des bétons utilisés dans la construction contiennent dans leur ciment une quantité plus ou moins importante de matériaux de substitution au clinker Portland. L'intérêt de cette substitution a tout d'abord un impact positif environnemental puisque ces additions nécessitent peu d'énergies pour être

produites et sont le plus souvent des sous-produits d'industries, on cite ci-après quelques catégories :

- Des déchets qui trouvent un nouvel emploi par exemple, les laitiers issus de hauts fourneaux ou les cendres volantes issues de la combustion de charbon. Certains des matériaux de substitution sont caractérisés par une teneur en calcium plus faible que le ciment Portland, ce qui implique une modification des hydrates formés, influant ainsi sur la résistance et la durabilité du matériau.
- D'autres composants alternatifs, ajoutés dans la composition du liant, permettent d'améliorer les propriétés de celui-ci et par conséquent d'augmenter la résistance en compression du béton.

1.2.3. Les ciments couramment utilisés

Il existe donc actuellement sur le marché différents ciments aux caractéristiques variables ; compositions multiples, différentes résistances et vitesse de prise...etc. Ainsi chaque ciment présente des caractéristiques précises et sont donc utilisés pour des usages variés et employés dans des domaines déterminés ; préfabrication ou coulage sur place, exigence de climat, milieu agressif...Etc. Pour chaque contexte, il est important de répondre avec le ciment qui est le plus approprié.

Voici les différentes catégories de ciments couramment utilisés qui ont recouru à différentes substitutions du clinker Portland : [12]

- Ciment avec ajouts cimentaires // CEM II/A ou B 32,5, 42,5 et 52,5 (a) : ciment le plus souvent utilisé pour la construction qui substitue 5 à 35 % de clinker Portland par des cendres, des laitiers ou des pouzzolanes.
- Ciment composé de fumées de silice // CPJ-CEM II/A (D) 52,5 (b) : ciment qui contient 10% de fumées de silice, en substitution au clinker Portland. Il est utilisé pour les bétons à hautes performances.

- Ciment avec laitiers de hauts fourneaux // CHF-CEM III/A, B et C 32,5, 42,5 et 52,5 (c) : ciment utilisé pour la construction qui substitue de 5% jusqu'à 95 % de clinker Portland par des laitiers de hauts fourneaux, résidus de l'industrie métallurgique.
- Ciment aux laitiers et aux cendres // CLC-CEM V/A 32,5 (d) : ciment utilisé pour les ouvrages en milieu sulfatés. Il remplace 18 à 30% de clinker Portland par des laitiers de hauts fourneaux et 18 à 30% du clinker par des cendres de silice ou de la pouzzolane naturelle.
- Ciment alumineux fondu // CA (e) : S'appelle aussi ciment d'aluminates de calcium. Il résulte de la cuisson jusqu'à fusion d'un mélange de calcaire et de bauxite.
- Le Premix BFUP (Béton Fibré à Ultra Haute performance) (f) : Béton composé de 700 à 1000 kg/m³ de ciment CEM I 52,5 avec une substitution de 2 à 30 % de clinker par de la fumée de silice.

Dans notre travail on, s'intéresse essentiellement à la valorisation des matériaux alternatifs tel que la Pouzzolane naturelle, qui fait actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car son utilisation apporte une amélioration sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires (mortier et béton). D'une manière générale, son utilisation fait réduire la consommation du clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement tels que [12] :

- La réduction de l'émission du (CO₂) des opérations de production du ciment.
- La maîtrise de l'impact environnemental des produits sur leur cycle de vie complet.
- Aussi, la disponibilité de la pouzzolane en grande quantité en Algérie.

I.2.4. Utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tout pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie. On peut citer, l'utilisation des ajouts actifs tels que le laitier d'El Hadjar par la cimenterie de Hamma Bouziane et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf par les cimenteries de Zahana et Béni-Saf. D'autres cimenteries utilisent des ajouts inertes tels que le calcaire comme ECDE (Entreprise des ciment et dérivé d'Ech chellif) de Chlef. La nouvelle cimenterie de M'sila utilise déjà un ciment ternaire avec la combinaison de la pouzzolane avec le calcaire [13].

I.3. Les pouzzolane

La pouzzolane comme une roche naturelle, constituée par des scories volcaniques, essentiellement composée de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde ferrique (Fe_2O_3).

La norme ASTM C 618-3[14] la décrit comme étant un matériau siliceux et alumineux qui ne possède par lui-même aucune valeur liante mais qui sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à des températures ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes.

Le terme pouzzolane fait référence à la ville de pouzzoles en Italie ou il a été découvert pour la première fois par les romains. Ces derniers ont observé que ces pouzzolanes naturelles ont des propriétés cimentaires et ont commencé à les utiliser pour faire des blocs de construction [15]. Les caractéristiques cimentaires sont connues sous les noms de propriétés pouzzolaniques qui dépend de la quantité de (SiO_2) réactif et d'(Al_2O_3) disponible dans l'aluminosilicate [15, 16].

Aujourd'hui cette dénomination s'étend et s'applique à un grand nombre de matériaux d'origine diverses, les matériaux Pouzzolaniques sont devisés en deux grandes catégories : les pouzzolanes naturelles et les pouzzolanes artificielles selon la classification donnée par l'organigramme de la figure I.1 [12].

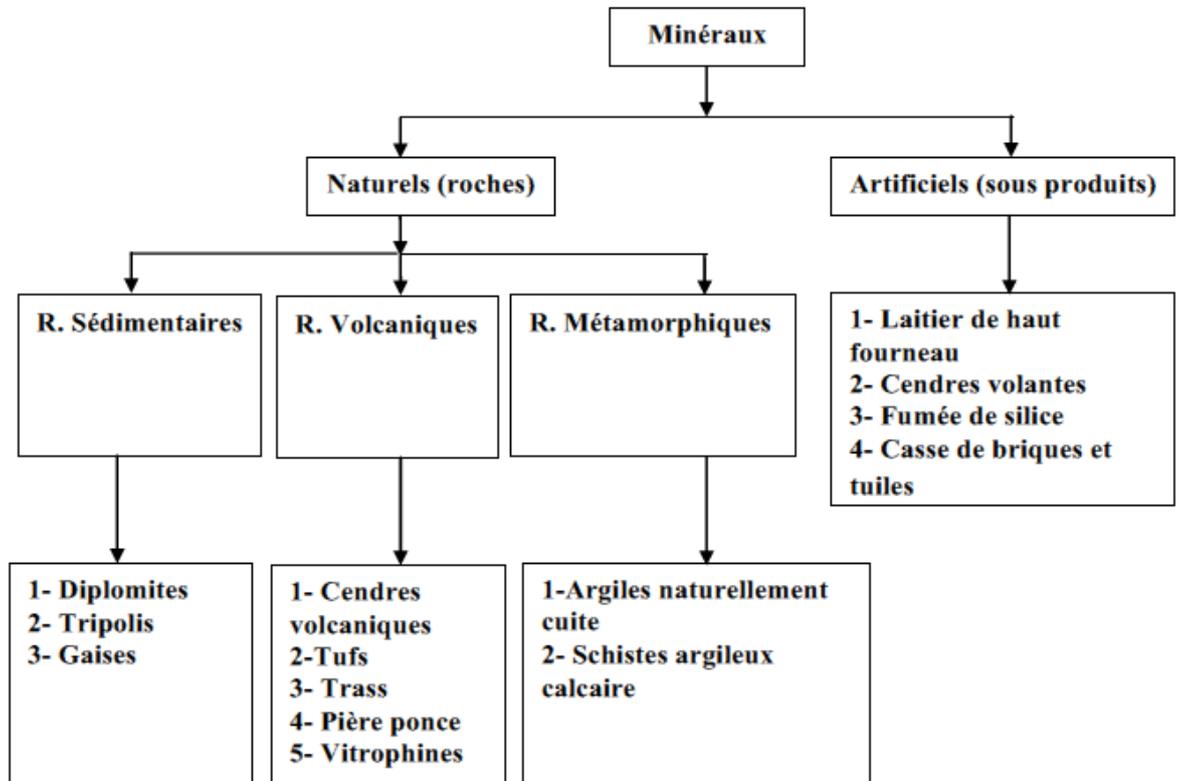


Figure I.2 : Origine des matériaux pouzzolanique selon M. Bessenois (2010)

[12].

I.3.1. La couleur des pouzzolanes

Les oxydes de fer peuvent être retenus comme "indicateur coloré" des pouzzolanes puis qu'ils sont susceptibles de donner d'utiles renseignements sur les degrés d'oxydation atteints dans les pouzzolanes rencontrées. Les analyses chimiques réalisées sur les pouzzolanes de provenances très différentes (France, Italie, Madagascar, Réunion, Martinique, Guadeloupe, Zaïre et Ruanda) tendent bien à montrer que la couleur dominante de celles-ci reste étroitement liée au rapport des pourcentages pondéraux des oxydes ferreux et ferriques (32OFeOFe) [17].

La coloration des matériaux ne révélait que des variations du degré d'oxydation du fer présent et ne pouvait donc pas affecter la partie silicatée. De ce

fait, le préjugé selon lequel les pouzzolanes noires présenteraient une qualité plus médiocre que celles des pouzzolanes rouges est actuellement dénué de tout fondement [18].

I.3.2. Types de pouzzolane

I.3.2.1. Pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle est un produit d'origine volcanique (verre volcanique, pierre ponce, zéolite....) ou sédimentaire (terre à diatomées, trass.....), composé essentiellement de silice, alumine et fer. Elle est formée d'une phase mal cristallisée, amorphe et de grande surface spécifique, qui réagit rapidement avec la chaux libérée pendant l'hydratation du ciment pour former de nouveaux cristaux de silices et d'aluminate de calcium hydraté qui participent au développement des résistances mécaniques et chimiques. Selon la norme ASTM C 18[19], la pouzzolane se définit comme étant un matériau siliceux et alumineux qui ne possède en lui-même aucune ou à peu près aucune valeur liante mais qui sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium, $(Ca(OH)_2)$ à des températures ordinaires pour former des composés possédant des propriétés liantes [18].

Avant la découverte du ciment Portland, on n'utilisait à l'échelle mondiale que des liants composés de pouzzolane et de chaux. Puis leur utilisation fut délaissée à cause de leurs faibles résistances et de la lenteur de leur prise. Toutefois grâce à ses avantages techniques, la pouzzolane naturelle est devenue très pratique dans la construction, en y substituant le ciment Portland [20].

Le ciment à la pouzzolane naturelle fut employé en Italie en 1910, seulement sa fabrication n'a pas été développée à cause de la baisse considérable de ses résistances mécaniques. Ainsi son utilisation s'est orientée uniquement vers les ouvrages maritimes. Après des progrès conséquents dans la maîtrise de son activité, le ciment à la pouzzolane devint normalisé dans le code italien en 1929 [21]. Aux USA, un ciment à la pouzzolane a été utilisé entre 1910 et 1912 pour la construction de l'aqueduc de Los Angeles. Dans les années trente, la California Division of High Ways s'est servi d'un ciment à la pouzzolane résistant aux sulfates pour la construction du Golden Gate à San Francisco. En 1935, un ciment Portland

à la pouzzolane a été mis en œuvre dans la construction du barrage de Bonneville sur le fleuve Columbia [21]. Aujourd'hui, plusieurs pays utilisent la pouzzolane naturelle dans l'industrie cimentaire tels que la Chine, l'Allemagne, la Grèce, la Turquie, le Mexique et l'Algérie.

I.3.2.2. Pouzzolane artificielle

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

Elles sont des déchets des différentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle, soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures à des températures modérées . On distingue aussi le schiste cuite, et les déchets de l'industrie à base de métakaolinite [22].

I.3.3. Effet de La pouzzolane

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

I.3.3.1. A l'état frais

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

I.3.3.2. A l'état durci

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

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types

d'agressions chimiques.

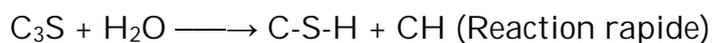
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces exposées du béton.
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces [22].

I.3.4. Réaction pouzzolanique

La réaction pouzzolanique signifie formation dans la réaction de liaison. Les propriétés de la pâte qui contient les produits de réaction sont indépendantes de la réactivité pouzzolanique. L'action pouzzolanique se caractérise donc par deux aspects distincts qui sont la quantité totale de chaux (Portlandite ou hydroxyde de calcium) qu'une pouzzolane est capable de fixer ; et la rapidité de fixation de la chaux par la pouzzolane (la réactivité de la pouzzolane), cette réaction est lente c'est-à-dire se manifeste après 28 jours.

Selon les différents auteurs les pouzzolanes naturelles contiennent environ 60 à 85% de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). En présence d'eau et de chaux, à des températures ordinaires, selon la norme ASTM C125-07[23], elles vont former des silicates de calcium hydratés, semblables à ceux produits par l'hydratation du silicate tricalcique (C_3S) composé principal du ciment Portland.

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



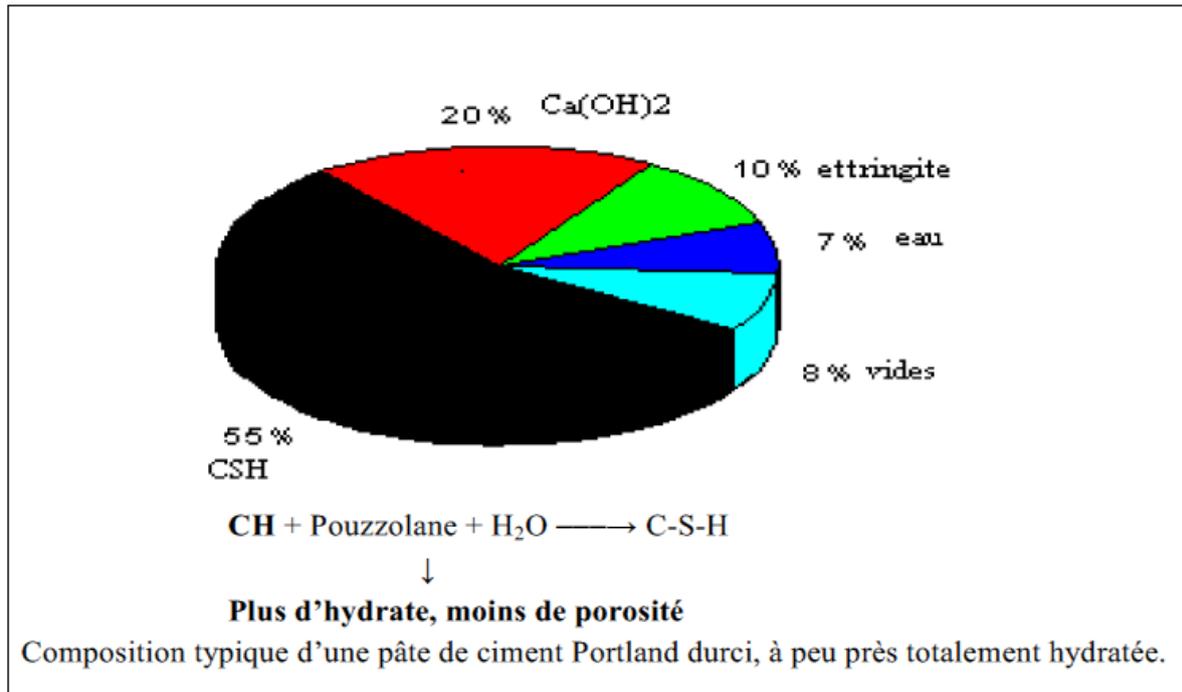


Figure.I.3.: les réactions d'hydratation du ciment et de la pouzzolane selon T. Harmathy et al (2003) [26]

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

- a) La réaction est lente, le dégagement de la chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- b) Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore la résistance du béton.
- c) Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains) [26].

I.3.5. Essais de pouzzolanicité et facteurs influençant

Compte tenu du fait que la réaction pouzzolanique consomme de l'hydroxyde de calcium, les méthodes chimiques généralement utilisées pour évaluer l'activité pouzzolanique d'un matériau consistent à déterminer la quantité de chaux fixée par ce matériau après un certain temps, ou à déterminer le taux de silice ou d'alumine (active) solubilisées par un traitement approprié.

D'une manière générale, les paramètres influençant les réactions pouzzolaniques sont la nature des phases actives et leurs proportions [27] :

- La teneur en (SiO_2) : dont son pourcentage varie d'une pouzzolane à une autre ce qui influe sur la réaction pouzzolanique.
- Le rapport chaux/pouzzolane dans le mélange, les quantités de chaux et de pouzzolane peuvent aussi être variées d'un mélange à un autre pour obtenir un rapport optimal qui donne de meilleurs résultats.
- La durée de cure : un paramètre qui peut aussi être influant sur la réaction pouzzolanique à court et à long terme vue sa variation dans le temps.
- La finesse de la pouzzolane : la finesse de la pouzzolane influe dans l'accélération de la réaction pouzzolanique, d'ailleurs plus la pouzzolane est fine plus l'activité pouzzolanique sera élevée.
- Le rapport E/C du mélange : la présence de l'eau joue un grand rôle dans la réaction pouzzolanique, son manque ou son excès peut interrompre ou même rendre impossible cette réaction
- La température : celle-ci peut accélérer ou même retarder la réaction pouzzolanique, cependant une température optimale l'améliore dans l'espace et dans le temps [28].

I.3.6. Optimisation de la pouzzolanité

De nombreuses études ont été effectuées pour chercher à optimiser l'activation des pouzzolanes naturelles par différentes méthodes qui sont illustrés dans la **Figure I-3** [28, 29].

- La calcination,
- Le traitement à l'acide,
- L'addition d'alcalins dans le ciment contenant de la pouzzolane,
- L'augmentation de la température de cure (préfabrication),
- Le broyage prolongé.

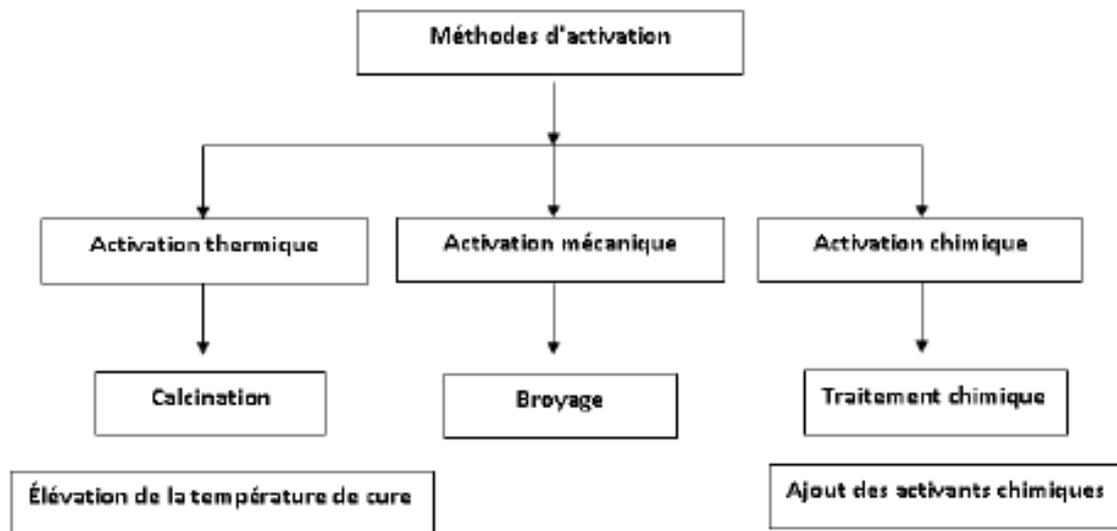


Figure I.4 : Les différentes méthodes d'activation selon C.Shi [29].

I.3.6.1. Activation thermique

I.3.6.1.1 Définition

L'activation thermique est une accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température [30]. Elle consiste à conserver le matériau dans une étuve à différentes températures de cure jusqu'à l'échéance souhaitée. L'activation thermique peut être utilisée pour un béton avec ou sans l'incorporation d'une addition.

I.3.6.1.2. La calcination

La calcination est une technique de préparation d'échantillon utilisée en chimie analytique qui permet de prendre en compte ce phénomène. Elle consiste à chauffer l'échantillon sous air à haute température (typiquement 500 à 1000°C) pour provoquer des réactions physiques et chimiques et mettre ainsi l'échantillon dans un état de référence. Pendant le chauffage, l'eau est perdue et un mélange de silice et d'alumine amorphes sera formé. Pour valoriser les argiles, comme substituant partiel du clinker, le traitement thermique appliqué doit assurer la déshydroxylation tout en :

- Éliminant toutes les matières organiques incompatibles avec le ciment.

□ Evitant la décarbonatation de la calcite néfaste pour la maniabilité des mortiers et bétons.

La calcination entre 550 et 800 °C des argiles permet le départ de l'eau de constitution (la déshydroxylation). La structure amorphe rend l'argile plus réactive que celle du départ à la chaux. Ce qui explique la forte diminution de la concentration en (CaO) de la solution. En présence de l'eau, la chaux réagit avec l'argile pour former des silicates, aluminates et aluminosilicates de calcium hydraté qui dépendent de la minéralogie des pouzzolanes et la solubilité des phases cristallines et non- cristallines[31].

a- Calcination flash :

La calcination flash, est une calcination très rapide de quelques dixièmes de secondes à deux secondes environ. Le four flash présente une chambre où un grand volume d'air circule. Le flux tourne à grande vitesse et maintient les particules en suspension, dans la partie du four où la transformation thermique est souhaitée. A la fin, les particules retombent et refroidissent très rapidement. Dans leur travail San Nicolas et alexpliquent le fonctionnement d'un four flash d'un producteur de Métakaolin [32]. Au cours de la première étape, un courant d'air chaud ascendant prend l'argile séchée sur un tamis de 200 µm, d'où il est introduit dans le four de calcination. Les particules d'argile tournent autour de la flamme (qui a une température comprise entre 1000 et 1200 °C), quelques dixièmes de seconde, assez de temps pour atteindre 700 °C, avant d'être envoyé aux cyclones de refroidissement rapide à 100 °C.

Bien que la cinétique de nombreuses transformations physiques et chimiques à l'intérieur d'un solide à haute température sont assez rapides, les conditions flash peuvent engendrées des transformations incomplète, à cause du refroidissement brusque et la gelée de la cinétique de changement [33]. La forme de la matière introduite et généralement pulvérulente en suspension dans un gaz, alors que les fours rotatifs, la matière ou le solide est sous forme de boulet.

b- Calcination lente :

Dans la calcination lente industrielle, la déshydroxylation est complète après avoir mené lentement l'échantillon à une température suffisamment haute (entre 600°C et 1100°C) pendant un degré suffisamment long (une voir plusieurs heures).

I.3.6.1.3-Augmentation de la température de cure

Une augmentation de la température au jeune âge du béton peut être causée par la chaleur d'hydratation dans le cas d'éléments massifs ou par l'application d'un traitement thermique dans l'industrie de la préfabrication. Le traitement thermique consiste à augmenter la température de cure de séchage via des étuves ou des bâches en polyane ou en plastique. Afin de mieux assimiler cette technique on s'est fixé à des chercheurs qui ont prouvé qu'au-dessous de 40°C les résistances à la compression obtenues sont faibles car la réaction pouzzolanique s'est déroulée partiellement [29]. Pour que celle-ci soit complète, il faut que la température de cure de séchage soit supérieure ou égale à 40 °C [34].

I.3.6.2. Activation mécanique

Le broyage prolongé :

L'activation mécanique consiste à augmenter la finesse (surface spécifique) des matériaux par broyage. Le broyage a pour but de réduire les éléments en une poudre suffisamment fine afin de rendre la matière plus réactive (plus la surface spécifique est élevée, plus la réactivité chimique est importante)

La condition de broyage, par exemples les paramètres dynamiques permettent de caractériser les chocs, la température du milieu du broyage et la pression de l'atmosphère de broyage. Ces paramètres ne peuvent pas être contrôlés en permanence de façon précise et ne peuvent pas par conséquent être juste en temps réel pour optimiser les différentes étapes de la synthèse par voie mécanique [35].

I.3.6.3. Activation chimique :

L'activation chimique est l'addition de substances chimiques sous forme de solutions liquides ou sous forme de poudre à un matériau riche en silice et/ou en alumine en vue de le rendre pouzzolanique. Ce traitement permet de détruire ou d'activer la structure des minéraux par des réactions chimiques entre ces derniers et l'activateur additionné [35].

D'après C. Shi et R. Day (1999) [34], les activateurs chimiques peuvent être ajoutés pendant le broyage de la pouzzolane naturelle ou pendant le mélange du béton contenant une pouzzolane, de sorte que l'exigence d'équipement supplémentaire est minimale contrairement à l'activation mécanique et thermique qui nécessite plus d'équipements et d'énergie. Bien que l'activation chimique nécessite un apport en produits chimiques elle est la méthode la moins coûteuse, la plus efficace et réalisable pour l'activation des pouzzolanes naturelles.

D'autres études ont montré que l'utilisation d'activateurs chimiques (CaCl_2 , NaCl , Na_2SO_4) au sein d'un mélange pouzzolane – chaux permet d'améliorer la cinétique des réactions pouzzolaniques [36].

I.3.6.4. Activation par les alcalins

Au cours de la dernière décennie, le mécanisme d'activation par des alcalins a été largement étudié. Cependant, certaines incertitudes persistent dans la compréhension du processus d'activation. Afin d'améliorer le processus d'activation par un alcalin, certaines propriétés d'une pâte de ciment obtenue par l'hydratation du ciment portland ordinaire avec certaines solutions fortement alcalines ont été étudiées. Martinez-Ramirez et Palomo ont défini l'activation alcaline comme un processus chimique où la structure amorphe est transformée en une structure squelettique qui présente des propriétés cimentaires. Un gel polymérique à composition variable est formé dans les milieux de forte alcalinité. Le gel est produit lorsque la solution d'alcalinité élevée réagit avec les matériaux de départ. Le comportement principal des produits formés dans ces conditions est d'avoir des propriétés mécaniques à la première période d'hydratation [37].

Selon Palomo et ses collègues, comme le métakaolin est activé dans des milieux de haute alcalinité en présence de $(Ca(OH)_2)$, il produira de l'aluminosilicate de sodium qui a une structure morphique avec des caractéristiques similaires au gel géopolymérique. Le produit formé est similaire au produit obtenu une fois que le métakaolin est activé en l'absence de $(Ca(OH)_2)$ et il s'est avéré que le produit secondaire qui est également connu sous le nom de C-S-H est formé. Soumettre le métakaolin à l'activation alcaline est un moyen de produire des matériaux cimentaires à haute résistance. Ce qui traduit l'influence des alcalins sur la réactivité pouzzolanique [38].

L'activation alcaline a été abondamment étudiée. Les activateurs alcalins se déclinent principalement en six groupes, où M est un alcalin [39] :

1. les alcalis caustiques MOH.
2. les sels d'acides faibles non silicatés, M_2CO_3 , MSO_3 , M_3PO_4 , MF, etc
3. les silicates, $M_2O.NSiO_2$.
4. les aluminates, $M_2O.NAl_2O_3$.
5. les aluminosilicates, $M_2O.Al_2O_3.(2-6) SiO_2$.
6. les sels d'acides forts non silicatés M_2SO_4 .

D'après C. Shi, P. Krivenko et D. Roy (2006) [40], les propriétés des activateurs qui contiennent du sodium et du potassium sont très similaires, mais contrairement aux produits à base de potassium, les activateurs NaOH, (Na_2CO_3 , $Na_2O.nSiO_2$ et Na_2SO_4) sont les plus largement disponibles et commercialisés.

Les activateurs ne sont pas de simples catalyseurs permettant le déroulement des réactions mais également des réactifs entrant dans les réactions de la formation des hydrates [41]. Leur rôle est triple :

- Accélérer la solubilité des composants de la pouzzolane,
- Favoriser la formation de quelques hydrates,
- Favoriser la formation du réseau de la structure des hydrates.

I.3.6.5. activation par les sulfates

Dans l'activation sulfatique, 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. L'ettringite (un composé de sulfate de calcium et d'aluminium hydraté) ne mobilise qu'une partie seulement de l'alumine : il se forme également de l'hydroxyde d'aluminium et du silicate de calcium hydraté.

L'introduction d'un activateur sulfatique accélère la réduction de $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ dans le système cimentaire des cendres volantes au début de l'étape d'hydratation [42].

Shi et Day(1993) [37] ont utilisé diverses doses de (CaSO_4) comme activateur pour étudier son effet sur le développement de la résistance des pâtes de ciment de chaux-pouzzolane. Ils ont constaté que la résistance mécanique était la plus élevée avec l'ajout de 6% de (CaSO_4) . Bien qu'à des âges ultérieurs d'hydratation, la résistance des pâtes augmente avec une addition de 6% de (CaSO_4) , cependant, son effet est plus faible que les pâtes activées avec l'addition de 4% de (CaCl_2) .

I.3.7. Comparaison entre les différents types d'activation

Une comparaison entre les différentes méthodes d'activation des pouzzolanes indique que l'activation chimique a des avantages, un faible coût énergétique notamment. En effet, une série d'études montre que l'ajout d'un activant peut augmenter la réactivité des pouzzolanes [43] en tant que processus de production simple des matériaux cimentaires, par rapport aux activations mécanique et thermique qui ont besoin d'équipements supplémentaires, consomment beaucoup d'énergie et augmentent ainsi les coûts [43]. Les activants chimiques peuvent être ajoutés au cours du broyage de la pouzzolane ou du ciment, ou ajoutés pendant le malaxage dans l'eau de gâchage ou mélangés directement avec le liant [40]. Ainsi, l'activation chimique n'a pas besoin de changement significatif sur la ligne de production, et elle peut être facilement acceptée par l'industrie du ciment et du béton [29].

De plus, l'activation thermique n'est pas possible pour tous les types de bétons. Elle est utilisée en préfabrication, où les moyens d'étuvage existent déjà. Pour les bétons prêts à l'emploi, l'activation mécanique est adaptée. Cependant, cette méthode a ses limites. En effet, pour une addition comme le métakaolin qui est déjà très fin, augmenter encore sa finesse entraînerait une demande en eau importante ainsi que des coûts importants et la complexité de l'opération.

C'est pour ces raisons que l'on pense que l'activation chimique serait la solution la plus adaptée pour augmenter la réactivité du métakaolin dans la matrice cimentaire.

En termes de résistances, Qian et al 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 [47]. Concernant le laitier, même si l'activation chimique n'est pas la plus performante, on peut penser que l'indice d'activité (résistance relative par rapport à la résistance de référence) plus élevé du métakaolin permettra d'obtenir des niveaux de résistance intéressants lorsqu'un activant sera utilisé par rapport au témoin.

En revenant aux laitiers C. Shi et al (1993) [37], soulèvent une réalité importante : on ne peut pas utiliser tous les types d'activants pour activer tous les types de laitiers. De plus, pour obtenir une meilleure performance avec l'activation chimique, de nombreux tests et de nombreux matériaux sont nécessaires pour déterminer les meilleurs activant.

I .3.8.Evaluation de la réactivité pouzzolanique

Vicat (Lea 1938) a proposé la première méthode pour l'évaluation de la réactivité des pouzzolanes qui consiste sur des tests d'absorption de la chaux[44].De nombreuses méthodes ont été développées pour évaluer la réactivité pouzzolanique [46, 47, 48].

Parmi ces méthodes l'absorption de la chaux, la solubilité d'une pouzzolane ou le changement de conductivité électrique d'une solution. La performance d'une pate durcie ne dépend pas seulement de la vitesse et du degré de la réaction, mais aussi de la nature des produits de réaction. Par exemple, la présence du réactif(Al_2O_3) dans les scories peut augmenter la résistance initiale du ciment de laitier, mais

diminue la résistance ultérieure du ciment. Les normes de performances deviennent plus importantes parce que des matériaux et des combinaisons de matériaux sont utilisés pour obtenir des produits.

Dans la pratique, les gens s'intéressent principalement aux performances des matériaux utilisés. Malquoria suggère qu'une évaluation de matériaux pouzzolaniques après ajout au ciment doit se baser sur deux facteurs [49] :

- La résistance mécanique des mortiers et béton fabriqués avec un ciment portland mélangé à la de pouzzolane.
- La réduction de l'hydroxyde de calcium libre dans le ciment pouzzolanique durci.

Takemoto et Uchikawa ont également déclaré que la qualité des produits naturels ou artificiels des ciments pouzzolaniques doit être évaluée en fonction de leurs tests de résistance [50]. De nombreuses normes utilisent désormais la résistance des mortiers à la compression ou à la traction, les mortiers sont préparés avec un rapport pouzzolane/chaux, et durci dans des conditions étroitement contrôlées.

I.4 -Conclusion

Les recherches qui sont présentées lors de cette étude bibliographique, notamment sur le plan théorique, nous montrent que le procédé de fabrication du ciment portland nécessite une énergie importante et dégage du (CO_2) qui pollue l'atmosphère, d'où le recours à l'utilisation des ajouts cimentaires comme remède à ces problèmes et permet ainsi de :

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

L'objectif de cette synthèse bibliographique est de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur l'action des additions dans les matériaux cimentaires afin d'éclaircir en particulier comment elles contribuent à l'activité pouzzolanique. Notre recherche bibliographique s'appuie sur les études

les plus récentes dans le domaine d'activation de ciments.

Partie II

*Lecture approfondie et
critique des références*

II.1.Introduction

Les pouzzolanes réagissent avec la chaux en présence de l'eau pour former des produits d'hydratation insolubles et se composent principalement de silice et d'alumine [51]. Ils peuvent également subir des réactions pouzzolanique en cas de mélange avec des matériaux libérant de la chaux pendant l'hydratation comme le ciment portland ordinaire [50]. Le remplacement partiel du ciment portland ordinaire par la pouzzolane naturelle dans le béton peut diminuer la porosité et la sorptivité, entraînant une amélioration de la durabilité à long terme [52].

Il est reconnu depuis longtemps que les matériaux pouzzolaniques ont été utilisés avec succès dans de nombreux pays, en trouvant de nouvelles manières de produire du béton à haute résistance. Ce qui a incité les chercheurs et les industriels de nos jours à accorder une grande importance à leur utilisation comme matériaux alternatifs dans l'élaboration des matériaux cimentaires [53].

Cependant, ces matériaux doivent avoir une grande surface spécifique et contenant une teneur élevée en silice amorphe afin de générer une réactivité pouzzolanique [54].

Diverses pouzzolanes chimiquement activées ont été utilisées comme matériaux supplémentaires au ciment afin de produire un béton très durable et de haute performance. On cite à titre d'exemples les fumées de silice, le métakaolin, les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau et les cendres de balle de riz.

Différentes techniques ont été utilisées afin d'activer la pouzzolane y compris la calcination, le broyage prolongé, le durcissement à températures élevées et l'ajout des activateurs chimiques, afin d'améliorer la résistance mécanique des pâtes de ciment et béton. Cependant, dans des travaux publiés antérieurement, il a été constaté que la résistance du ciment chaux pouzzolane a augmenté de manière significative grâce à des activateurs ajoutés. Cette technique s'est également avérée être plus efficace que le broyage prolongé ou le durcissement dans des ambiances à températures élevées [55].

Partie II : Lecture approfondie et critique des références

Dans cette partie on va s'intéresser particulièrement aux techniques d'activations chimiques réalisées par plusieurs auteurs.

II.2. Les travaux réalisés dans la littérature

Les pouzzolanes sont largement utilisées comme remplacement partiel du ciment dans la production de béton de ciment portland, vu que leurs utilisations induit des couts réduits et une meilleure durabilité, mais les bétons obtenus nécessitent un temps de prise plus long et un développement de la résistance au jeune âge plus long.

Différentes méthodes ont été développées pour pallier à ces inconvénients et améliorer la réactivité des pouzzolanes naturelles, il existe trois techniques d'amélioration de la réactivité pouzzolanique, on distingue la méthode mécanique, la méthode thermique et la méthode chimique.

L'utilisation de la méthode chimique qui consiste à ajouter un agent chimique à la pouzzolane afin d'améliorer sa réactivité pouzzolanique. La réactivité pouzzolanique a reçu une attention considérable ces dernières années. L'effet de l'utilisation de différents activateurs chimiques sur l'activité pouzzolanique d'une pouzzolane est résumé par des essais de travaux publiés précédemment. Il a été constaté que des activateurs chimiques appropriés peuvent être incorporés dans les bétons contenant des pouzzolanes, ce qui peut augmenter la vitesse de la réaction pouzzolanique et la résistance à la compression de manière significative, E. Alcantara (2000) [56].

II.3. Méthode d'activation chimique

Il résulte que le traitement des pouzzolanes avec une solution d'acide est efficace et augmente considérablement la réactivité d'une pouzzolane. D'une part le degré d'activation constaté dépend de la concentration de l'acide (essai réalisé par Alexander en 1955b) [57]. L'activation atteint son maximum lorsque la concentration avoisine les 10% dans le cas de l'acide chlorhydrique en présence d'une pouzzolane à faible teneur en calcium. D'autre part pour le cas d'une

Partie II : Lecture approfondie et critique des références

pouzzolane riche en calcium ce dernier est dissous en présence de l'acide induisant ainsi une faible réactivité pouzzolanique [58, 59].

Au-delà des 10 min de la période utilisées, les processus de traitement à l'acide étaient plus efficaces que le broyage prolongé ou l'addition de l'hydroxyde de sodium (NaOH).

Martinez-Ramirez et palomo (2001) [60] ont défini l'activation par les alcalins comme un processus chimique où la structure amorphe se transforme en une structure squelettique qui présente des propriétés cimentaires. Dans un milieu de haute alcalinité, un gel polymère avec une composition variable est formé. Ce gel est produit lorsque la solution de haute alcalinité réagit avec les matières premières.

Le traitement acide ne peut qu'augmenter la réactivité pouzzolanique à faible et forte teneur en calcium. Le calcium est dissous et sa réactivité pouzzolanique est réduite [58, 59], sachant que le traitement acide n'est pas pratique car il est trop cher et trop dangereux pendant la manipulation.

Alexander (1955a) [61] a constaté que l'ajout de l'hydroxyde de sodium (NaOH) augmente la résistance initiale des mélanges chaux-pouzzolane et ciment portland-pouzzolane et augmente considérablement la résistance à long terme. Par contre l'ajout d'alcali au ciment portland entraîne une réduction de la résistance après 3 ou 7 jours, car l'hydratation et la morphologie des produits d'hydratation sont changés en raison de la présence d'alcalis [62, 63, 64].

L'ajout de 1 à 3% de gypse, aux ciments de chaux-pouzzolane favorisent parfois le développement de la résistance, mais l'effet est erratique et ne peut être prédit [65]. Plus tard, Larew (1976) [66] a constaté que si 6,7% de chaux était remplacée par le gypse dans un mélange contenant 80% de pouzzolane + 20% de la chaux, la résistance du mélange a été sensiblement augmentée, et les spécimens durcis à 49°C ont montré une augmentation comparée aux échantillons traités à 10°C.

Bhardwaj et ses collaborateurs (1980) [67] ont observé que l'ajout de chlorure de calcium (CaCl_2) pouvait également augmenter la résistance des ciments

Partie II : Lecture approfondie et critique des références

portland à base de pouzzolane chimiquement activé. Lors des essais réalisés, ils ont remarqué une nette amélioration de la résistance du ciment portland comparé au mélange sans l'ajout de $(CaCl_2)$, qui a augmenté de 50%.

Mal et ces collaborateurs (1995) [68] ont signalé qu'un matériau supplémentaire est nécessaire pour améliorer le processus d'hydratation des cendres avec la chaux, ils ont rapporté que lorsque la chaux est mélangée avec les cendres volantes, la résistance mécanique obtenue au jeune âge est réduite. Ils ont signalé qu'en présence de l'hydroxyde de calcium $(Ca(OH)_2)$, le dioxyde de silicium ou la silice (SiO_2) amorphe dans les cendres volantes, ont tendance à se dissocier beaucoup plus facilement [69, 70].

Dans une étude menée par cheng et chiu (2003) [71], sur l'effet de la pouzzolane naturelle, qui a été traitée chimiquement avec une solution d'hydroxyde de sodium $(NaOH)$ comme alcaline, le mélange obtenu a été soumis à des conditions de durcissement standard sans utilisation de température élevée avec des concentrations de $(NaOH)$ différentes (2,5% ; 5% ; 7,5% ; 10%) et un rapport solution/liant de 0,50 ; 0,54 et 0,58. Ils ont constaté que la résistance à la compression augmente avec le temps de durcissement de 7 à 28 jours, par contre il est démontré par ces essais que le rapport solution/liant influe sur la résistance à la compression qui diminue lorsque celui-ci augmente. (Les résultats obtenus sont montrés dans le tableau II.1).

Partie II : Lecture approfondie et critique des références

Tableau II.1 : l'effet de la concentration de NaOH sur la résistance à la compression des mortiers. cheng et chiu (2003) [71].

S/L Concentration de NaOH (M)		Résistance à la compression (MPa)	
		7 jours	28 jours
0.50	2.5	2.8	3.8
	5	3.2	5.3
	7.5	3.2	5.6
	10	3.8	5.6
0.54	2.5	3.4	5.1
	5	2.2	3.6
	7.5	2.9	4.8
	10	2.7	4.4
0.58	2.5	2.0	2.9
	5	1.6	3.0
	7.5	1.5	3.0
	10	1.6	3.6

Par contre Tchakoute (2013) [72] et ces collaborateurs ont étudié l'effet de la température sur le durcissement de deux cendres volcanique camerounaises provenant de djoungo et galim nommés respectivement ZD et ZG [72]. Les cendres ont été traité chimiquement par une solution alcaline avec un rapport molaire

Partie II : Lecture approfondie et critique des références

$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ (silice / oxyde de sodium) de 0,7, 0,9, 1,1, 1,3 et 1,4 ont été préparés avec de l'hydroxyde de sodium (12% NaOH) et du silicate de sodium (Na_2SiO_3) (28,7% SiO_2 8,9% Na_2O). Le rapport de masse pour ZG a été maintenu constant à 0,49 et pour ZD à 0,37. Cependant, il a été constaté qu'avec l'augmentation de la température de durcissement (27°C, 40°C et 60°C) l'absorption d'eau augmente de 8,7% à 11,4%, la porosité apparente est passée de 17,5% à 19,8%, tandis que la densité apparente est passée respectivement de 2105,6kg/m à 1798,5 kg/m³ pour les échantillons camerounais à base de cendres volcaniques à 28 jours. [73].

Tant dis que Haddad (2016) [74] a suivi l'effet de la pouzzolane naturelle jordanienne, activée par un mélange de solution de silicate de sodium et d'hydroxyde de sodium. Des solutions d'hydroxyde de sodium de densité variable ont été préparées en résolvant les flocons ou les granulés par l'eau. Une solution de silicate de sodium ayant une densité de 1,53 g/cc a été utilisée avec une solution d'hydroxyde de sodium afin de produire l'activateur alcalin. Les proportions des composants de la solution de sodium de silicate (en poids), à savoir (Na_2O), (SiO_2) et eau étaient de 11%, 29% et 60%, respectivement. Dix-sept mélanges ont été soumis à un durcissement à sec à température ambiante pour une durée totale de 7 à 28 jours. Il a été constaté pour les deux mélanges M1 et M15 ayant une concentration de des solutions de sodium de silicate respectivement de 103 (Kg/m³) et 132 (Kg/m³) ont donnés des résistances à la compression à 28 jours de 22,4MPa et 24,1MPa.

Des échantillons de M1 et M15 ont été durcis a des températures de 40°C, 80°C et 120°C par étuvage pendant 24h à 48h et refroidis a l'intérieurs du four pendant 5h avant de les testés ultérieurement à l'âge de 3, 7 et 28 jours. Les résultats sont illustrés dans le tableau suivant.

Partie II : Lecture approfondie et critique des références

Tableau II.2 : résistance à la compression de 3 à 28 jours des mélanges M1 et M15 soumis à différentes températures pendant 24h et 48h, Haddad (2016) [74].

Mixture	Curing	CT (°C)	Mechanical properties (MPa)		
			CS (MPa)		
	DCP (days)		3 days	7 days	28 days
1	1	40	17.2	19.7	23.6
		80	21.5	24.6	27.5
		120	20.5	22.7	23.3
	2	40	19.5	22.9	25.3
		80	22.3	25	28.2
		120	17.7	20.1	22.1
15	1	40	22.1	25.3	29.4
		80	23.4	27.8	30.8
		120	19	21.5	24.1
	2	40	23.3	27.1	30.1
		80	24.1	29	31.9
		120	17	19.6	22.1

Les résultats obtenus sont les suivants :

- La résistance à la compression pour les éprouvettes étuvées à 48h a augmenté par rapport à celle étuvé à 24h pour les deux températures 40°C et 80°C, par contre elle diminue à la température de 120°C.
- La résistance à la compression à 28 jours a augmenté par rapport à l'augmentation de la concentration en silicate de sodium (103 à 132 Kg/m³).
- La température d'étuvage à 80°C pendant 48h a donné un résultat optimal de la résistance pour les deux concentrations respectivement de 28,2 à 31,9 MPa.

Shi et Day (1993) [75] ont mené un travail approfondi sur l'activation chimique de la pouzzolane. Ils ont examiné l'activité pouzzolanique des cendres volantes à faible et forte teneur en calcium, mélangé à de la chaux hydratée. Pour cela, trois lots de spécimens ont été mélangé :

- Lot témoins sans activateurs.

Partie II : Lecture approfondie et critique des références

- Lot activé par du sulfate de sodium (Na_2SO_4) (4% sur la base de la masse du mélange des cendres volantes).
- Lot activé par du chlorure de calcium dihydraté $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (4% sur la base de la masse du mélange des cendres volantes), qui ont été effectués à température atteignant les 50°C .

Les effets des activateurs sur la résistance des pâtes de chaux cendres à la chaux faible ou forte teneur en calcium sont illustrés respectivement dans les figures II.1 et II.2.

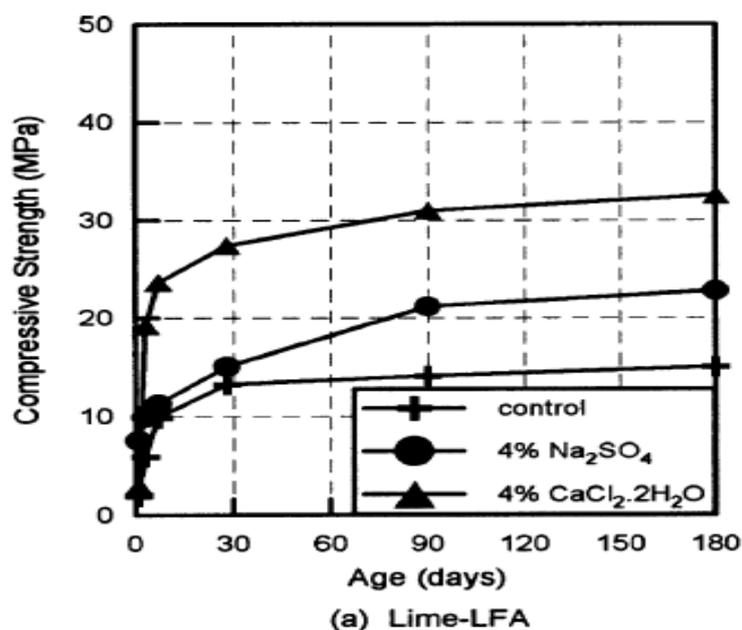


Figure II.1 : Effet des activateurs chimique sur la résistance des pâtes de la chaux-cendre volantes à faible teneur en calcium en fonction du temps, Shi et Day (1993) [75].

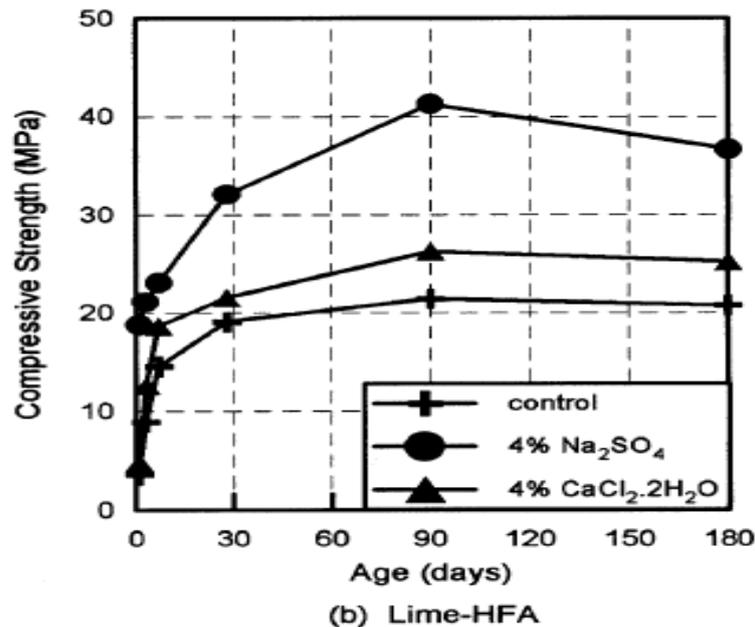


Figure II.2 : Effet des activateurs chimiques sur la résistance des pâtes de chaux-cendres volantes à forte teneur en calcium en fonction du temps, Shi et Day (1993) [75].

D'après les résultats obtenus, l'effet de (Na_2SO_4) sur les pâtes activées était environ 50% plus élevées que celles des pâtes témoins à 90 jours. La résistance au premier jour des pâtes activées au chlorure de calcium (CaCl_2) était similaire à celle des pâtes témoins. Le taux de gain de résistance des pâtes activées au (CaCl_2) a considérablement augmenté par la suite, et la résistance est généralement environ deux fois plus supérieure à celle des pâtes témoins. Ils ont constaté que la pâte activée par le chlorure de calcium a atteint une résistance importante de 30MPa pour les pâtes contenant les cendres à faible teneur en calcium, et 42MPa pour les pâtes contenant les cendres à forte teneur en calcium. Quant au lot activé par le sulfate de sodium. La pâte de chaux-cendres à faibles ou forte teneur en calcium a atteint une résistance de 25MPa.

Palomo et ses collaborateurs (1999b) [76] ont conclu qu'il existe deux modèles d'activation alcalines basés sur la condition de la situation de départ. Le premier modèle est l'activation du laitier de haut fourneau (Si + Ca) avec une solution alcaline, et le deuxième modèle est l'activation de métakaolin (Si + Al) avec une solution alcaline d'alcalinité assez élevée. Cependant la quantité d'additif

Partie II : Lecture approfondie et critique des références

utilisé doit être limitée. L'ajout d'alcali en excès entraîne une dégradation de la pâte de ciment [77]. La teneur en silice réactive SiO_2 (dioxyde de silicium) en phase amorphe et le calcium sont parmi les plus importants paramètres de réactivité [78].

Granizo et Blanco (1997) [79] ont déclaré qu'une structure de réseau d'aluminosilicate peut être produit par un mélange de métakaolin avec certaines quantités d'hydroxyde de sodium (NaOH)-(la concentration allant de 7 à 12 %) puis durci à des températures en dessous de 100°C .

Selon alonso et palomo (2001) [80], comme le métakaolin est activé dans des milieux à forte alcalinité en présence d'hydroxyde de sodium (Ca(OH)_2), afin d'accélérer la réactivité des activateurs ont été ajouté tels que $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et (NaCl), il produira du sodium aluminosilicate qui a une structure amorphe avec caractéristiques similaires au gel géopolymère. Le produit formé est similaire à celui obtenu une fois le métakaolin est activé en absence de Ca(OH)_2 , Il a été constaté que le produit secondaire, également appelé C-S-H, est formé.

Soumettre le métakaolin à une activation alcaline est un moyen de produire des matériaux cimentaires à haute résistance [80]. Alcantara et ses collaborateurs (2000) [81] ont examiné et comparé l'effet de l'addition de Ca(OH)_2 avec différentes concentration sur la résistance à la compression d'une clinoptilolite de granulométrie inférieur à 150μ à d'autres pouzzolane chimiquement activées par des alcalins. Les mélanges ont été durcis à une température constante de 50°C pendant 28 jours.

Les résultats sont représentés graphiquement sur la figure II.3

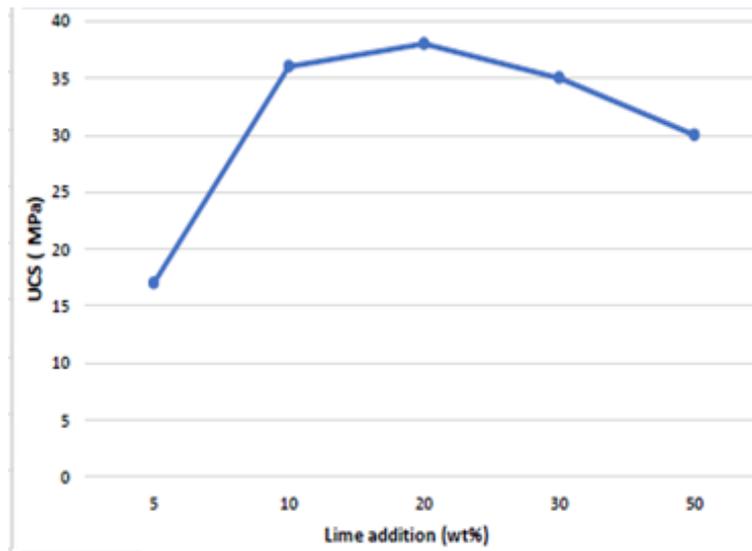


Figure II.3 : Effet de l'addition de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sur la résistance à la compression des pâtes de clinoptilolite durcies à 50 °C pendant 28 jours, E. Alcatara (2000) [81].

L'augmentation du $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ de 5% à 10%, induit une augmentation de la résistance à la compression moyenne de 18,8 à 37,1 MPa. La valeur de la résistance la plus élevée est de 38,7 MPa a été atteinte à 20% de $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$. Au-delà de la concentration de 20% de $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ la résistance à la compression diminue progressivement.

Dans une étude de laboratoire élaboré par Cheng et Chiu (2003) [82], il a été démontré qu'une substitution massique du ciment Portland par un mélange de métakaolinite et l'hydroxyde de potassium (KOH) à concentration différentes [5%, 10% et 15%], le ciment a développé une excellente résistance selon les concentrations de (KOH). L'échantillon à 10% de (KOH) montre la meilleure résistance (plus de 60 MPa) de 1 à 28 jours.

Avec l'augmentation de la concentration de KOH à 15%, la résistance à la compression a diminué. Il ressort également des résultats obtenus, que la quantité de métakaolinite ajoutée pourrait jouer un rôle important dans la résistance maximale à la compression qui a atteint 79 MPa. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure II.4. Des résultats similaires ont été trouvés ailleurs par d'autres chercheurs J. Swanepoel et al (1999) [82].

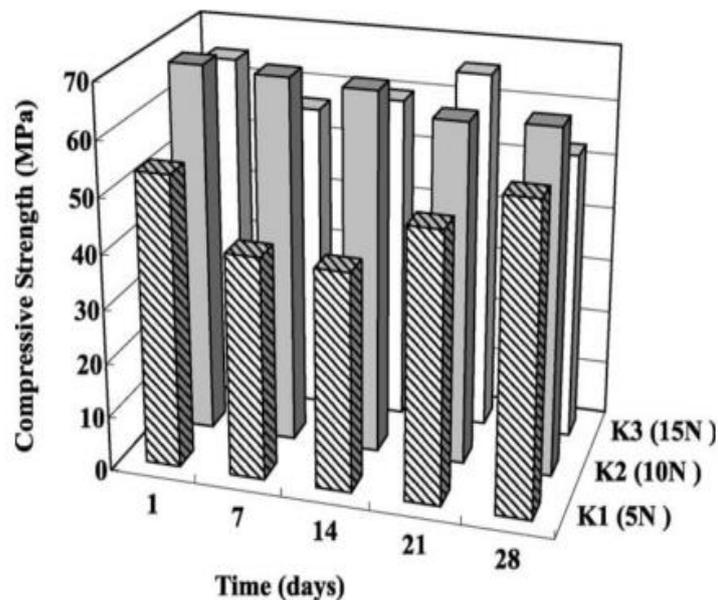


Figure II.4 : résultats des tests de résistance à la compression pour les différentes concentrations de KOH, J. Swanepoel et al (1999) [82].

II.4.Conclusion

Dans cette partie on s'est intéressé aux différentes techniques d'activations chimiques qui ont été élaborés par plusieurs auteurs. On remarque que peu de travaux sont intéressés à l'effet du traitement chimique sur l'amélioration de l'activité pouzzolanique, par contre les auteurs se sont surtout basés sur la méthode d'activation mécanique.

Cependant certains auteurs se sont intéressés surtout au traitement de la pouzzolane par des ajouts d'alcalins parfois combiné à des étuvages à différentes température, afin d'améliorer la réactivité pouzzolanique. Comme ils ont traité les variations des conditions de cure et de durcissement afin d'obtenir un climat optimal de durcissement pour une meilleur résistance à la compression, mais ont délaissé le coté disponibilités des matériaux à utiliser.

Partie III

*Synthèse des données
bibliographiques*

III.1.Introduction

Dans cette dernière partie, nous allons présenter les résultats obtenus à partir des essais élaborés par certains chercheurs sur la réactivité de la pouzzolane naturelle activée chimiquement, sur les bétons et mortiers, afin de sélectionner les mélanges qui peuvent produire des bétons avec une résistance nominale élevée.

Le tableau III.1 regroupe plusieurs expériences ainsi que les résultats obtenus sur l'activation chimique de la pouzzolane mené par plusieurs auteurs. Il nous permet de comparer et de procéder aux choix de la meilleure combinaison de compositions variables avec différentes concentrations et différentes températures, dans le but d'obtenir la meilleure texture qui peut nous donner une résistance nominale à la compression la plus élevée.

Partie III : Synthèse des données bibliographiques

Tableau III.1 : Les résultats des différents tests sur l'activation chimique de la pouzzolane obtenus par certains chercheurs.

Auteurs	Echantillon Etudié	Activation Chimique	Température (°C)	Tests réalisés	Résultats
Alexander (1995)	Chaux_Pouzzolane. Ciment Portland_Pouzzolane	NaOH	/	Résistance	→ Résistance Augmentée au jeune âge et à long terme. → Résistance réduite à partir de 7 jours.
Lea (1974)	Chaux_pouzzolane	Gypse 1%_3%	/	Résistance	Favorise par fois la résistance.
Larew (1976)	Chaux_pouzzolane	6,7% de gypse	49°C	Résistance	Augmentation de la résistance.
Bhardwaj (1980)	Ciment Portland_pouzzolane	CaCl ₂	/	Résistance	Augmentation de 50% par rapport au témoin.
Mal (1995)	Chaux_Cendre Volantes	Ca(OH) ₂	/	Résistance	Résistance réduite au jeune âge sans Ca(OH) ₂ Augmentation de la résistance avec Ca(OH) ₂
Cheng et Chiu (2003)	Pouzzolane	NaOH 2,5% → 10%	/	Résistance	Augmentation de la résistance de 7 à 28 jours. Meilleure résistance à 7,5% de NaOH.
Tchakoute (2013)	Cendre volantes	12%NaOH + Na ₂ SiO ₃	27°C 40°C 60°C	Porosité Densité	La Porosité augmente La densité diminue
Rami.H (2016)	Pouzzolane	NaOH + Na ₂ SiO ₃	40°C 80°C_120°C	Résistance	Résistance invariable entre le témoin et l'activité à 40°C et 120°C Augmentation de la résistance à 80°C qui atteint 31,9 MPa

Partie III : Synthèse des données bibliographiques

Shy et Day (1998)	Cendres volantes+ Chaux (Ca(OH) ₂)	4% CaCl ₂ Na ₂ SO ₄	50°C	Résistance	Na ₂ SO ₄ augmente la résistance de 50% qui avoisine 42MPa.
Alonso et Palomo 2001	Métakaolin +Ca(OH) ₂	CaCl ₂ NaCl	/	Résistance	Matériaux cimentaire a haute résistance.
Elena Alcantara (2000)	Clinoptilolite	Ca(OH) ₂ 5% → 50%	50°C	Résistance	5%et20% de Na(OH) ₂ la résistance Augmente jusqu'à 38,7MPa. >20% la résistance diminue.
Cheng et Chiu (2003)	Métakaolinite	KOH 5% → 15%	/	Résistance	10% de KOH meilleure résistance qui atteint 79MPa. 15% de KOH la résistance diminue.

III.2.Comparaison des résultats obtenus par les auteurs

- Lea (1974) et Larew (1976) ont élaborés leurs essais sur un même mélange qui est chaux-pouzzolane, d'où il résulte que la résistance est améliorée avec un ajout de gypse à 6,7% à une température de cure de 49°C, tandis que l'expérience menée avec un ajout d'un pourcentage de gypse de 1% à 3%, le mélange était instable et n'assure pas souvent l'amélioration de la résistance.

- Alexander (1995) a rajouté au même mélange cité précédemment, un activateur chimique alcalin qui est le NaOH (hydroxyde de sodium) et a obtenu des résistances qui ont augmenté au jeune âge et à long terme.

- Par contre Cheng et Chiu (2003) et Rami.H (2016), ont traité la pouzzolane par des activateurs chimiques, l'un par un rajout de l'hydroxyde de sodium (NaOH) avec une concentration qui varie de 2,5% à 10% à 50°C, qui donne une augmentation à la résistance de 7 à 28 jours avec une concentration de 7,5%. Et

Partie III : Synthèse des données bibliographiques

l'autre par une solution NaOH et Na₂SiO₃. La résistance obtenue est élevée à une température oscillante entre 40°C et 80°C.

- Bhardwaj (1980) et Alexander (1995) ont réalisé leurs essais sur des mélanges à base de ciment portland-pouzzolane contenant des activateurs chimiques ; Alexander a rajouté de l'hydroxyde de sodium (NaOH), et Bhardwaj a rajouté du CaCl₂ (chlorure de calcium), il résulte respectivement une réduction de la résistance à partir de 7 jours, et pour l'autre une augmentation de la résistance de 50% par rapport au témoin.

- Mal (1995), Tchakout(2013), Shi et Day(1998), ont élaborés leurs essais sur des mélanges basés sur la cendre volante avec des ajouts différents, Mal a pris comme mélange chaux-cendre volante activé par Ca(OH)₂, il résulte une augmentation de la résistance.

Tchakout(2013) a pris des cendres volantes activé par une solution de 12%NaOH+Na₂SiO₃ à des températures de durcissement différentes de 27°C à 60°C, il a constaté que la porosité augmente et la densité diminue. Ce qui a indiqué que la résistance diminue.

Shi et day(1998)a pris comme mélanges cendre volante+ chaux (Ca(OH)₂ activé par deux activateurs différents 4%(CaCl₂) et 4%(Na₂SO₄), il résulte que (Na₂SO₄) augmente la résistance de 50% par rapport au témoins.

- Alonso et palomo (2001), Elena alcantara, Cheng et chiu, ont réalisés leurs essais sur des mélanges différents à base d'argiles qui sont comme tel :

Alonso(2001) a pris comme mélange métakaolin+(Ca(OH)₂), activé par (CaCl₂+2H₂O) et NaCl il résulte des matériaux cimentaires à haute résistance.

Elena alcantara(2000) a pris la clinoptilolite activée par (Ca(OH)₂) à des concentrations différentes de 5% à 50% durcis à 50°C, il résulte que la résistance augmente de 5% à 20%, au-delà des 20% la résistance diminue.

Cheng et Chiu(2003)a activé la métakaolinite par l'hydroxyde de potassium (KOH) dosé de 5% à 15%, on obtient une meilleure résistance à 10%.

Partie III : Synthèse des données bibliographiques

Après la comparaison des différentes expériences élaborées par les auteurs cités plus haut, on retient six mélanges qui ont donnés des résultats satisfaisant de point de vu texture et résistance à la compression. Qui sont comme suite :

Alexander (1995), Iarew (1976), Bahrdwaj (1980), Cheng et Chiu (2003), Shi et Day (1998)

III.3. Conclusion

Suite aux travaux expérimentaux rapportés dans cette étude, les conclusions suivantes sont tirées :

- L'utilisation d'activateurs chimique modifie l'hydratation de la pâte cimentaire et accélère la réaction pouzzolanique, générant ainsi des taux de développement de résistance plus rapide et plus élevé, à savoir :

Le silicate de sodium (Na_2SiO_3), l'hydroxyde de potassium (KOH) sont les solutions les plus utilisées.

- Une concentration plus élevé de l'activateur améliore la dissolution de l'aluminosilicate et par conséquent améliore les propriétés mécaniques. Cependant selon le type d'activateurs, les conditions de durcissement et le type du minéral après avoir atteint une certaine concentration d'alcali aucune augmentation significative de la résistance ne peut être observée.

- Le durcissement à température plus élevée provoque également une évaporation rapide de l'eau et propagations des fissures dues au retrait.

Conclusion générale
&
Perspectives

Conclusion et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Dans le but de répondre à l'objectif de notre projet de fin d'étude qui consiste à une recherche à travers les expériences acquises par les différents chercheurs publiés dans les différents articles traitant plusieurs essais sur l'amélioration de la réactivité d'une pouzzolane naturelle à caractère pouzzolanique insuffisant on lui subissant un traitement chimique. Nous avons mené une recherche afin d'évaluer l'influence du type, du dosage d'activateur chimique et la température de cure sur les pâtes obtenus après mélanges des pouzzolanes.

La présentation des mélanges, des matériaux utilisés par les différents auteurs, des solutions avec leurs concentration ainsi que les températures de cure qui nous ont permis de de cerner les meilleurs résultats et d'avoir une meilleure compréhension de l'influence des activateurs chimiques utilisés, sur l'activation de notre pouzzolane.

D'une manière générale, nous avons dressés un bilan des principales conclusions dégagées après l'analyse des résultats obtenus par les auteurs à savoir :

- La cure à une température comprise entre 40°C et 80°C accélère la réaction pouzzolanique et augmente la résistance à la compression. Tandis que pour des températures supérieures à 80°C la résistance commence à décroître.
- L'utilisation de gypse comme activateur chimique a mené à l'augmentation de la résistance à la compression, L'ettringite secondaire formée certainement par la présence de cet activateur présente un effet bénéfique dans notre matériau.
- Les résultats de résistance à la compression obtenus par l'ajout KOH ou NaOH sont considérés importants. Le pourcentage optimal respectivement étant de 10% et 7,5%.
- Les ajouts Na_2SO_4 et CaCl_2 augmente la résistance à la compression par rapport aux mélanges témoins de 50%.

Conclusion et perspectives

- L'utilisation de ces produits locaux aura un avantage capital : celui de réduire les coûts de la fabrication de ciment tout en veillant à la préservation de l'environnement en réduisant l'émission de CO₂ et d'autres gaz toxiques ce qui est devenu un défi mondial. En guise de perspective, il serait intéressant de travailler sur une formulation de mortier ou de béton avec la substitution partielle du ciment par cette pouzzolane chimiquement améliorée, en cherchant le pourcentage optimal de substitution et garantissant des résistances à la compression performantes.
- des travaux de recherche sont recommandés pour déterminer avec plus de précision des mélanges qui peuvent être considérés dans des études de projets de cimenterie, ou de méga projets d'infrastructures nécessitant des bétons de haute qualité.
- Les résultats de cette analyse peuvent être utilisés pour des études dans le cadre d'investissement d'une cimenterie ou d'une usine de préfabrifications d'éléments de béton armé ou précontraint destinés à des ouvrages spécifiques.

Références
Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] I. Ben messaoud, (2013). "Synthèse et caractérisation des matériaux géopolymère à base d'une argile Tunisiene thèse de doctorat dans la dicipline matériaux et environnement". Université de sfax, école nationale d'ingénieur de sfax.
- [2] E. Gartner, (2004). "Industrially interesting approaches to "low-CO2" cement". Cement and Concrete Research. Vol. 34, pp.1489-1498.
- [3] F. Cassagnabère, (2007). "Produits préfabriqués en béton file : vers l'amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procédé de production". Thèse INSA Toulouse, 297 p.
- [4] B. Gourara, A. Korichi, (2017). " Effet de la pouzzolane naturelle sur la porosité d'un béton". Mémoire de master, Université moulay Tahar-Saida.
- [5] M. Amari, (2018). "Activation chimique de la pouzzolane". Mémoire de master, Université de Béjaia, département de génie civil.
- [6] M.A. Chikouche, (2016). " Optimisation des ajouts à base d'argile vaseuses et leurs effets sur les propriétés des matériaux cimentaires". Thèse de doctorat en science. Université de M'sila.
- [7] www.feblocem.be "fabrication de ciment"
- [8] KH. Henni-cherba, A. bougara, El-Hadjkadri, (2011). "Détermination du niveau d'empoussièremement engendrée par la fabrication du ciment". XXXIXe rencontres Universitaires de Génie civil. Telmcen.
- [9] D. Demailly, (2006). " Atelier Changement Climatique. Les enjeux du développement durable au sein de l'industrie du ciment : Réduction des émissions de CO₂ ".
- [10] C. Magniont, (2010). "'Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco matériau de construction à base d'agro-ressource". Thèse de doctorat, Université de Telouse.
- [11] A. Younsi, (2012). "Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales". Thèse de doctorat, Université de la rochelle.

Références bibliographiques

- [12] M.Z. Bessenois, (2010). " Impact et contribution thermo Energétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat". Mémoire de magister.Université Abou BakrBelkadi Tlemcen.
- [13] S. Sabri, (2011). " Elaboration et détermination des propriétés d'un nouveau ciment composé à base de pouzzolanes artificielles". Mémoire de magister.Université de Jijle.
- [14] ASTM C618-03, 2003. "Standard specification for coal fly ash and Raw or calcined Natural pazzola n for use in concrete ASTM international". West conshohochken,PA, www.astm.org
- [15] P.C. Hewlett (Ed.), (1988). "Lea's Chemistry of Cement and Concrete, fourth ed., Elsevier Ltd".
- [16] J. Newman, B.S. Choo (Eds.), (2003). "Advanced Concrete Technology, Constituent Materials Elsevier Science Ltd" Oxford, UK.
- [17] J.M. Geoffray, R. Valladeau, (1977). "Morphologie et couleur des pouzzolanes". Bulletin de liaison des Laboratoires de ponts et chaussées-92- réf. 2116. pp9194.
- [18] R. Sersale, (1980). "Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes". Sous thème IV-1.7eme Congrès International de la chimie des ciments. Vol I. Paris.
- [19] ASTM C 18, (withdrawn 1965). "Methode of chemical analysis of refractory materials"
- [20] M. Adjoudj, (2015). "Effet des additions minérale et organiques sur le comportement rhéologique du béton". Doctorat en sciences, Université Abderahmane Mira-Béjaia.
- [21] P.K. Mehta, (1987). "Pouzzolanes naturelles dans Matériaux complémentaires en cimentation ". Editeur V.M Malhortra, pp.39-181.2010-2011.
- [22] A. MEBROUKI, (juin 2003). "Influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les

Références bibliographiques

caractéristiques mécaniques des mortiers". Thèse de Magister, Université de Mostaganem.

[23] ASTM C125-07. "Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates".

[24] "L'activité pouzzolanique". Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 93, 1978, pp. 66-69.

[25] F. Massazza, (1974). "Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements, in 6th International Congress on the Chemistry of Cement", Moscow.

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

[27] C. Shi, (2001). "An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans". Canadian journal of civil engineering, vol. 28(5), p778-786.

[28] J. Festa, G Dreux, (1988). "Nouveau guide du béton et de ses constituants". 8^{ème} édition. Paris; Edition Eyrolles. p27, 31

[29] C. Shi , (2001). "An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans". Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 28(5), pp. 778-786.

[30] J.H. Taplin. (1962). "The temperature dependence of the hydration rate of Portland cement paste". Australian Journal of Applied Science, Vol. 13(2), pp. 164-171.

[31] U. ChinjeMelo., Billong.N04 (2004). " Activité pouzzolanique des déchets de briques et tuiles cuites". African Journal of Science and Technology (AJST), Science and engineering Series Vol. 5,N°1, , P 92-100.

[32] R. San Nicolas, Cyr M, Escadeillas G,(1985). "Characteristics and applications of flash metakaolins". Appl Clay Sci 2013 ;83-84 : 253-262.

Miner ; Vol 33 N° 3 : 258-260.

[33] D. Bridson, TW. Davies, Harrison DP, (1985). "Properties of flash-caicined

Références bibliographiques

Kaolinite". *Clays Clay Miner*; Vol 33 N° 3 : 258-260.

[34] C. Shi, R.L. Day, (1995). "Acceleration of the reactivity of flyash by chemical. *Cement and Concrete Research*". Vol. 25, pp. 15-21.

[35] D. Geryville, (2010). "Etude et amélioration de l'activité pouzzolanique de certains matériaux silicates pour une substitution partielle du clinker dans le ciment portland". Mémoire d'ingénieur, Université sciences techniques d'Oran Mohamed Boudiaf.

[36] C. Shi, R.L. Day, (1999). "Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators". Part I. Reaction Kinetics, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, pp. 51-58.

[37] C. Shi, R.L. Day, (1993). "Chemical activation of blended cements made with lime and natural pozzolans. *Cement and Concrete Research*". Vol.23 (6), pp.1389–1396.

[38] A. Palomo, M.T. Blanco-Varela, M.L. Granizo, F. Puertas, T. Vazquez, (1999). "Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cement and Concrete Research*". Vol. 29 (7), pp.997-1004.

[39] F. Sajedi, H.A. Razak, (2011). "Comparison of different methods for activation of ordinary portland cement-slag mortars". *Construction and Building Materials*, Vol. 25(1), pp.

[40] C. Shi, P.V. Krivenko, D.M. Roy, (2006). "Alkali-Activated Cements and Concretes". Taylor & Francis, London, 376 p.30-38.

[41] I.V. Vornovitch, R. Dron, (1976). "Action des différents activateurs sur l'hydratation du laitier granulé". *Bull. Liaison Labo.P.ET Ch* -83– Réf. 1810.

[42] M.L. Granizo, S. Alonso, M. Blanco-Varela, A. Palomo, (2002). "Alkaline activation of metakaolin: effect of calcium hydroxide in the products of reaction". *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 85(1), pp. 225-231.

[43] C. Shi, R.L. Day, (1996). "Selectivity of alkaline activators for the activation of slags". *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol.18(1), pp. 8-14.

Références bibliographiques

- [44] J. Qian, C. Shi, Z. Wang, (2001). "Activation of blended cements containing fly ash". *Cement and Concrete Research*, Vol.31(8), pp.1121-1127.
- [45] F.M. Lea, (1938). "The chemistry of pozzolans In Proceedings of 3rd Symposium on the Chemistry of Cements". Stockholm, pp. 460–490.
- [46] W.T. Moran, J.L. Gilliland, (1950). "Summary of methods for determining pozzolanic activity. In Proceedings of symposium on use of pozzolanic materials in mortars and concretes". ASTMSTP-99, San Francisco, pp.109–131.
- [47] R.L. Day, (1992). " Pozzolans for use in low-cost housing: a state of the art report. Department of Civil Engineering". The University of Calgary, Research Report No. CE92-1, Calgary, Canada.
- [48] C. Shi, (1992). "Activation of natural pozzolans, fly ashes and blast furnace slag. Ph.D. Thesis". The University of Calgary, Calgary, Alta.
- [49] G. Malquori, (1960). "Portland–pozzolancement. In Proceedings of 4th International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington", Vol. II, pp.983–1000.
- [50] K. Takemoto, H. Uchikawa, (1980). "Hydration of pozzolanic cement. In Proceedings of 7th international congress on the chemistry of cement", Paris, Vol.1 (Principal Reports), pp-iv–2/1–2/29.
- [51] D.J. Cook, (1986). "Natural pozzolanas, in: R.N. Swamy (Ed.), *Cement Replacement Materials*" .Surrey Univ. Press, Bishopbriggs, Glasgow, , pp. 1± 39.
- [52] F. Massazza, (1998). "Pozzolana and pozzolanic cements, in: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*".4th edn. Wiley, New York, pp. 471 ±632.
- [53] M. Davraz, L. Gunduz, (2005). "Engineering properties of amorphous silica as a new natural pozzolan for use in concrete". *Cem. Concr. Res*, 35:1251-1261.
- [54] A.L. Velosa, P.B. Cachim, (2009). "Hydraulic-lime based concrete: Strength development using a pozzolanic addition and different curing conditions. *Constr.Build*". *Mater*, 23: 2107-2111.

Références bibliographiques

- [55] C. Shi, R.L. Day, (1993). "Chemical activation of blended cements made with lime and natural pozzolans". *Cem.Concr. Res.*, 23: 1389-1396.
- [56] E. Alcantara Ortega, (2000) . "Chris Cheesemana, *, Jonathan Knighta, Maria Loizidou Properties of alkali-activated clinoptilolite Cement and Concrete".*Research* 30 1641± 1646.
- [57] K.M. Alexander, (1955b). Activation of pozzolanic materials by treatment with acid. *Australian Journal of Applied Science*, 6:327–333.
- [58] E. Berry, R.T. Hemmings, B.J. Cornelius, (1988). "Speciation in size and density fractionated fly ash". III. Article UniversitairesThe influence of HCl leaching on the glassy constituents of a high-Ca fly ash.
- [59] R.T. Hemmings, E.E. Berry, B.J. Cornelius, and D.M. Golden, (1989). "Evaluation of acid-leached fly ash as a pozzolan. *Proceedings of Material Research Society*, 136: 141–161.
- [60] S. Martinez-Ramirez, A. Palomo, (2001). "Microstructure studies on Portland cement pastes obtained in highly alkaline environments".*Cem.Conc. Res.*, 31(11):1581-1585.
- [61] K.M. Alexander, (1955a). "Activation of pozzolanic materials by alkali". *Australian Journal of Applied Science*, 6: 224–229.
- [62] V. Johansen, (1976). "Influence of alkalis on the strength development. "In *The effect of alkalis on the properties of concrete*". London,pp. 81–97.
- [63] I. Jawed, J. Skalny, (1978). "Alkalis in cement: a review, II. Effects of alkalis on hydration and performance of Portland cement.*Cement and Concrete*"*Research*, 8: 37–52.
- [64] I. Jawed, J. Skalny, (1983). "The influence of alkali sulphates on the properties of cement and concrete". *World Cement*,No. 11,pp. 325–330.
- [65] F.M. Lea, (1974). "The chemistry of cement and concrete" .3rd Edition,Edward Arnold, New York.

Références bibliographiques

- [66] H.G. Larew (1976). "The use of volcanic ash compounds for construction projects in Iceland". Report No. CE-3447-101-76, Department of Civil Engineering, University of Virginia.
- [67] M.C. Bhardwaj, V.S. Batra, U.V. Sastry, (1980). "Effect of admixtures on pozzolana concrete". Indian Concrete Journal, 54:134–138.
- [68] W. Ma, C.L. Liu, P.W. Brown, S. Lomarneni, (1995). "Pore structures of flyashes activated by $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ". Cem. Conc. Res., 25 (2):417-425.
- [69] R.O. Lokken, J.W. Shade, P.F. Martin (1990). "Effect of curing temperature on the properties of cementitious waste forms". Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 176:23-29.
- [70] P.W. Brown, (1986). "The system $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ". J. Am. Ceram Soc., 73:3457-3463.
- [71] T.W. Cheng, J.P. Chiu (2003). "Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag". Miner Eng 16:205–210 Sage.
- [72] H.K. Tchakoute, A. Elimbi, E. Yanne, C.N. Djangang, "Utilization of volcanic ashes for the production of geopolymers cured at ambient temperature". Cem. Concr. Compos. 38 (2013) 75–81.
- [73] J.N.Y. Djobo, A. Elimbi, H.K. Tchakouté, S. Kumar, (2016). "Mechanical activation of volcanic ash for geopolymer synthesis: effect on reaction kinetics, gel characteristics, physical and mechanical properties", R. Soc. Chem. (RSC Adv.) 6 39106–39117.
- [74] R. Haddad, O. Alshbulb, (2016). "Production of geopolymer concrete using natural pozzolan". A parametric study Department of Civil Engineering, Yarmouk University, Irbid, Jordan.
- [75] C. Shi., R.L. Day, (1993). "Acceleration of Strength Gain of Lime-Natural Pozzolan Cements by Thermal Activation". Cement and Concrete Research, V. 23, No. 4, pp. 824-832.

Références bibliographiques

- [76] A. Palomo, MW. Grutzeck, MT. Blanco, (1999b). "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future". *Cem.Conc. Res.*, 29: 1323-1329.
- [77] X. Wu, W. Jiang , R. DM (1990). Early activation and properties of slag cement. *Cem. Concr. Res.*, 20: 961-974
- [78] A. Fernandez-Jimenez , A. Palomo (2003). "Characterization of fly ashes potential reactivity as alkaline cements". *Fuel.*, 82: 2259-2265.
- [79] ML. Granizo, MT. Blanc-Varela, F. Puertas , A. Palomo, (1997). "Alkaline activation of metakaolin: Influence of synthesis parameters". In *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothemburg, Sweden.*
- [80] A. Abdullah, M.S. Jaafar, Y.H. Taufiq-Yap, A. Alhozaimy, A. Al-Negheimish and J. Noorzaei, (2012). "The effect of various chemical activators on reactivity: A review". *Scientific Research and Essays Vol. 7(7)*, pp. 719-729, 23
- [81] E. Alcantara Ortega, Ch. Cheesemana, J. Knighta , M. Loizidou, (2000). "Properties of alkali-activated clinoptilolite". Department of Civil and Environmental Engineering, Centre for Environmental Control Waste Management.
- [82] J.C. Swanepoel., C.A. Strydom, J.P. Smit, (1999). "Safe disposal of brine water in fly-ash geopolymeric material. *Geopolymer*". 99Proceedings. Second International Conference, France. pp. 253-267.

Résumé

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

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

Ce mémoire consiste à un travail de recherche littéraire, réunissant plusieurs auteurs qui ont traité ce sujet lié à la substitution partielle du clinker par l'ajout de pouzzolane naturelle chimiquement activé dans le ciment.

Abstract

Cement additions are currently one of the most recent developments in cement production, as their uses provide improved mechanical properties of cementitious materials.

On the other hand, their uses aim to reduce the consumption of clinker, by contributing in a simple and economical way to solve the problems related to the environment.

This thesis consists of a literary research work, bringing together several authors who have dealt with this subject linked to the partial substitution of clinker by the addition of natural pozzolan chemically activated in cement.

ملخص

تعتبر إضافات الأسمنت حاليًا واحدة من أحدث التطورات في إنتاج الأسمنت ، حيث توفر استخداماتها خصائص ميكانيكية محسنة للمواد الأسمنتية

من ناحية أخرى ، تهدف استخداماتها إلى تقليل استهلاك الكlinker ، من خلال المساهمة بطريقة بسيطة واقتصادية في حل المشكلات المتعلقة بالبيئة

تتكون هذه الأطروحة من عمل بحثي أدبي ، يجمع بين العديد من المؤلفين الذين تناولوا هذا الموضوع المرتبط بالاستبدال الجزئي للكلنكر بإضافة البوزولان الطبيعي المنشط كيميائيًا في الأسمنت