



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA de Bejaïa
Faculté de la Technologie
Département de Génie Civil

Mémoire

Pour obtenir le titre de Master en Génie Civil

Option : Matériaux et Structures

Thème

ETUDE DE L'INFLUENCE DES AJOUTS CIMENTAIRES SUR L'ACTIVITE POUZZOLANIQUE DES MORTIERS

Présentés par

Mr. ISMAIL HANAFI

M^{ELLE}. AIT-AMRANE DJOHRA

Soutenu le « 24 -09 -2012 » devant le jury composé de :

M ^{ME} .AREZKI	Maitre-assistante	Présidente
M ^{ELLE} . MEZIANI	Maitre-assistante	Examinatrice
Mr. CHELOUAH NASSER	Maitre de conférences	Rapporteur

ANNEE 2011/2012

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier en premier lieu, notre seigneur Dieu, le tout puissant qui nous a donné la patience, le courage et grâce auquel nous avons pu achever ce mémoire.

Tout d'abord, un énorme et chaleureux merci à Mr. N.CHELOUAH notre promoteur, pour avoir encadré et suivi ce travail.

Nous remercions les membres de jury M^{elle}.O.MEZIANI et M^{me}. AREZKI, de s'être donné la peine d'examiner notre modeste travail.

Ainsi qu'à toute les personnes qui nous a apporté leur aide, et particulièrement :

- M^{elle} Hassiba secrétaire du département Génie Civil université de Bejaia.
- M^r ALILI Nabil directeur régionale de L'unité LAFARGE à bejaia.
- M^r ZAZI Bouzid directeur de la cimenterie de Aine Kebira –Setif-.
- M^r MADANI directeur de Sarl les TUFFS DE TINEBDAR.
- M^r MAOUCHI Rachid ingénieur en Génie Civil gérant du BET-PROGEC- à El-Kseur. S
- M^r Jacques VECOVEN directeur de la S.N.L. - SOCIETE NOUVELLE DU LITTORAL à Paris-France.
- M^{elle} TAFOUKT Fatima, M^{elle} OUARET Safia, M^{elle} MOUZAOUI Ouahiba, Mr BEZZINA Lounis, M^r ISMAIL Djaafar, M^r KHELFAOUI Alili des étudiants à l'université de Bejaia.

Un grand merci aux techniciens du Laboratoire M^r Djamel, M^r Fawzi et M^r Said pour leurs disponibilités et, leurs compréhensions au niveau de laboratoire.

Et enfin, nous exprimons notre reconnaissance à tous les enseignants qui nous ont enrichis avec un précieux savoir qui est le meilleur héritage pour l'avenir.

Dédicaces

Je dédie ce présent travail à mes chers et nobles parents dont je suis et je serais pleinement reconnaissant pour m'avoir soutenu durant tout mon parcours, et aussi :

- *à mes sœurs : Taoues, Ouarda, Nawal, Rahima, Katia et wissam.*
- *A ma nièce Imane.*
- *A mes frères : Karim, Mehrez et Amar.*
- *A mes deux grandes mères.*
- *A toute la grande famille : mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines ;*
- *A ma binôme Djohra et toute sa famille.*
- *A tous mes amis (es) : (Madjid, Idir, Djaafar, Lounis, Farid, Fatima, Ouhiba, Safia, Ka mila, Nadira, Alili, Rabah, Yacine, Mouloud, Ferhat, Karim, Cherif et Faouzi).*

Que Dieu vous bénisse !

Hanafi.

A mes Parents.

A tous ceux qui me sont chers,.....

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents.

Mes chères sœurs : SAMIA ; RABIIHA ; SOURAYA ; FATIMA.

Mes chers frères YAZID ; SAID et HOUCINE.

Mes beaux-frères et belles sœurs.

Mes neveux et nièces.

Toute ma famille grande et petite.

Mon binôme HANAFI.

Tous mes amis : (Samira ; Siham ; Radia ; Zoubir ; Moumen ;.....)

Tous ceux que j'aime

Djohra

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

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 (mortier et béton). D'autre part leurs utilisations ont pour objectifs de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement. Ce travail expérimental étudie les avantages et la possibilité de substitution partielle du ciment par les ajouts pouzzolaniques (tuf volcanique ; cendre volante et les laitiers de haut fourneau) et leurs influence sur l'activité pouzzolanique des mortiers. Cette étude expérimentale consiste à préparer un ciment avec addition minérale en remplaçant un certain pourcentage de clinker par les ajouts pouzzolaniques. L'ajout pouzzolanique substitué à divers pourcentages (0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 30%). Dans cette étude, nous avons fait varier le pourcentage des ajouts pouzzolaniques dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par le tuf ; les cendres et les laitiers) afin d'étudier leurs effet sur les propriétés physiques et le comportement mécanique du mortier. Les caractéristiques des mortiers préparés, telles que, l'absorption, le comportement mécanique (résistance mécanique à la compression) ont été étudiées. D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la quantité d'ajout pouzzolanique, sa composition chimique et la composition chimique du ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques et la lenteur de la réaction pouzzolanique des mortiers testés.

Mots-clés : activité pouzzolanique, Ajout pouzzolanique, tuf, cendre volante, laitier, ciment, mortier, comportement mécanique.

Abstract

Cementitious additions are currently one of the most recent developments in the production of cement, because their uses improve mechanical properties of cementitious materials (mortar and concrete). On the other hand their uses are aimed to reduce the consumption of clinker; it is a simple and economical way to solve the problems related to the environment. This experimental work examines the benefits and the possibility of partial replacement of cement by pozzolanic additions (tuff, fly ash and blast furnace slag) and their influence on the mortars pozzolanic activity. This experimental study is to prepare a cement with addition replacing a certain percentage of clinker pozzolanic additions. Uploading pozzolanic substituted at various percentages (0%, 5%, 10%, 15%, 20% and 30%). In this study, we varied the percentage of pozzolanic additions in cement by the substitution method (partial replacement of clinker by the tuff, ash and slag) to study their effect on the physico-chemical properties of the cement made with the addition of mineral and mechanical behavior of the mortar. According to the experimental results, it appears that the amount of pozzolanic addition, fineness and chemical composition of the cement crafted are the main parameters that influence the variation of mechanical strength and slow pozzolanic reaction of mortars tested.

Keywords : activity pozzolanic, Add pozzolanic, tuff, fly ash, slag, cement, mortar, mechanical behavior.

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	IV
ABSTRACT	V
TABLE DES FIGURES	VIII
TABLE DES TABLEAUX	X
NOTATIONS.....	XII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	4
CHAPITRE I : CIMENT PORTLAND.....	5
I.1 HISTORIQUE	5
I.2 LIANT HYDRAULIQUE : CIMENT	5
I.3 ETAPES DE FABRICATION DU CIMENT.....	6
I.4 LES CONSTITUANTS DU CIMENT	9
I.5 HYDRATATION	12
I.6 PROPRIETES TECHNIQUES DU CIMENT PORTLAND	20
CONCLUSION.....	20
CHAPITRE II: LES AJOUTS MINERAUX	22
II.1 GENERALITES	22
II.2 CLASSIFICATION DES AJOUTS CIMENTAIRES.....	23
II.3 LES DIFFERENTS TYPES D’AJOUTS.....	25
II.4 EXIGENCES RELATIVES D’UTILISATION DES POZZOLANES	30
II.5 L’INTERET DE L’UTILISATION DES AJOUTS MINERAUX DANS LE GENIE CIVIL.....	30
II.6 L’UTILISATION DES AJOUTS EN ALGERIE	32
CHAPITRE III : LES CEMENTS AVEC AJOUTS	34
III.1 DEFINITION D’UN CIMENT AVEC AJOUT MINERAL	34
III.2 COMPORTEMENT D’UN CIMENT AVEC AJOUT MINERAL :	34
III.3 CHIMIE D’HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND AVEC AJOUT ET REACTION POZZOLANIQUE	35
III.3.1 DEFINITION.....	35
III.3.2 CHALEUR D’HYDRATATION.....	37
III.3.3 ROLE DE LA TAILLE DES GRAINS DES GRANULATS REACTIFS ET DE LA TEMPERATURE DANS LA REACTION POZZOLANIQUE	37
III.3.4 ESTIMATION DE L’ACTIVITE POZZOLANIQUE.....	38
III.3.5 METHODES D’ACTIVATION DE LA REACTION POZZOLANIQUE	38
III.3.6 PROPRIETES DES MORTIERS ET BETON RENFERMANT DES POZZOLANES.....	39
CONCLUSION.....	39

ETUDE EXPERIMENTALE.....	41
CHAPITRE I : CARACTERISATION DES MATERIAUX	42
I.1 LES AJOUTS MINERAUX	42
I.1.1 LES TUFs.....	42
I.1.2 LES CENDRES VOLANTES ET LE LAITIER	43
I.1.3 CLASSIFICATION DES AJOUTS CIMENTAIRES SELON LEUR DEGRE DE REACTIVITES	45
I.2 LE CIMENT.....	47
I.3 LE SABLE.....	49
I.4 L'EAU DE GACHAGE	51
CONCLUSIONS	53
CHAPITRE II : METHODES D'ESSAIS ET NORMES.....	54
INTRODUCTION.....	54
II.1 PROCEDURE EXPERIMENTALE	54
II.1.1 PREPARATION DES CEMENTS ETUDIES (CIMENT+ LES DIFFERENTS AJOUTS)	54
II.2 METHODES D'ESSAIS ET NORMES.....	55
II.3 DESCRIPTION ET MODE OPERATOIRE DES ESSAIS	55
CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRITATIONS.....	65
INTRODUCTION.....	65
III.1 INFLUENCE DES AJOUTS MINERAUX SUR LE MORTIER NORMAL A BASE DU SABLE NORMALISE.....	65
III.1.1 ESSAI MECANIQUE	65
III.1.2 EVALUATION DES MASSES DES MORTIERS	68
CONCLUSION GENERALE	72
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	77
ANNEXE A	79
ANNEXE B	80

TABLE DES FIGURES

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE04

Figure I.1 : Stades de fabrication du ciment.....	6
Figure I.2 : Processus de fabrication du ciment.	8
Figure I.3 : Cristaux anhydres du clinker.....	9
Figure I.4: Micrographe en lumière réfléchie d'une section polie de clinker de ciment Portland.	9
Figure I.5 : Principales réactions avec l'eau.....	13
Figure I.6 : CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#), La porosité est repérée par (O)	13
Figure I.7 : Cinétique de l'hydratation de C3S.....	14
Figure I.8 : Résistance des différents constituants du clinker d'après Bogue et Lerch	15
Figure I.9 : Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton.	16
Figure I.10 Les phases de l'hydratation.....	17
Figure I.11: Courbe typique de calorimétrie isotherme d'un Ciment.....	18
Figure I.12 : Les hydrates.....	19
Figure II.1 Diagramme de wesche pour la classification des ajouts minéraux.	24
Figure III.1 : Changement de la quantité de chaux d'un ciment pouzzolanique hydraté.....	36

ETUDE EXPERIMENTALE..... 41

Figure I.1 : Courbe granulométrique du sable normalisé selon les normes Afnor	49
Figure II.1 : malaxeur normalisé pour pâte et mortier.....	59
Figure II.2: Moules pour moulage des éprouvettes de mortier.....	59
Figure II.3: appareil à chocs.	60
Figure II.4: machine d'essais de résistance à la compression.....	61
Figure II.5: matériaux utilisés.....	61
Figure II.6 : Immersion des mortiers dans l'eau	63
Figure II.7 : masses à différents âges.....	64
Figure III.1 : Resistance a la compression des mortiers testés.....	66

Figure III.2 : Evaluation de la masse des mortiers confectionnés à 5% de différents ajouts.....	69
Figure III.3 : Evaluation de la masse des mortiers confectionnés à 10% de différents ajouts.....	70
Figure III.4 : Evaluation de la masse des mortiers confectionnés à 15% de différents ajouts.....	70
Figure III.5 : Evaluation de la masse des mortiers confectionnés à 20% de différents ajouts.....	71
Figure III.6 : Evaluation de la masse des mortiers confectionnés à 30% de différents ajouts.....	71

TABLE DES TABLEAUX

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	4
Tableau I.1: Composition chimique et minéralogique du clinker.	10
Tableau I.2 : Principales catégories de ciment.....	11
Tableau II.1.Classification des ajouts selon leur réactivité.....	23
Tableau II.2: ASTM C618-89 Exigences relatives à un type N pouzzolane pour utilisation comme ajout au béton de ciment Portland.....	30
Tableau II.3 Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes	333
ETUDE EXPERIMENTALE	41
Tableau I.1 Analyse chimique moyenne (% , en poids) du tuf utilisé fournie par l'exploitant.....	43
Tableau I.2 Caractéristiques physique de tuf utilisé dans cette étude.....	43
Tableau I.3: Composition chimique du laitier.....	44
Tableau I.4 : Composition chimique des cendres volante.....	45
Tableau I.5 Classification des ajouts.....	45
Tableau I.6 Exigences chimiques d'utilisation d'une pouzzolane.	46
Tableau I.7 Développement des Indices d'activité pouzzolanique du Mortier à base de sable normalisé.....	46
Tableau I.8 Composition chimique du ciment	47
Tableau I.9 Composition minéralogique du clinker.....	48
Tableau I.10 Coefficient de broyabilité.....	48
Tableau I.11 Coefficient de saturation en chaux du clinker.....	49
Tableau I.12: Analyse chimique du sable normalisé	51
Tableau I.13 Caractéristiques physiques du sable normalisé utilisé.....	51
Tableau II.1 : Les ciments substitués.....	54
Tableau II.2: Methodes d'essais normalisés.....	55
Tableau II.3: Opération pour déterminer le mortier normal.....	62
Tableau II.4: Limites de temps.....	62
Tableau III.1 : Valeurs des résistances à la compression des mortiers testés (MPa).	79
Tableau III.2 : valeurs des masses des mortiers testés (g).	79

NOTATIONS

RC : résistance à la compression.

F_C : est la charge de rupture.

NFP : Norme Française.

NA : Norme Algérienne.

SSB : surface spécifique Blaine.

I_a : Indice d'activité pouzzolanique.

INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières années, l'industrie de fabrication des liants hydrauliques (ciments) a été transformée par l'arrivée de nouveaux déchets minéraux (ajouts cimentaires) tels que, les matériaux volcaniques (les tufs), les cendres des centrales thermiques, les laitiers de haut fourneau et les déchets de briques et tuiles cuites (argile calcinée). Les fumées de silice sont des particules très fines ayant une forte teneur en silice amorphe, provenant de la réduction du quartz de grande pureté (silice) par du charbon dans des fours à arc électrique. Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes (résidus) obtenues lors de la combustion du charbon pulvérisé et utilisé dans les centrales thermiques. Les laitiers de haut fourneau sont des sous-produits obtenus lors de l'élaboration de la fonte. Ces ajouts minéraux ont des propriétés hydrauliques (formation des composés hydratés stables par réaction avec l'eau) et pouzzolanique (formation des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau à température ordinaire par combinaison avec la chaux libérée au cours de l'hydratation des composés du clinker et en présence d'eau) intéressantes qui participent aux résistances mécaniques du mortier ou du béton.

L'utilisation de ces ajouts minéraux dans la production des ciments Portlands composés (C.P.J-C.E.M II) a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments aux ajouts minéraux avec les propriétés physico-mécaniques demandées. Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la fabrication des ciments avec additions minérales dans le monde. Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment Portland composé (C.P.J-C.E.M II), du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé.

La réduction de la proportion du clinker dans la fabrication du ciment avec ajout minérale présente les avantages suivants :

- ◆ élimination et valorisation d'un déchet industriel (sous-produit),
- ◆ rendre l'environnement plus propre,
- ◆ réduction de la consommation thermique,
- ◆ réduction des émissions de CO₂.

Les émissions de CO₂ lors de la fabrication du ciment proviennent de différentes sources :

- ◆ CO₂ matière provenant de la décarbonatation (52%) du calcaire (CaCO₃).
- ◆ CO₂ thermique (48%) provenant de la combustion lors de la cuisson.

La contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de deux effets : physico-chimique et microstructural. D'une part les additions minérales sont susceptibles de modifier le processus d'hydratation du ciment ainsi que la structuration des produits hydratés et, d'autre part, certaines additions minérales à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent peuvent réagir en milieu cimentaire et former de nouveaux produits hydratés. Ces deux effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les performances finales des matériaux durcis.

L'utilisation des sous-produits comme matériau de substitution (remplacement partiel de ciment) a les avantages économiques, et techniques importants tels que : la réduction du besoin en énergie et amélioration des propriétés des matériaux cimentaires (mortier et béton).

L'objectif principal de cette étude expérimentale consiste à étudier l'influence des ajouts minéraux sur les caractéristiques physiques ainsi que la résistance mécanique du mortier testé. Cette recherche consiste à faire varier le pourcentage de l'ajout pouzzolanique dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par l'ajout pouzzolanique d'origine minérale). Ceci dans le but d'améliorer le degré d'hydratation (prise et le durcissement) des ciments aux ajouts minéraux et d'augmenter le taux d'incorporation de l'ajout pouzzolanique dans le ciment pour une meilleure utilisation des additions pouzzolaniques dans l'industrie cimentière.

Le manuscrit s'articule autour des points suivants :

La première partie de ce travail est destinée à l'étude bibliographique. Dans cette partie nous avons exposé les travaux réalisés sur les ajouts minéraux, l'hydratation des

ciments, l'activité des pouzzolanes, propriétés des mortiers et bétons contenant des pouzzolanes.

La deuxième partie est consacrée à l'expérimentation. Nous présentons dans cette partie la caractérisation des matériaux utilisés (le tuf, laitier, cendre volante, ciment et le sable normalisé) et les méthodes d'essais réalisés sur le ciment utilisé et mortiers ainsi que les résultats expérimentaux obtenus et les discussions tirées lors de cette étude.

Enfin, dans la conclusion générale, on présente les principaux résultats dégagés lors de cette étude ainsi que les futures perspectives en termes d'expérimentation pour une meilleure utilisation de l'addition minérale (ajout pouzzolanique) pour la confection des ciments avec ajouts secondaires.

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

I. LE CIMENT PORTLAND

II. LES AJOUTS MINERAUX

III. LES CIMENTS AVEC AJOUTS

CHAPITRE I

CIMENT PORTLAND

I.1 HISTORIQUE

Le ciment dit « ciment Portland » c'est le matériau du 20^e siècle, il n'a guère plus d'une centaine d'années. L'écossais "Aspdin" prit un brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela "ciment Portland" à cause de l'aspect présenté par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland. C'est le premier ciment, père d'une longue lignée.

Ainsi, le XX^e siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les chaux. L'accélération sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués et, n'utilisant plus les chaux.

C'est l'époque charnière où la chaux est en passe d'abandon, où son ancienneté est une marque d'archaïsme alors que les ciments améliorent les performances des liants.

I.2 Liant hydraulique : ciment

Un liant hydraulique est un mélange de poudre très fine de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux CaO avec la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3 et l'oxyde de fer Fe_2O_3 . Son mélange avec l'eau forme une pâte qui durcit progressivement dans le temps. Les constituants du ciment sont obtenus par une cuisson à haute température d'un mélange artificiel parfaitement dosé et homogénéisé.

[2]

I.3 ETAPES DE FABRICATION DU CIMENT [1]

Le procédé de fabrication du ciment est un processus industriel dans lequel de grandes quantités de matières premières sont transformés en produits commerciaux tels que le clinker ou le ciment.

La figure ci-dessous montre les étapes de fabrication du ciment :

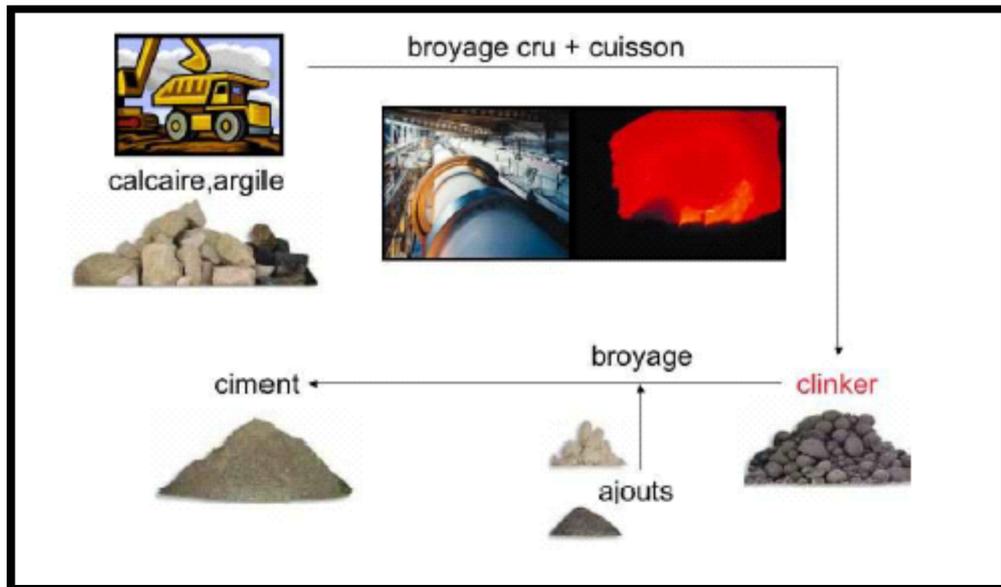


Figure I.1 : Stades de fabrication du ciment. [2]

II.3.1 PREPARATION DE LA MATIERE PREMIERE

Le constituant principal du ciment est le clinker qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange très finement broyé (qu'on appelle le " cru ") approprié de calcaire et d'argile, en proportion moyenne de 80 % de calcaire et 20 % d'argiles (silicoaluminates). Ces matières premières sont présentes dans les roches naturelles, les marnes ou calcaires argileux qui ont une composition proche de 80 % calcaire- 20 % argiles , généralement des correcteurs de composition, minerai de fer qu'apporte Fe_2O_3 , bauxite (Al_2O_3), sable (SiO_2) sont ajoutés en faible proportion pour atteindre la composition souhaitée. [3,4]

II.3.2 PREPARATION DU CRU

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

roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Fe_2O_3 , l'oxyde ferrique. Les matières premières sont finement broyées (0,1mm) afin d'obtenir le "cru". [4]

II.3.3 LE SECHAGE ET LE BROUYAGE

Pour favoriser les réactions chimiques qui suivent, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques microns) dans des broyeurs à boulets ou dans des broyeurs à meules verticaux. Ces derniers, plus récents, sont plus économiques en énergie et permettent un séchage plus efficace. Ensuite 3 voies sont possibles : la voie humide, la voie sèche et semi-sèche. La première est plus ancienne et implique une grande consommation d'énergie pour évaporer l'eau excédentaire. Dans ces procédés, les matières premières sont parfaitement homogénéisées et séchées lors de l'opération de broyage afin d'obtenir la farine. Celle-ci peut être introduite directement dans le four sous forme pulvérulente (voie sèche), ou préalablement transformée en "granules" par humidification (voie semisèche). [2]

II.3.4 LA CUISSON ou CALCINATION

La cuisson se fait à une température voisine de 1450°C dans un four rotatif, long cylindre tournant de 1,5 à 3 tour/minute et légèrement incliné. La matière chemine lentement et se préchauffe le cru à environ 800°C . A la sortie du four, un refroidisseur à grille permet d'assurer la trempe des nodules incandescents et de les ramener à une température d'environ 100°C . Tout au long de la cuisson, un ensemble de réactions physico-chimiques conduit à l'obtention du clinker. [2]

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

II.3.5 Phases de formation des constituants du clinker. [6]

- $3 \text{ CaO} + \text{SiO}_2 \xrightarrow{1220^\circ\text{C}} 3 \text{ CaO}, \text{SiO}_2 \quad \text{C}_3\text{S} \text{ . Alite}$
- $2 \text{ CaO} + \text{SiO}_2 \xrightarrow{1220^\circ\text{C}} 2 \text{ CaO}, \text{SiO}_2 \quad \text{C}_2\text{S} \text{ . Bélite}$
- $3 \text{ CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \xrightarrow{1450^\circ\text{C}} 3 \text{ CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3 \quad \text{C}_3\text{A} \text{ . Céélite}$
- $4 \text{ CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \xrightarrow{1450^\circ\text{C}} 4 \text{ CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad \text{C}_4\text{AF} \text{ . Féélite}$

II.3.6 LE BROYAGE DU CIMENT

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker doit être à son tour broyé très finement. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets. Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier qui, par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grains supérieurs à 80 microns. A la sortie du broyeur, un cyclone sépare les éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée du broyeur. C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (3 à 5%) indispensable à la régulation de prise du ciment. On obtient alors le ciment "Portland". Les ciments avec "ajouts" sont obtenus par l'addition au clinker, lors de son broyage, d'éléments minéraux supplémentaires contenus par exemple dans les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles. Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrage allant du plus courant au plus exigeant. [2,3]

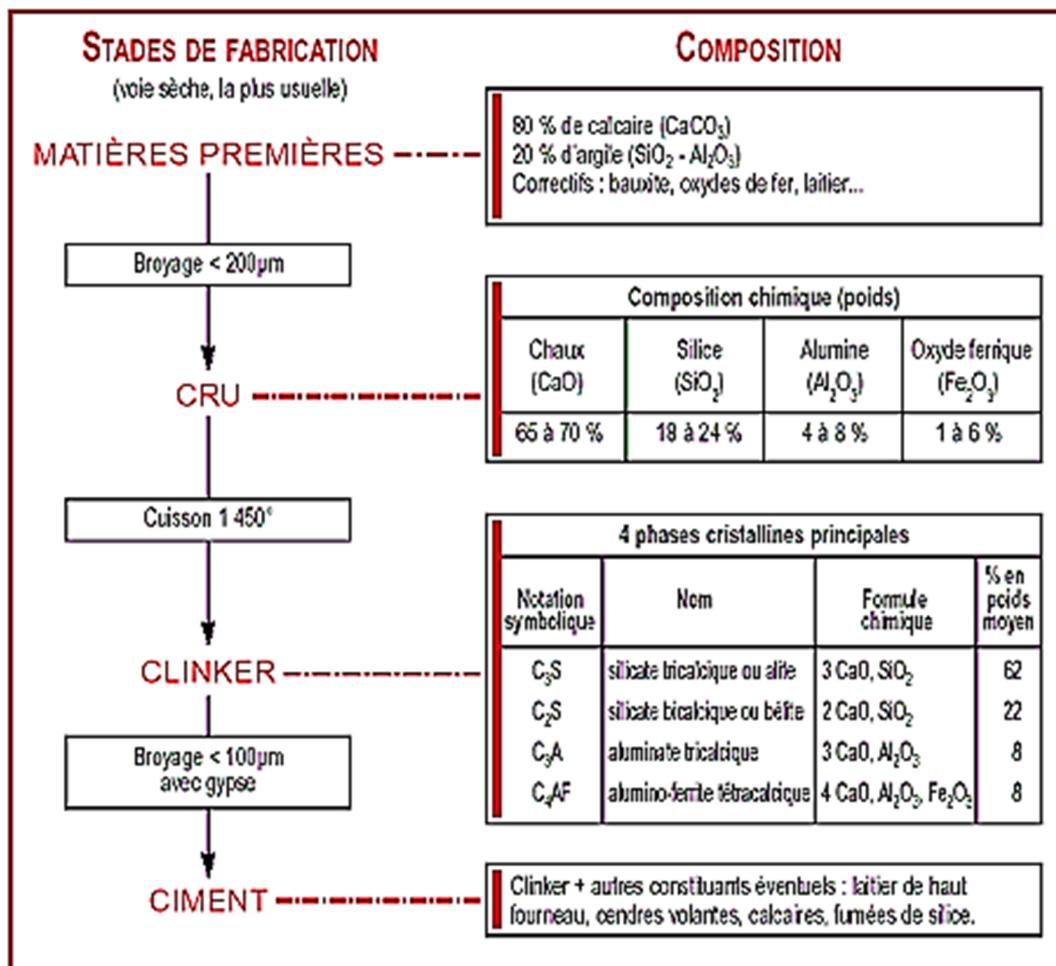


Figure I.2 : Processus de fabrication du ciment. [5]

I.4 LES CONSTITUANTS DU CIMENT

I.4.1 Le clinker

Le ciment résulte du broyage d'un certain nombre de constituants. Le plus important étant le clinker formé de silicates et d'aluminates de chaux. La figure I.3 montre le clinker dans sa phase cristalline.

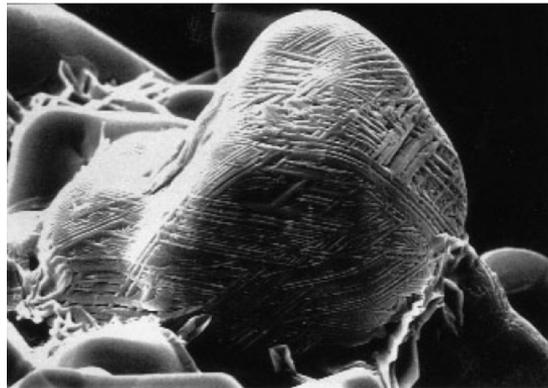


Figure I.3 : Cristaux anhydres du clinker. [7]

Dans la zone de clinkérisation du four, les éléments simples (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3) se combinent pour donner les constituants minéraux suivants (figure I.4).

- silicate tricalcique (C_3S) : $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (Alite)
- silicate bicalcique (C_2S) : $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (Belite)
- aluminat tricalcique (C_3A) : $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (Célite)
- ferroaluminat tétracalcique (C_4AF) : $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Felite)

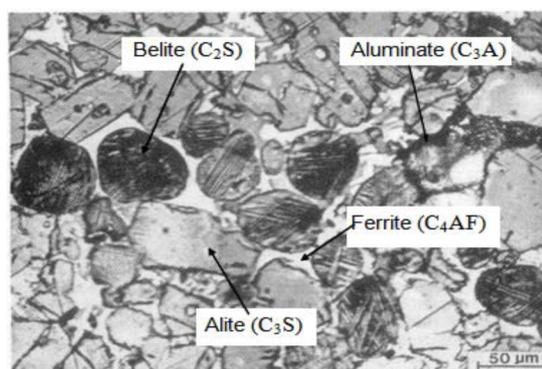


Figure I.4: Micrographie en lumière réfléchie d'une section polie de clinker de ciment Portland. [7]

Les compositions chimiques et minéralogiques du clinker sont comprises dans les limites données par le (tableau I.1) :

Tableau I.1: Composition chimique et minéralogique du clinker. [8]

Composants (%) Minéralogique	Teneurs limites	Teneur moyenne (%)
C₃S	40-70	60
C₂S	00-30	15
C₃A	02-15	08
C₄AF	00-15	08
Oxydes		
CaO	60-69	65
SiO₂	18-24	21
Al₂O₃	04-08	06
Fe₂O₃	01-08	03
MgO	< 05	02
K₂O, Na₂O₃	< 02	01
SO₃	< 03	01

I.4.1.1 Broyabilité du clinker [10]

Le clinker présente une bonne broyabilité s'il contient plus de C₃S, moins de C₃A et une forte microfissuration lors du refroidissement (le plus possible de petits cristaux).

Selon certains chercheurs, plus le rapport $[(C_3S + C_2S) / (C_3A + C_4AF)]$ est élevé, plus facile est la broyabilité.

I.4.1.2 Qualité du clinker [10]

Dans la fabrication du ciment, une bonne préparation (mélange) est calculée pour avoir un rapport (rapport de saturation en chaux) m proche de 1.

$$m = \text{CaO} / (2.8\text{SiO}_2 + 1.18\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65\text{Fe}_2\text{O}_3).$$

Si $m=1$ toute la chaux est consommée. L'art du cimentier consiste à se rapprocher au maximum de cette valeur. Mais en réalité on prend une quantité de quelques pourcents inférieures à ces valeurs.

I.4.1.3. PRINCIPALES CATEGORIES DE CIMENTS [4]

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par la norme NF P15-301.

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

Tableau I.2 : Principales catégories de ciment [4]

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

Avec les notations abrégées correspondantes qui sont comme suit :

CEM pour indiquer que le produit est un ciment.

Un chiffre romain **1, 2, 3, 4** ou **5** pour indiquer le type de ciment.

Pour le ciment **2 ; 3 ; 4** et **5** une lettre **A, B, C** pour indiquer la proportion des constituants. Le nombre indiquant la classe de résistance **32.5, 42.5, 52.5** suivi de la lettre **R** pour signaler une résistance élevée au jeune âge (2 jours).

I.4.1.4 calcul de la composition minéralogique du clinker [9]

Sur la base de l'analyse chimique, R.H. BOGUE a élaboré une méthode pour le calcul de la composition minéralogique du clinker.

◆ **Les équations ou formules de Bogue**

- $C_4AF = 3, 04. Fe_2O_3$
- $C_3A = 2, 65. Al_2O_3 - 1, 69. Fe_2O_3$
- $C_2S = 8, 6. SiO_2 + 1, 08. Fe_2O_3 + 5, 07. Al_2O_3 - 3, 07. CaO$
- $C_3S = 4, 07. CaO - 7, 6. SiO_2 - 1, 43. Fe_2O_3 - 6, 72. Al_2O_3 - 2, 85. SO_3$

I.4.2 Le gypse (CaSO_4)

Le clinker « pur » très fin est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable. Ce fait est surtout dû à la célite (C_3A) qui s'hydrate rapidement tandis que ses hydrates deviennent rapidement compacts et se cristallisent. Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydroaluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydroaluminate tricalcique et produit un sel insoluble l'hydrosulfoaluminate de calcium ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$). [4]

La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en C_3A dans le liant et lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydroaluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial.

I.4.3 les ajouts minéraux

Ces ajouts jouent le rôle suivant: d'après leur composition ils se présentent principalement par de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de chaux qui se forme lors de l'hydratation des minéraux faisant partie du clinker. Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minéralogique du clinker. [4]

I.5 HYDRATATION

L'hydratation du ciment met en jeu un nombre important de réactions chimiques complexes. Toutes ces réactions conduisent à la formation de silicates ou d'aluminates calciques hydratés qui font prise et qui donnent les propriétés mécaniques des pâtes de ciment (ciment + eau), des mortiers (ciment + eau + sable) et des bétons (ciment + eau + fins et gros granulats).

L'hydratation regroupe l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre le ciment et l'eau. Ces réactions d'hydratation sont très complexes et débutent dès la mise en contact de ces deux phases.

Les réactions d'hydratation des constituants anhydres du ciment mettent en jeu dès le contact avec l'eau, des réactions chimiques complexes qui se poursuivent dans le temps à des vitesses différentes en donnant naissance à des silicates et des aluminates de calcium hydratés (Figure I-5) qui sont insolubles dans l'eau et de la chaux hydratée (portlandite), d'où le phénomène de prise conduisant à de bonnes résistances mécaniques

du ciment. L'emploi du gypse joue le rôle de retardateur de prise pour les aluminates, en donnant naissance à une couche protectrice sur les grains, ce qui retarde l'hydratation.

Les 4 principaux constituants ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ - $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ - $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ - $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$) anhydres donnent en présence d'eau, naissance à des silicates et aluminates de calcium hydratés pratiquement insolubles dans l'eau

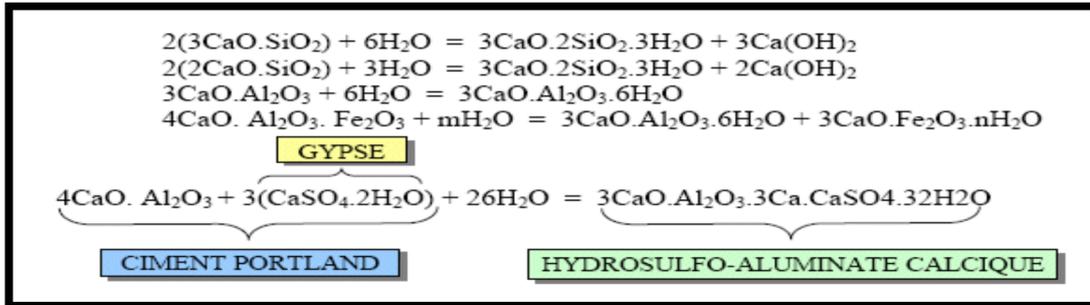


Figure I.5 : Principales réactions avec l'eau. [7]

I.5.1 Hydratation du silicate tricalcique C₃S [11]

L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté ($3\text{CaO}.\text{2SiO}_2.\text{3H}_2\text{O}$) qui est le composant essentiel qui donne la résistance du ciment et l'hydroxyde de calcium, suivant l'équation d'équilibre suivante qui ne tient pas compte de la complexité de la réaction (Figure I.7 Figure I.8)

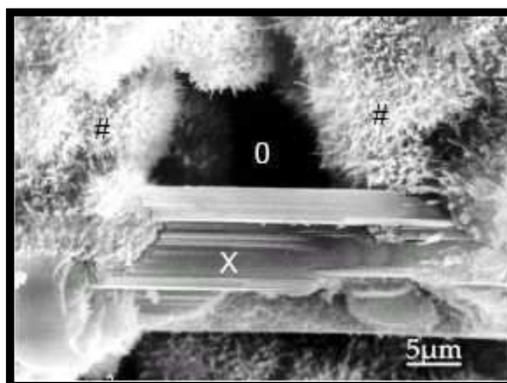
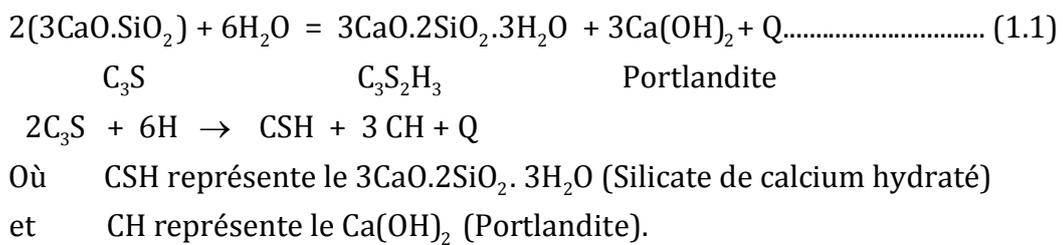


Figure I.6 : CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#), La porosité est repérée par (O) [11]

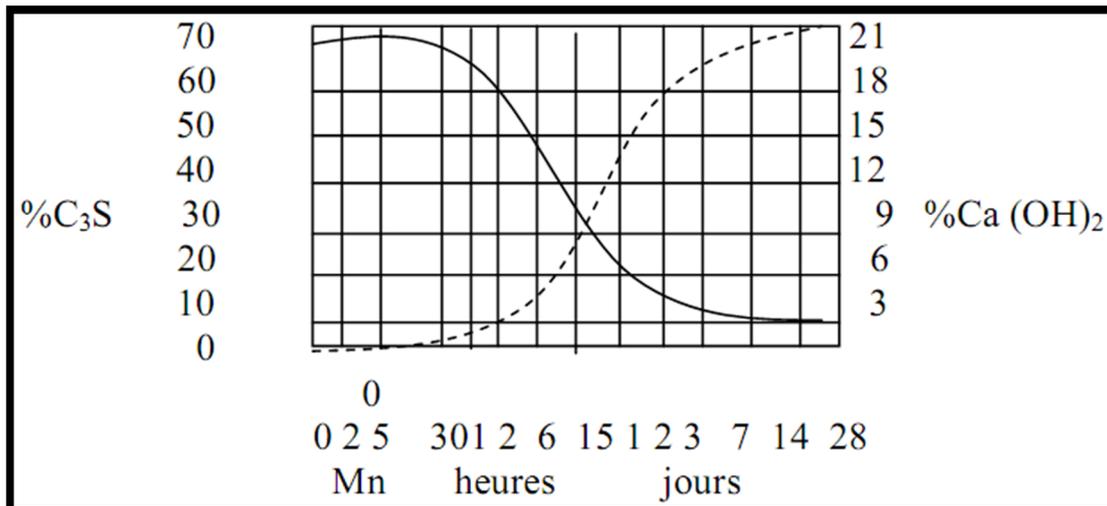
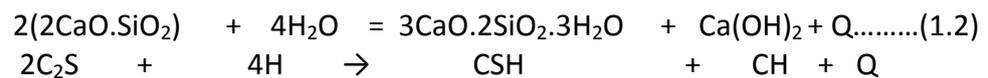


Figure I.7 : Cinétique de l'hydratation de C3S. [10]

I.5.2 Hydratation du silicate bicalcique C₂S [11]

Une fois hydraté, C₂S donne aussi des CSH. La réaction est donnée par:



Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C₃S mais le silicate bicalcique s'hydrate plus lentement avec moins d'évolution de la chaleur. Aussi il est le second composé responsable de la résistance Figure I-8.

Selon des calculs de stoechiométrie., l'hydratation de C₃S produirait 61% de gel de CSH et 39% de CH alors que l'hydratation de C₂S produirait 82% de gel de CSH et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C₂S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C₃S est nécessaire, par ce que sa vitesse de réaction est plus élevée.

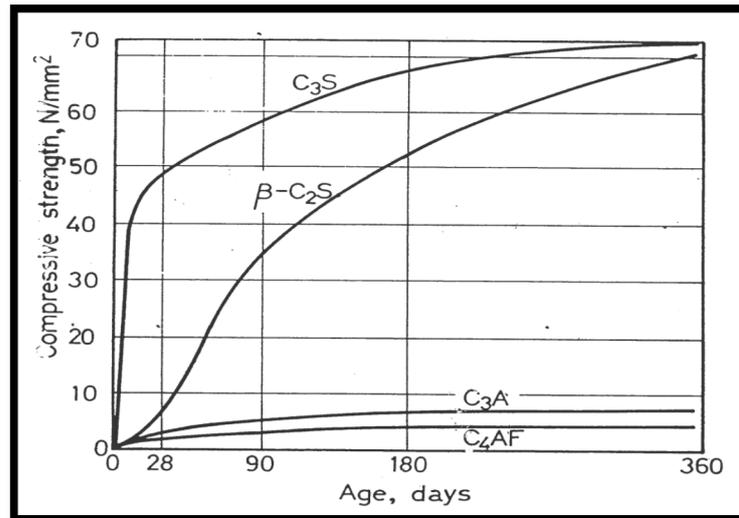


Figure I.8 : Résistance des différents constituants du clinker d'après Bogue et Lerch [10]

I.5.3 Hydratation des aluminates tricalques C₃A [11]

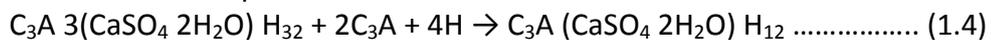
L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse (CaSO₄ 2H₂O). En l'absence du gypse, la réaction de C₃A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C₃A réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (Ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale (figure I.9).

La réaction est donnée par:



Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en ettringite. Il apparaît donc secondairement un monosulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales.

La réaction est donnée par:



Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée

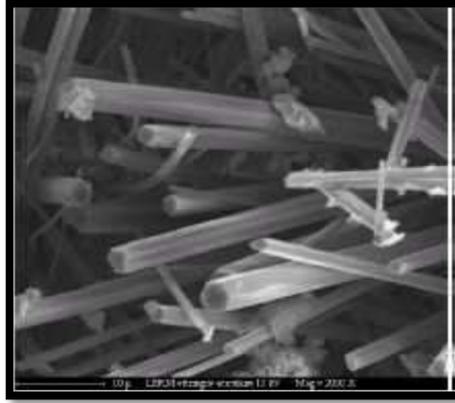
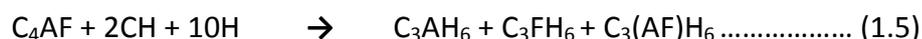


Figure I.9 : Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton. [11]

I.5.4 Hydratation de l'aluminoferrite tetracalcique C₄AF [11]

Le C₄AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C₃A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente (vitesse d'hydratation est plus faible). Dans la première étape de la réaction, le C₄AF produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C₄AF pour donner une basse forme de sulfoaluminate. Ces sulfoaluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte. La réaction du C₄AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance. L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

Il se forme du C₄(AF)H₁₃ et du C₃(AF)H₆ par conversion. En présence du gypse, il se forme de l'ettringite, puis du mono sulfoaluminate lorsque le gypse est épuisé.



I.5.5 L'oxyde de Magnésium MgO et la chaux libre CaO

Combinées, peuvent en contact avec l'eau provoquer des expansions de volume en s'hydratant après la prise. La chaux libre (CaO) est limitée de 0.5 à 1.5%.

I.5.6. Représentation du mécanisme de prise et du durcissement [12]

Le ciment durci est une véritable "roche artificielle" qui évolue dans le temps passant par trois phases :

◆ Phase dormante

Où la pâte pure (ciment et eau) reste en apparence inchangée pendant un certain temps (de quelques minutes à quelques heures suivant la nature du ciment). En fait, dès

le malaxage, les premières réactions se produisent; mais sont ralenties grâce aux ajouts de gypse.

◆ Début et fin de prise

Après une ou deux heures pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité. C'est le début de prise, qui est accompagné d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide.

◆ Durcissement

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très lentement; mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle.

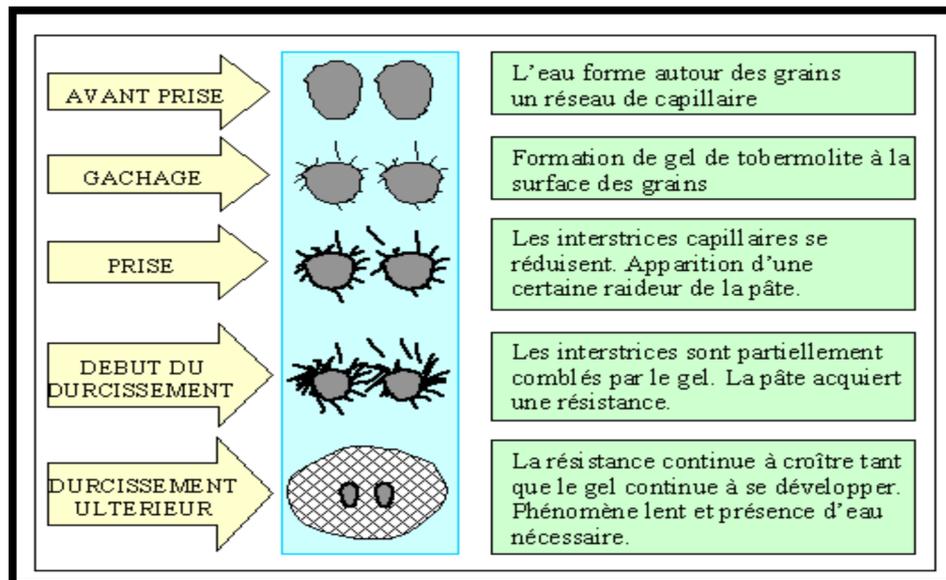


Figure I.10 Les phases de l'hydratation. [7]

◆ Fausse prise

Les phénomènes de la fausse prise (raidissement très rapide de la pâte empêchant la mise en place) sont généralement expliqués par une rigidification de la pâte due à la formation de gros cristaux entre les grains de ciment.

I.5.7 Cinétique et chaleur d'hydratation [7]

Les minéraux du ciment présentent des vitesses d'hydratation différentes. C_3A et C_3S s'hydratent plus vite que C_4AF et C_2S . La réaction d'hydratation du ciment portland est exothermique, la quantité de chaleur dégagée par hydratation d'un gramme de ciment portland à 28 jours est de 400 – 500 joules qui se répartissent de la manière suivante, entre les silicates et les aluminates, étudiés séparément. Le premier signal correspond aux réactions immédiates entre le C_3S et l'eau (adsorption des molécules d'eau), le second effet thermique traduit la précipitation de $Ca(OH)_2$ et C-S-H.

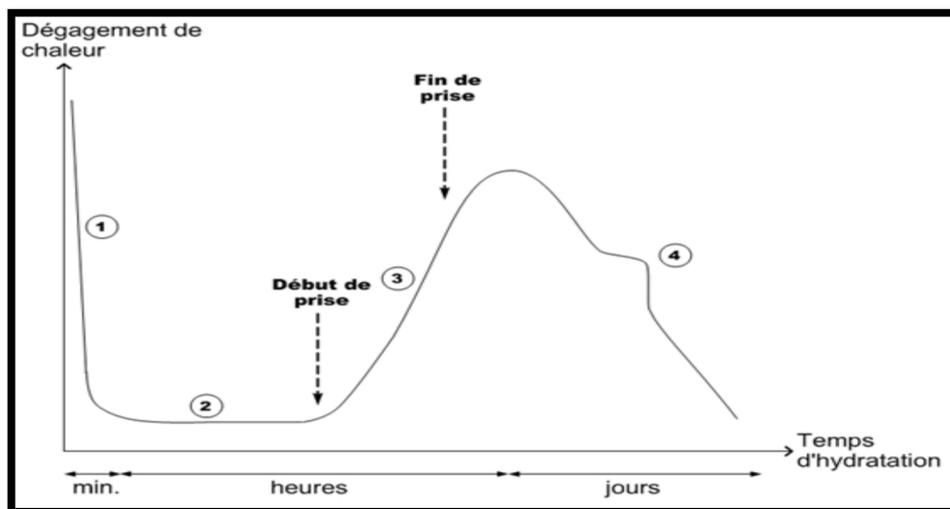


Figure I.11: Courbe typique de calorimétrie isotherme d'un Ciment [7]

◆ Période 1 : Réactions initiales

Cette période débute dès le contact entre l'eau et le ciment et dure quelques minutes. Le C_3S et le C_3A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'ettringite et des C-S-H (métastables). Cela correspond donc à une phase de dissolution. Les ions entrent en solution.

◆ Période 2 : Période dormante

Durant cette période, des ions Ca^{2+} et OH^- sont libérés. Ceci augmente alors le pH de la solution, ralentissant la dissolution des constituants. Le dégagement de chaleur est alors faible. Cette période correspond à la phase durant laquelle le béton est maniable.

◆ Période 3 : période d'accélération

Cette période débute lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- de la solution devient critique, la conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (ettringite, portlandite, C-S-H). Cette grande activité chimique dégage beaucoup de chaleur, augmentant la température du matériau. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer permettant alors la création d'un solide rigide. La prise du béton se situe donc dans cette période. Elle correspond au moment où le béton passe de sa phase liquide à sa phase solide, c'est-à-dire qu'un chemin continu de particules liées mécaniquement traverse le solide.

◆ Période 4 : période de ralentissement

Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. Pour que l'hydratation se poursuive, il faut que l'eau diffuse à travers les pores de gel. Ainsi, cette période se traduit sur la courbe par une diminution de la chaleur dégagée. Si le réseau poreux est fermé, une partie du ciment n'est jamais atteinte et donc ne sera jamais hydratée. De plus la quantité d'eau au départ doit être suffisante pour hydrater tout le ciment. D'après Van Breugel (2001), la valeur critique est. $(E/C)_{\text{crit}} \approx 0.4$.

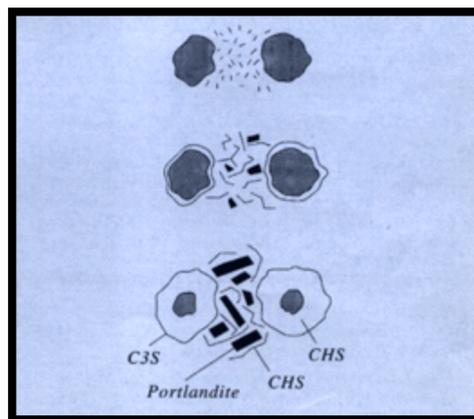


Figure I.12 : Les hydrates. [7]

I.6 PROPRIETES TECHNIQUES DU CIMENT PORTLAND [9]

- La résistance mécanique
- La consistance normale
- La prise du ciment
- L'uniformité de la variation volumique
- La chaleur d'hydratation
- Le retrait et le gonflement

CONCLUSION

A la fin de l'hydratation du ciment, les principaux produits hydratés sont :

- Les silicates de calcium hydraté ou C-S-H, généralement amorphes dont le ration Ca/Si varie, ils contiennent 60 à 70% en masse d'une pâte de ciment hydratée.
- L'hydroxyde de calcium ou Portlandite $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, représente 5 à 15% en masse d'une pâte de ciment hydratée.
- Les sulfo-aluminates de calcium, l'ettringite et le monosulfate constituent 20 à 30% de la masse totale.

Les proportions citées ci-dessus correspondent aux CPA-CEM I, dans les autres classes de ciments, elles peuvent être très différentes compte tenu des différents ajouts minéraux (laitier, cendres volantes, fumée de silice, les tufs . . .).

L'idéal serait de pouvoir transformer **CH** en **CSH** ou **CAH**. Pour cela, on recherche des sous-produits dont la constitution chimique apportera des oxydes (SiO_2 et Al_2O_3) pour réagir avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

On utilise alors :

- des laitiers de haut fourneau trempés, pouzzolanes et des ajouts calcaires.

Les réactions d'hydratation du ciment et de la pouzzolane donnent:



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

- La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide.
- Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires.

CHAPITRE II

LES AJOUTS MINÉRAUX

II.1 GENERALITES

On peut fabriquer des bétons en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts minéraux lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance.

La plupart des ajouts minéraux ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C_2S et du C_3S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland (N F P 18-508). On peut écrire donc une réaction pouzzolanique de la façon simple suivante :



L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C_2S et du C_3S (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux contribue à la chute de résistance de la pâte de ciment hydratée. Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau, ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte de ciment.

Le seul aspect positif de la présence de chaux dans un béton est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures d'acier. [17]

Quand on fabrique des bétons, si on utilise 20 à 30% de pouzzolane, théoriquement, on pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment portland pour la transformer en C-S-H. Cependant, les conditions dans lesquelles on utilise le béton sont très différentes de cette situation idéale et la réaction pouzzolanique n'est jamais complète. [3]

Ces matériaux étant des sous-produits industriels, leurs compositions chimiques sont en général moins bien définies que celle du ciment Portland.

II.2 CLASSIFICATION DES AJOUTS CIMENTAIRES [7,15]

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs. Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau(II.1) ci-dessous :

Tableau II.1.Classification des ajouts selon leur réactivité. [7]

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

En principe les matériaux hydrauliques, hydrauliques latentes et pouzzolaniques contiennent les mêmes composants chimiques. Les proportions sont toutefois différentes.

Ceci est représenté dans le diagramme de phases suivant (figure II.1) :

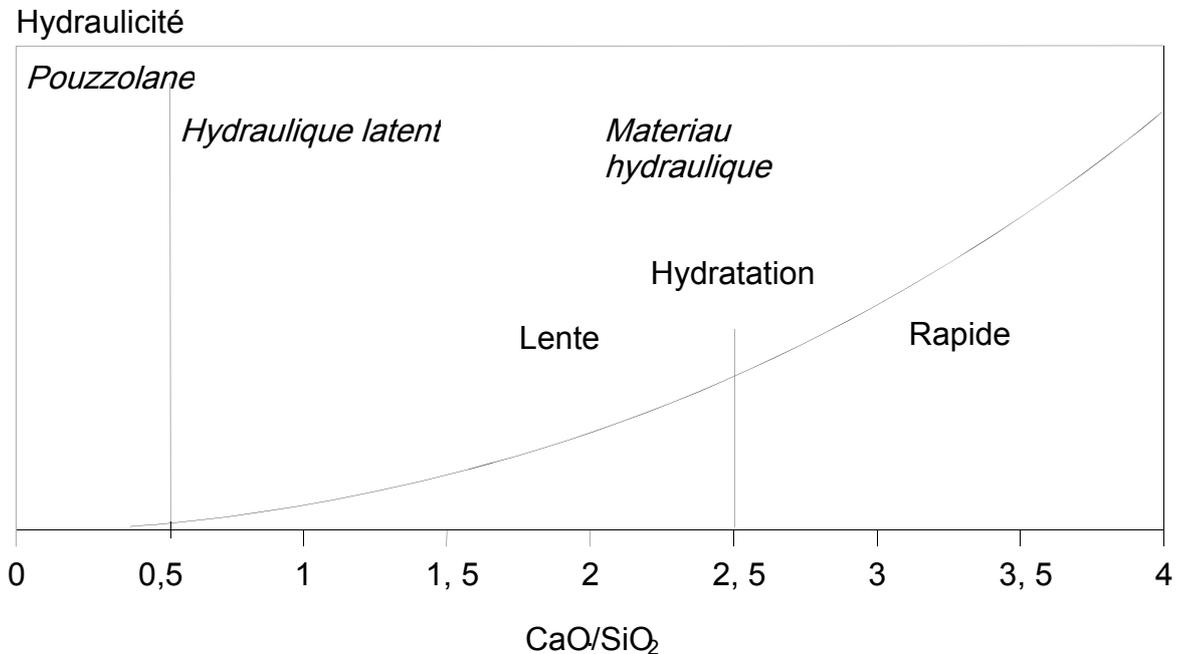


Figure II.1 Diagramme de wesche pour la classification des ajouts minéraux.

[15]

La classification est basée sur le calcul du rapport CaO/SiO_2 .

✦ **Les liants hydrauliques** : sont des matières qui durcissent dans et avec de l'eau et qui sont ensuite insolubles dans l'eau (ciment Portland, chaux hydraulique)(Ils forment des composés hydratés stables qui sont très peu solubles dans l'eau). Par suite de la présence de phase semblable à celles qu'on trouve dans le clinker.

✦ **Les substances hydrauliques latentes** : contiennent moins d'oxyde de calcium que le ciment portland et ne réagissent de fait pas avec l'eau. Ce n'est que lorsque le ciment Portland a formé suffisamment d'hydroxyde de calcium que le laitier et les cendres volantes riches en chaux peuvent être rendues hydrophobes dans le milieu alcalin. On obtient alors les mêmes produits hydratés que le ciment Portland, seules les proportions sont différentes. Dans cette procédure, l'hydroxyde de calcium intervient en qualité d'activateur et non de partenaire réactif.

✦ **Les substances pouzzolaniques** : Une addition pouzzolanique est une addition qui est définie du point de vue chimique comme étant un matériau siliceux ou un matériau siliceux et alumineux qui ne possède par lui-même aucune ou à peu près aucune valeur liante. Mais elles peuvent former à température ordinaire, en présence d'eau et par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables (combinaison à T° ordinaire de la chaux avec de l'eau : formation lente des constituants analogues à ceux du clinker et composés hydratés),

✦ **Les substances inertes** : ne réagissent pas avec les composants du ciment. La substance inerte la plus importante est la poudre de chaux, utilisée comme substitut de matériaux fins. L'adjonction de fibres améliore le comportement à la rupture du béton. Les pigments sont utilisés pour l'aspect esthétique.

II.3 LES DIFFERENTS TYPES D'AJOUTS

II.3.1 Les fumées de silice [18]

Les fumées de silice sont un sous-produit de la fabrication du silicium ou de différents alliages de ferrosilicium. Les fumées de silice sont produites lors de la réduction d'un quartz très pur par du charbon dans un four à arc, à la température de 2000°C.

Les fumées de silice se présentent sous forme de fines particules sphériques d'un diamètre moyen d'environ 0,1 µm. Leur teneur en silice vitreuse varie de 75 % à 95%.

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive (réaction pouzzolanique très rapide) à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Elles accélèrent également les réactions d'hydratation des phases du clinker, et aussi elles diminuent la perméabilité du ciment et augmentent d'une manière générale les propriétés de résistances mécaniques des pâtes.

Dans le béton frais les fumées de silice induisent les effets suivants [18] :

- Faible tendance au ressuage,
- Meilleure cohésion interne,
- Bon pouvoir de rétention d'eau.

II.3.2 Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles – ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables. [6]

Du point de vue minéralogique les cendres volantes se divisent en deux catégories : Les cendres volantes peuvent être de nature siliceuse ou calcaire. Les premières présentent uniquement des caractéristiques pouzzolaniques, celles de nature calcaire peuvent en outre posséder des caractéristiques hydrauliques, ces dernières consistant pour l'essentiel en CaO réactif, SiO_2 , et Al_2O_3 .

Les particules de cendres volantes se présentent sous forme de petites sphères de diamètre allant de $1\ \mu\text{m}$ à $100\ \mu\text{m}$ ($50\ \% < 20\ \mu\text{m}$). La forme et la granulométrie des cendres volantes ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais. [6]

➤ Effet des cendres volantes [10]

- Consistance plastique et ouvrabilité améliorée à cause de sa forme sphérique.
- Le remplacement du ciment par des cendres volantes dans le béton réduit de façon significative la chaleur d'hydratation.
- Réduction du ressuage Le béton aux cendres volantes n'a besoin que d'une faible quantité d'eau pour assurer son ouvrabilité. Par conséquent, il en résulte moins de ressuage.
- Démoulage amélioré.
- Réduit les risques de ségrégations.
- Améliore les performances mécaniques à longs termes.
- Diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides.
- Améliore la durabilité en milieux agressifs.

II.3.3 Le laitier de haut fourneau

Le laitier est un sous-produit de la transformation du minerai de fer dans un haut fourneau en fer plus pur. Durant cette transformation, le laitier en fusion flotte sur la fonte en fusion et est granulé au cours d'un refroidissement rapide par trempe dans de l'eau ou par un procédé de pelletisation, pour produire un matériau vitreux s'apparentant à du sable et qui est caractérisé par une réactivité hydraulique. Ce matériau est ensuite broyé à une finesse de moins de 45 μm pour former du laitier granulé de haut fourneau (LGHF), également appelé ciment de laitier, ou est utilisé comme ingrédient dans la fabrication de ciments composés. En présence d'eau et d'un activateur, l'hydroxyde alcalin (du NaOH ou du KOH) ou du $\text{Ca}(\text{OH})_2$, fourni par le ciment Portland, le laitier granulé s'hydrate et prend de la même manière que le ciment Portland, pour fournir une pâte plus dense, plus résistante et moins perméable que celle produite par la seule utilisation du ciment Portland. Le laitier présente des propriétés tant pouzzolaniques qu'hydrauliques. [16]

II.3.4 Les pouzzolanes

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels utilisées dans la fabrication du ciment. Il s'agit d'une matière siliceuse ou silico-alumineuse. Les pouzzolanes capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédantes des propriétés liantes. [13]

Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

➤ **Pouzzolane naturelle**

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique. Elle peut être d'origine volcanique: verre Volcanique, ponce, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomées, diatomites.

➤ **Pouzzolane artificielle**

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

distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que le mach fers , cendre de bois ou d'houille , soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures des températures modérées.

✦ **Effet de La pouzzolane [13]**

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

• **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.

• **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 très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces.

II.3.5 Les tufs

Les tufs ont connu une large utilisation depuis de longues années. En effet, les blocs de croutes ou les pierres de tufs retirés des champs par les agriculteurs ont été utilisés dans la construction des murs et dans l'empierrement des chemins.

En Algérie, le matériau tuf est très abondant, bien réparti géographiquement et d'exploitation facile.

Un tuf volcanique est une roche généralement tendre, résultant de la consolidation de débris volcaniques (La cendre volcanique), généralement de taille inférieure à quatre millimètres, sous l'action de l'eau. [13]

La cendre volcanique désigne les fines particules de roches et de minéraux inférieures à deux millimètres de diamètre, qui sont éjectées d'un volcan. Ces particules sont si fines qu'elles peuvent voyager sur des centaines de kilomètres et retomber sur le sol sous forme de pluie de cendre.

Lorsque ces cendres sont éjectées en grande quantité elles ont tendance à se cimenter pour former une roche que l'on nomme tuf.

Sa couleur est d'un brun rouge ou jaunâtre avec des taches orangées. La texture de cette pierre, qui est assez résistante, approche de celle de la pierre ponce. À toutes les époques de Rome elle a été fort employée dans les constructions et en blocs de dimensions diverses. [4]

C'est un produit composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer qui présentent naturellement des propriétés pouzzolaniques. Ils forment dans l'eau de chaux c'est-à-dire en présence d'eau et d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) des composés silicates ou aluminates semblables à ceux formés lors du durcissement des matières hydrauliques (réaction pouzzolanique lente). [4]

Le tuf est une pouzzolane très réactive (teneurs élevées en silice et en alumine entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble, puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux) ce qui lui donne l'aspect chimique de fixation de la chaux. il offre au béton frai les propriétés prescrite déjà dans les paragraphes précédents. [18]

II.4 EXIGENCES RELATIVES D'UTILISATION DES POUZZOLANES

Selon la norme ASTM, pouzzolanes naturelles peuvent être utilisés comme ajout dans le ciment portland s'ils démontrent spécifiques exigences chimiques et physiques, comme indiqué dans le tableau II.2. Ces exigences imposent des restrictions inappropriées sur certains types de pouzzolane qui ont été montré pour fournir une performance adéquate à faible coût de la construction.

Tableau II.2: ASTM C618-89 Exigences relatives à un type N pouzzolane pour utilisation comme ajout au béton de ciment Portland. [13]

SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	>70,0 %
SO ₃ ;	< 4,0 %
La teneur en humidité ;	< 3,0 %
Perte au feu	< 10 ,0 %
Montant retenu, humide tamis sur 45µm tamis	< 34 %
Indice d'activité pouzzolanique, du ciment Portland, moins 28 jours	> 75 %
Indice d'activité pouzzolanique, avec de la chaux, au moins (MPa)	5,5 %
Besoins en eau,	115 %
L'expansion ou la contraction Autoclave	< 0,8 %
Poids spécifique, la variation maximale de la moyenne,%	5 %
Le refus sur un tamis 45 µm	5 %
EXIGENCES EN OPTION	
Augmentation du retrait de séchage des barres de mortier moins 28 jours	< 0,03 %
Réduction de la dilatation de mortier à 14 jours dans une solution alcaline essai d'expansion	>75 %
L'expansion de mortier à 14 jours à l'essai d'expansion alcalin maximal %	0,020 %

II.5 L'INTERET DE L'UTILISATION DES AJOUTS MINERAUX DANS LE GENIE CIVIL

L'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

➤ Intérêts du point de vue technique [10]

L'intérêt technique des ajouts réside en premier lieu ; dans le fait qu'ils permettent l'obtention d'un ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles d'un CPA (ciment Portland). Parfois la chute de résistance à court terme limite leur utilisation en préfabrication. Le remplissage des vides est lui-même aussi responsable de la durabilité du mortier ou béton obtenu.

Certains avantages techniques que présente l'utilisation des pouzzolanes dans le béton ne peuvent pas être atteints lorsqu'un CPA est utilisé seul. Parmi ces avantages, mentionnons une plus grande ouvrabilité, une maniabilité accrue, une meilleure étanchéité à l'eau (l'ajout rend le béton plus compact), une réduction de la chaleur d'hydratation et des risques de fissuration sous l'effet de l'action thermique et une plus grande durabilité au milieu sulfaté ou acide.

➤ Intérêt du point de vue économique

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker diminue en fonction des pourcentages de l'ajout incorporé. En effet, le clinker étant obtenu par transformation du cru (argile + calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction de cet ajout. La réaction pouzzolanique étant à base de produits de faible coût et la durabilité est garantie puisque les romains utilisaient déjà ce mécanisme chimique dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve depuis de nombreux siècles. [7]

Des sous-produits industriels tels que les cendres volantes et fumées de silice condensées sont de plus en plus utilisées dans les pays industrialisés parce qu'ils sont des déchets d'usine. Contrairement aux pouzzolanes naturelles, il n'est pas nécessaire de les pulvériser ou de les soumettre à un traitement thermique avant de s'en servir. Plusieurs pays comme la Chine, la Grèce, l'Italie, l'Inde et le Mexique, utilisent encore des millions de tonnes de pouzzolanes naturelles pour fabriquer des ciments Portland composés. Pour des raisons d'épargne d'énergie, il y a tout lieu de croire que l'utilisation de ces matériaux se poursuivra et se développera de plus en plus. [10]

➤ Intérêts du point de vue écologiques et environnementaux [3,13]

- diminution de l'émission du CO₂ par l'industrie cimentière.
- élimination des sous-produits de la nature.

Selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO₂. Il est responsable d'environ 5% des émissions de ce gaz sur la planète. Cette situation doit être prise au sérieux car le béton est appelé à jouer un rôle de plus en plus important dans le développement et le maintien de l'activité humaine. L'utilisation de résidus industriels récupérés et recyclés, tels que les ajouts cimentaires et les gisements de ressources naturelles tels que la pouzzolane et le calcaire, comme produits de remplacement partiel du ciment Portland dans le béton, permet de réduire les émissions des gaz à effet de serre et se traduit par la fabrication d'un béton non polluant et durable sur le plan environnemental. La minimisation de l'élimination de ces résidus industriels et la diminution de la demande en ressources présente généralement une durée de vie plus longue que le béton « traditionnel ».

II.6 L'UTILISATION DES AJOUTS EN ALGERIE

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El-Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf. Le tableau (II.3) donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes. [11]

Tableau II.3 Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [11]

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
ERCE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El Kebira	
	Hamma Bouziane	
	H'djarEssaoud	Laitier
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	Sour EL Ghozlane	
ECDE	Chlef	Calcaire/Tuf
ERCO	Beni Saf	Calcaire
	Zahana	Pouzzolane
	Saida	

CHAPITRE III

LES CIMENTS AVEC AJOUTS

III.1 DEFINITION D'UN CIMENT AVEC AJOUT MINERAL

Ciment obtenu en ajoutant au clinker (entre 65 et 94 %), avant broyage, d'autres composants tels que du laitier, des pouzzolanes, des schistes calcines, des cendres volantes, etc. D'un cout moindre que le ciment Portland, il convient bien pour tous les travaux courants de maçonnerie et de béton arme ou précontraint et pour les travaux massifs exigeant une élévation de température modérée mais craint les eaux agressives.

[4]

III.2 COMPORTEMENT D'UN CIMENT AVEC AJOUT MINERAL :

Le comportement du ciment avec ajout minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout. [14]

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

Les substances hydrauliques latentes contiennent moins d'oxyde de calcium que le ciment Portland et ne réagissent de ce fait pas avec l'eau. Dans cette procédure, l'hydroxyde de calcium intervient en qualité d'activateur et non de partenaire réactif. Les substances pouzzolaniques ne contiennent encore moins, voire pas d'oxyde de calcium. L'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment Portland n'intervient pas, par conséquent, uniquement en qualité d'activateur, mais il est nécessaire en tant que réactif.

Les substances pouzzolaniques peuvent réagir fortement, moyennement ou faiblement contribuant ainsi plus ou moins à la résistance et à l'étanchéité du béton.

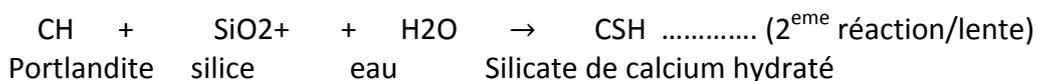
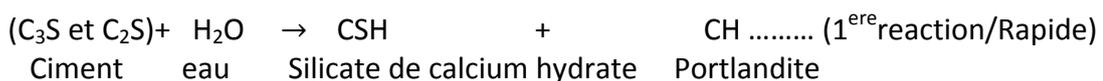
Les ajouts présentent une activité liante croissante avec leur quantité, leur finesse, leur composition minéralogique et le type de ciment influe également. En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance. [7,11]

III.3 CHIMIE D'HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND AVEC AJOUT ET REACTION POUZZOLANIQUE

III.3.1 Définition

Les différents ajouts minéraux affectent la cinétique de la réaction d'hydratation en raison de leur composition chimique. La réaction pouzzolanique se produit par consommation de portlandite. [13]

Les réactions d'hydratation du ciment et des pouzzolanes donnent :



Les réactions d'hydratation du ciment et de la pouzzolane peuvent être considérées séparément, bien que dans une certaine mesure elles se produisent en même temps. En fait la réaction pouzzolanique, qui est plus lente que la réaction d'hydratation du ciment, peut avoir lieu seulement après l'hydrolyse de C_3S et de C_2S qui forment l'hydroxyde de calcium. Il est à noter que la première est une réaction de production de chaux, tandis que la dernière est une réaction de consommation de chaux (figure III.1). [7]

En ce qui concerne la réaction pouzzolanique, puisque les composants principaux sont SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et CaO , les produits de l'hydratation du ciment pouzzolanique sont semblables à ceux de l'hydratation du ciment Portland, ces produits sont le silicate

de calcium hydraté (CSH) et l'aluminate de calcium hydraté (CAH) qui sont les produits de la réaction entre la silice et l'alumine de la pouzzolane avec l'hydroxyde de calcium. [11]

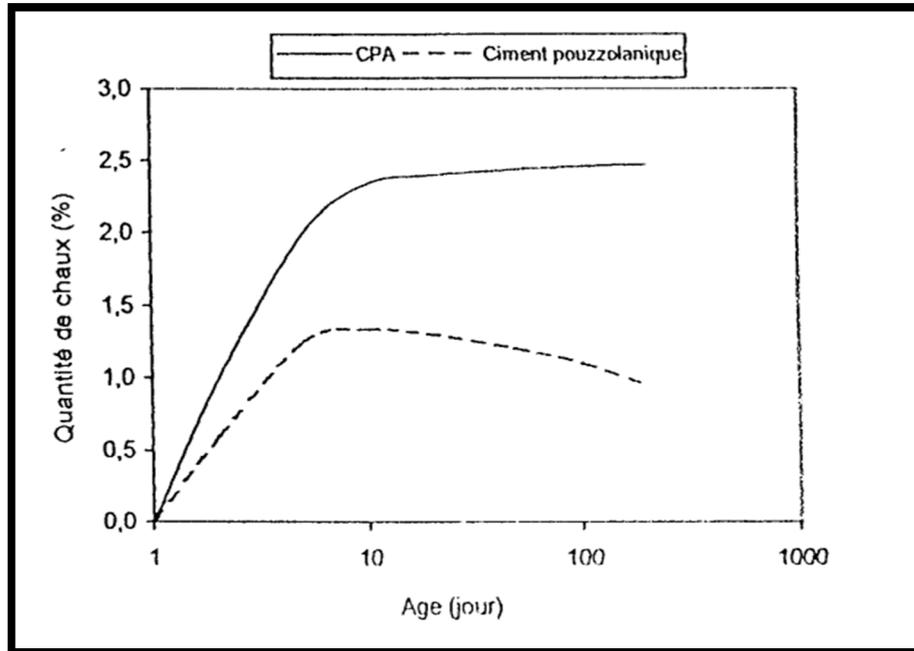


Figure III.1 : Changement de la quantité de chaux d'un ciment pouzzolanique hydraté[11]

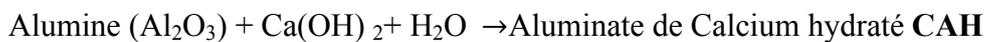
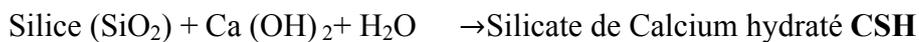
Les bétons dans lesquels des pouzzolanes remplacent une partie du ciment portland témoignent d'un développement de la résistance plus lent que les bétons avec clinker portland, et d'un plus fort durcissement ultérieur en prenant de l'âge, et exige un apport d'humidité suffisant pendant plus long temps. [3]

Parmi les facteurs qui caractérisent l'influence des pouzzolanes sur les propriétés du ciment et du béton durci. La réaction relativement lente, la consommation d'hydroxyde de calcium et l'action sur la structure poreuse de la pâte de ciment durcie.

Les pouzzolanes sont composées de mêmes principaux oxydes que le ciment portland, mais de proportions et composition minéralogique différentes. Ils ont une teneur élevée en dioxyde de silicium, ou en dioxyde de silicium et oxyde d'aluminium combinés et ils sont pauvres en CaO , ce qui le contraire pour le ciment portland. Par conséquent, l'hydroxyde de calcium est produit de CaO en excès durant l'hydratation du CPA et sert comme la principale source d'alcalinité pour l'activité pouzzolanique, pour la conversion de SiO_2 de la pouzzolane en C-S-H. L'alcalinité du béton est due à Ca(OH)_2 créée par l'hydratation du ciment portland. [7,13]

Au cours de l'hydratation du ciment portland ; il se forme sur chacun des grains une couche de produits d'hydratation qui devient de plus en plus épaisse ; alors que l'hydroxyde de calcium également formé se sépare partiellement de la solution interstitielle, sous forme de cristaux hexagonaux en paillettes. La situation est différente en présence de pouzzolanes. Le point de départ des réactions est aussi l'hydratation du clinker de ciment portland, avec la formation de silicate de calcium hydraté (CSH) et d'aluminate de calcium hydraté (CAH).

Les constituants peuvent se combiner avec la chaux en présence de l'eau pour donner des produits insolubles possédant des propriétés liantes. [10]



III.3.2 Chaleur d'hydratation

Le ciment à la pouzzolane a un développement de chaleur lent sous les conditions adiabatiques que le ciment portland, ce qui est bénéfique pour protéger le jeune béton de l'apparition des fissures thermiques.

La forme de courbes de l'évolution de la chaleur dépend fortement de l'activant utilisé, le verre soluble est le meilleur activant, il accélère le processus de l'évolution de la chaleur, qui signifie l'occurrence rapide de l'hydratation pendant les quelques premières heures du traitement thermique.

III.3.3 Rôle de la taille des grains des granulats et de la température dans la réaction Pouzzolanique

III.3.3.1 Rôle de la taille des grains des granulats (la finesse)

- Incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse).
- Amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton.
- Diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique. [14]

III.3.3.1 Rôle de la température dans la réaction pouzzolanique

L'expérience montre que l'expansion diminue à des températures supérieures à 40°C [GUDMUNDSSON et coll.1975; BROCHTI, 1978] et on sait que les températures élevées telles que 70 à 90°C attribuent la résistance aux ajouts pouzzolaniques [MASSAZZA et coll., 1980]. Ceci peut s'expliquer par le mécanisme de concurrence entre le taux de dissolution de silice et celui de la cristallisation des C-S-H. L'accélération de la vitesse de cristallisation des C-S-H à températures élevées semble être plus importante que celle de la dissolution de la silice [14]

III.3.4 Estimation de l'activité pouzzolanique

L'estimation de l'activité pouzzolanique de l'ajout est déterminée par plusieurs méthodes connues. Citons quelques-unes [13] :

- Méthodes physiques : les tests mécaniques sur éprouvettes de mortier et béton à base de ciment ou sur des mortiers à base de chaux.
- Déterminations chimiques : testes chimiques de consommation de chaux.

III.3.5 Méthodes d'activation de la réaction pouzzolanique [13]

Le ciment avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout. Ce type de ciment (CPJ-CEM II) présente un temps de prise un peu plus long que le ciment ordinaire (CPA-CEM I), surtout dans le cas de bétonnage par temps froid. Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral (C.P.J-C.E.M II), nécessite l'emploi d'un bon activant, chimique (utilisation des solutions alcalines qui modifient la prise et le durcissement), mécanique (broyage poussée du liant hydraulique) ou thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température).

➤ Activation chimique

Généralement le liant hydraulique (C.P.J ciment portland composé) est activé par différentes solutions alcalines, telles que l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'hydroxyde de potassium (KOH) à différents pourcentages en faisant varier la molarité de la solution basique.

Les activant chimiques (accélérateurs de prise et de durcissement) utilisés sont des produits solubles dans l'eau.

Ils agissent chimiquement en modifiant les vitesses de dissolution des constituants anhydres et en accélérant l'hydratation des grains de ciment. La prise est alors plus rapide et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important.

➤ **Activation thermique**

L'activation thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température) consiste à conserver le matériau (éprouvette) dans une étuve à vapeur à différentes températures de cure 20°C, 40°C et 60°C pendant 7 jours. Ensuite, il sera mis dans un bassin d'eau à une température de 20 °C jusqu'à la date de l'essai mécanique programmé (7, 14 et 28 jours).

➤ **Activation mécanique**

L'activation mécanique consiste à augmenter la finesse (surface spécifique) du ciment par broyage poussée. Le broyage a pour but de réduire les éléments en une poudre suffisamment fine afin de rendre la matière plus réactive.

III.3.6 Propriétés des mortiers et béton renfermant des pouzzolanes

Parmi les propriétés apportées dans les mortiers et bétons à base de ciment Portland-pouzzolane, mentionnant un ralentissement du taux de prise et de durcissement, un accroissement de la résistance finale, une baisse de la chaleur d'hydratation et une bonne amélioration du rendement en milieu acide.

a) Temps de prise [7]

L'incorporation d'un ajout pouzzolanique au ciment Portland entraîne une diminution du temps de prise attribuable à la finesse de mouture des grains de l'ajout par différence de dureté avec le clinker et à la nature des composants chimiques.

b) Chaleur d'hydratation [7]

D'après les travaux de Massazza et Costa ont montrés que l'addition d'une pouzzolane dans un ciment Portland entraîne une nette diminution de la chaleur d'hydratation. La capacité des ajouts pouzzolaniques dans le ciment Portland de diminuer la chaleur d'hydratation est largement exploitée dans les constructions en béton de masse (barrage de Jupia Dam au Brésil 1962), ou les risques de fissuration attribuables à une variation thermique peuvent constituer un grave problème.

c) Développement des résistances [18]

De même les travaux de Massazza et Costa confirment la lenteur de la réaction chimique entre la pouzzolane et la chaux (hydroxyde de calcium). Ils concluent que les ciments à la pouzzolane présentent au début une résistance moindre que celle du ciment Portland de référence. La résistance finale (à long terme) peut se révéler supérieure, selon la qualité et la quantité de l'ajout pouzzolanique utilisé dans le ciment. Cette augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de C-S-H.

Il s'avère aussi qu'on ne doit pas dépasser certain dosage en ajout pouzzolanique (à condition d'optimiser la quantité d'ajout).

d) Durabilité [18]

Par rapport au ciment Portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité, et à une diminution de la quantité de CH. Les sulfates peuvent détruire le béton en se combinant avec les aluminates du ciment pour former de l'ettringite expansive.

CONCLUSION

L'utilisation des ajouts cimentaires dans l'industrie de fabrication des ciments sont de plus en plus utilisés pour la confection des matériaux cimentaires (mortier et béton) pour plusieurs raisons, soit écologiques, soit économiques, soit pour améliorer certaines propriétés à l'état frais ou durci.

ETUDE

EXPERIMENTALE

I. CARACTERISATION DES MATERIAUX

II. METHODES D'ESSAIS ET NORMES

III. RESULTATS ET INTERPRITATIONS

CHAPITRE I

CARACTERISATION DES MATERIAUX

I.1 LES AJOUTS MINERAUX

Le pourcentage d'ajout du ciment utilisé est inférieur à 35 % conformément à la norme NF-EN-197-1 qui stipule que les ciments composés «CPJ-CEM II» doivent contenir au minimum 65% de clinker.

I.1.1 Les tufs

Le tuf utilisé dans notre étude expérimentale comme ajout provient du gisement sis à Douar Ben Aicha-Thenia wilaya de Boumerdes. Cet ajout est fourni sous forme de roches concassées de diamètres variant de 5 à 10 mm. Pour pouvoir le substituer au ciment CPA de Aine Kebira, nous avons procédé à son broyage puis passé au tamisage.

L'ensemble du tamisât du tamis de dimension 0.063 mm est récupéré et utilisé en substitution au ciment à différentes propositions (0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 30%) par rapport au poids massique du ciment.

L'information sur les analyses (les propriétés physiques et la composition chimique) de l'activant minéral (tuf) extrait de la carrière sont données comme suit :

➤ Analyse chimique (voir annexe B)

Tableau I.1 Analyse chimique moyenne (% , en poids) du tuf utilisé fournie par l'exploitant

Oxydes (%)	Fe2O3	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	Na2O	K2O	TiO2	SO3	MnO	PAF
tuf	2.80	61.80	16.49	6.16	0.05	2.44	3.50	<0.05	<0.05	<0.03	7.03

L'analyse chimique effectuée par l'exploitant confirme la nature silico-alumineuse de la roche (teneur importante de SiO₂). Tant disque la teneur en CaO et MgO et minime, ce qui implique que le tuf utilisé est un matériau pouzzolanique.

➤ Caractéristiques physiques (voir annexe B)

Tableau I.2 Caractéristiques physique de tuf utilisé dans cette étude

échantillon	Humidité naturelle(%)	Masse volumique (g/cm ³)	Masse spécifique (g/cm ³)	Porosité totale(%)	Absorption d'eau(%)
tuf	14.45	1.35	2.34	42.51	8.10

I.1.2 Les cendres volantes et le laitier

Les analyses des compositions chimiques et minéralogiques moyennes des cendres volantes et laitier utilisées dans nos essais expérimentaux issus d'Allemagne, sont effectués au laboratoire de matériaux de construction à Weimar en Allemagne

La composition chimique est indiquée dans le Tableau I.3 et I.4 (voir annexe B)

Tableau I.3: Composition chimique du laitier.

Composantes chimique		Pourcentage (%)
1	TV100 C	0.1
2	GV1000 C	0.3
3	SiO ₂	36.6
4	Al ₂ O ₃	11.1
5	Fe ₂ O ₃	0.3
6	CaO	39.4
7	MgO	10.2
8	MnO	0.36
9	TiO ₂	0.53
10	K ₂ O	0.43
11	Na ₂ O	0.41
12	SO ₃	0.5
13	s-	1.36
14	Cl	0.006
15	CaO libre	0.0
16	K ₂ O soluble dans l'eau	0.02
17	Na ₂ O soluble dans l'eau	0.02
Somme		101.6

On remarque d'après le tableau I.3 que la teneur en CaO, MgO et Al₂O₃ est importante, ce qui lui offre les caractéristiques d'un matériau hydraulique latent.

La teneur en alcalins (K₂O et Na₂O) et la chaux libre est presque nulle donc y a pas de risque de gonflement.

Tableau I.4 : Composition chimique des cendres volante. (Voir annexe B)

Composantes chimique		Pourcentage (%)
1	TV100 C	0.1
2	GV1000 C	2.8
3	SiO ₂	53.6
4	Al ₂ O ₃	24.9
5	Fe ₂ O ₃	7.6
6	CaO	2.9
7	MgO	1.8
8	MnO	0.08
9	TiO ₂	0.97
10	K ₂ O	3.25
11	Na ₂ O	0.74
12	SO ₃	0.4
13	Cl	0.003
14	CaO libre	0.0
15	K ₂ O soluble dans l'eau	0.12
16	Na ₂ O soluble dans l'eau	0.06
Somme		99.14

On remarque d'après le tableau I.4 que la cendre utilisée dans notre étude expérimentale est une cendre siliceuse. Elle est riche en SiO₂ amorphe et pauvre en CaO. Elle est considérée comme pouzzolanique.

Comme dans le cas du laitier, La teneur en alcalins (K₂O et Na₂O) et la chaux libre est presque nulle donc y a pas de risque de gonflement.

I.1.3 Classification des ajouts cimentaires selon leur degré de réactivités

On se réfère à la figure I.1 du chapitre II de la partie bibliographique on a :

La classification se base sur le calcul du rapport CaO/SiO₂.

Tableau I.5 Classification des ajouts

L'ajout cimentaire	Le rapport CaO/SiO ₂ .
Tuf	0.099
laitier	1.076
Cendres volantes	0.054

On remarque d'après le tableau I.5 que :

- Le tuf est un matériau pouzzolanique.
- Le laitier un matériau hydraulique latent.

- Les cendres volantes sont des matériaux pouzzolaniques.

Exigences chimiques et physiques d'utilisation d'une Pouzzolane

◆ Exigences chimiques

La condition à satisfaire est la suivante :

La somme des SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70$, on se réfère au tableau I.2 du chapitre. II de l'étude bibliographique.

Tableau I.6 Exigences chimiques d'utilisation d'une pouzzolane.

L'ajout cimentaire	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$
Tuf	81.09
laitier	48
Cendres volantes	86.1

On remarque d'après le tableau que : le tuf et les cendres volantes répondent à la spécification de la norme ASTM C618-89. Tant dis que le laitier ne répond pas aux spécifications de la norme ce qui implique qu'il n'est pas un matériau pouzzolanique.

◆ Exigences physiques

Calcul de l'Indice d'activité pouzzolanique :

L'indice d'activité pouzzolanique est le rapport des résistances à la compression d'éprouvettes normalisées de mortier de même âge à la résistance d'une éprouvette de référence. il doit être $\geq 75\%$.

On a choisi la fraction 5 % par ce que c'est elle qui nous a donner l'optimum.

Tableau I.7 Développement des Indices d'activité pouzzolanique du Mortier à base de sable normalisé.

L'ajout cimentaire	I_a
Tuf	1.01
laitier	0.98
Cendres volantes	1.03

On remarque d'après les résultats que :

$$I_a (\text{cendre volante}) > I_a (\text{tuf}) > I_a (\text{laitier})$$

Les résultats prescrits dans le tableau I.6 montrent que les ajouts cimentaires utilisés dans notre étude expérimentale répondent aux exigences de la norme ASTM C618-89 qui prévoit un minimum d'indice d'activité pouzzolanique de 75 % à 28 jours d'âge

avec le ciment Portland artificiel. Comparant le tuf au laitier et les cendres, on peut déduire que le tuf utilisé a un potentiel pouzzolanique important (Indice d'activité pouzzolanique de 1.01 qui inférieur à celui de laitier et les cendres)

I.2 LE CIMENT

Le ciment utilisé a été ramené de la Cimenterie aine kebira. L'information sur les propriétés physiques. Sa composition chimique est donnée comme suit :

⇒ Classification

Ciment portland CPA – CEMI.CRS 42.5 selon la norme NA 443-2000 de surface spécifique Blaine égale à 3147cm²/g.

⇒ Composition chimique

Les compositions chimique et minéralogique du clinker utilisé sont présentées dans les Tableaux II.8 L'analyse chimique a été effectuée au niveau du laboratoire de la cimenterie de Aine Kebira. Le calcul est basé principalement sur les équations de Bogue ci-dessous qui est largement utilisé dans l'industrie cimentière dans la mesure où il permet d'estimer à partir de son analyse chimique élémentaire des majeurs (calcium, silice, alumine et fer), la composition minéralogique du clinker. Les termes entre parenthèses représentent la proportion de l'oxyde concerné dans la masse totale du ciment.

Formules de Bogue

- $C_3S = 4,071(CaO) - 7,60(SiO_2) - 6,718(Al_2O_3) - 1,430(Fe_2O_3) - 2.85(SO_3)$
- $C_2S = 2.87(SiO_2) - 0.75 \times (C_3S)$
- $C_3A = 2,650(Al_2O_3) - 1,692(Fe_2O_3)$
- $C_4AF = 3,043.(Fe_2O_3)$

Tableau I.8 Composition chimique du ciment (voir annexe B)

éléments %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃ ≤ 3,5	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ≤ 0,1	P.A.F. ≤ 4	CaO Libre	R. Insoluble
clinker	22.20	4.70	4.95	63.24	1.75	1.75	0.28	0.15	0.002	0.97	0.85	0.73

➤ Composition minéralogique du clinker

Le tableau I.9 montre la composition minéralogique déterminée d'après la formule de BOGUE.

Tableau I.9 Composition minéralogique du clinker

Minéraux du clinker	Teneur en % rapportée au clinker	Exigences
Alite (C ₃ S) Silicate tricalcique	47.11	45-70
Bélite (C ₂ S) Silicate bicalcique	26.04	10-30
Célite (C ₃ A) Aluminate tricalcique	4.09	2-15
félite (C ₄ AF) Alumino -ferrite-tétracalcique	15.06	0-15

On remarque d'après le tableau I.9 que la teneur en éléments principaux du ciment utilisé répond aux exigences prescrites dans le tableau I.1. (Chapitre. I de la bibliographie).

- La teneur en C₃S est importante ce qui implique que le ciment se caractérise par une résistance importante à jeune âge.
- La teneur en C₃A est minime, donc y a pas de risque d'expansion.

➤ Facteurs de qualité du clinker

✦ Broyabilité du clinker

D'après le tableau I.10, le clinker de la cimenterie de Aine Kebira à une broyabilité plus facile (plus le coefficient est grand plus la broyabilité demande moins d'énergie) ce qui favorise l'obtention d'une granulométrie plus fine.

Tableau I.10 Coefficient de broyabilité.

Nature du clinker	Clinker d'Aine Kebira
Coefficient de broyabilité	3.81

✦ Qualité du clinker

D'après le tableau I.11, on constate que le coefficient de saturation en chaux vaut 0.89 (proche de 1) donc presque toute la chaux est consommée et par conséquent on obtient

un ciment qui ne présente aucun risque d'expansion .Donc notre clinker est de bonne qualité.

Tableau I.11 Coefficient de saturation en chaux du clinker.

Nature du clinker	Clinker de Aine Kebira
Coefficient de qualité	0.89

I.3 LE SABLE

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du béton et du mortier. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs. Il convient de se méfier de la présence de sables granitiques, de micas en paillettes, d'argiles, de sulfates...et dans le cas de sable concassé: des poussières, des plaquettes, des aiguilles. [12]

Dans notre étude expérimentale, nous avons utilisé un sable normalisé provient S.N.L. - SOCIETE NOUVELLE DU LITTORAL –France- qui se caractérise par une granulométrie continue conformément au fuseau préférentiel prévu par la norme russe ou bien la norme Afnor. Sa courbe granulométrique doit se situer à l'intérieur du fuseau indiqué sur la figure I.1. [10]

Figure I.1 : Courbe granulométrique du sable normalisé selon les normes Afnor. [10]

En vue de son utilisation dans la confection du mortier, le sable doit être soumis à des essais de laboratoire, à savoir l'analyse granulométrique, l'essai de l'équivalent de sable, l'essai au bleu de méthylène et l'analyse chimique. Avant d'exposer les différentes caractéristiques de notre sable, nous tenons à rappeler quelques spécifications des normes françaises concernant les sables. Il est préférable que la courbe granulométrique du sable appartienne au fuseau proposé pour la granularité optimale de sable à béton qui correspond à un module de finesse (MF) compris entre 2.2 et 2.8.

La teneur en sulfates doit être inférieure à 0.2% conformément à la norme NF EN 196-2. La présence de sulfates dans les granulats est à l'origine de réactions expansives dues à la formation d'ettringite.

La norme NF P 18-583. Stipule que le pourcentage des chlorures doit être indiqué par le fournisseur s'il est égale ou supérieure à 0.02%.

Le pourcentage d'éléments coquilliers dans un sable doit être inférieur ou égale à 5% conformément à la norme NF P 18-540. Si les éléments coquilliers sont en trop grandes proportions, ils peuvent diminuer sensiblement les résistances et l'ouvrabilité des bétons.

Le sable normalisé CEN (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité. **[10]**

◆ Analyse chimique du sable normalisé

La composition chimique du sable effectuée et Contrôlé par le Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris (L.E.M.V.P.).les résultats sont illustrés dans le tableau I.12.

Tableau I.12: Analyse chimique du sable normalisé

Eléments	Teneurs (%)
SiO ₂	96,2
Al ₂ O ₃	2.1
Fe ₂ O ₃	0.3
TiO ₂	0.04
P ₂ O ₅	0.02
CaO	0.11
MgO	0.16
K ₂ O	0.75
Na ₂ O	0.12

◆ Caractéristiques physiques (voir annexe B)

L'information sur les propriétés physiques du sable utilisé sont résumés dans le tableau I.13

Tableau I.13 Caractéristiques physiques du sable normalisé utilisé.

Matériaux	Masse volumique Absolue (g/cm ³)	Module d'écoulement finesse (s)	Absorption en eau(%)	Sable
Sable normalisé	2.64 t/m ³	2.65	0.2	28

I.4 L'EAU DE GACHAGE [10]

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du mortier doit être pure que possible elle ne doit pas contenir une quantité excessive de vase, de matières organiques, acides, sels, matière sucrées.

Toutes les eaux ne peuvent être utilisées pour gâcher les bétons et les mortiers, l'eau potable est toujours utilisable, mais dans certains cas l'eau contient des impuretés, ce qui nécessite une analyse chimique pour déterminer les impuretés qui s'y trouvent. Ces

impuretés sont soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis-à-vis du ciment, des granulats ou des armatures, soit des particules en suspension qui sont indésirables.

L'excès d'impuretés détériore les propriétés du béton : les propriétés physiques et mécaniques (prise et résistance), les propriétés esthétiques (tâches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures).

La teneur en chlorures admise ne doit pas dépasser 500mg. Les chlorures peuvent provenir de l'eau de gâchage, du ciment, des granulats et éventuellement de l'adjuvant. Les chlorures en faible proportion peuvent modifier légèrement la prise et le durcissement du ciment, par contre la forte proportion peut réagir avec le ciment et compromettre la durabilité du béton, leurs effets sont néfastes sur les armatures dont la corrosion provoque l'éclatement du béton.

Selon la norme NF P 18.325 la quantité maximale des ions chlorures est fixée aux valeurs suivantes :

- 1% pour les bétons non armés.
- 0.5% pour les bétons armés.
- 0.2% pour les bétons précontraints.
- Les sulfates doivent être inférieurs à 0.1% pour le béton non armé. Ils réagissent avec le ciment pour former de l'ettringite qui s'accompagne de gonflement.
- Les matériaux en suspension doivent être inférieurs à 0.5% de l'eau en masse pour le béton non armé. L'argile en suspension fait diminuer les caractéristiques mécaniques.
- Les matières organiques doivent être inférieures à 0.5% .Les micro algues diminuent les résistances et ont un effet d'entraînement d'air diminuant la compacité.

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau de robinet fournie au laboratoire de MDC de notre Université ce qui nécessite pas de lui faire une analyse chimique.

CONCLUSIONS

Les essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués aux laboratoires donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers qui seront étudiés au chapitre suivant du point de vue mécanique. La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux.

CHAPITRE II

METHODES D'ESSAIS ET NORMES

INTRODUCTION

Dans le but de mettre en évidence l'influence des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques et sur l'activité pouzzolanique des mortiers confectionnés à base du ciment Portland CEMI.CRS.42.5 substitués avec les différents ajouts ; des essais physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques ont été effectués.

II.1 PROCEDURE EXPERIMENTALE

Le plan des essais expérimentaux réalisés comporte les points importants suivants :

II.1.1 Préparation des ciments étudiés (ciment+ les différents ajouts)

Tableau II.1:les ciments substitués.

les différents ciments substitués	Liant Cim+les ≠ ajouts (%)	Ciment(%)	Tuf(%)	Cendre volante (%)	Laitier de H.F (%)
CEM₀₀	100	100	0	0	0
CEM₋₅	100	95	5	5	5
CEM₋₁₀	100	90	10	10	10
CEM₋₁₅	100	85	15	15	15
CEM₋₂₀	100	80	20	20	20
CEM₋₃₀	100	70	30	30	30

II.2 METHODES D'ESSAIS ET NORMES

Tableau II.2 : Méthodes d'essais normalisés [10]

Objet soumis à l'essai	Propriétés mesurées	Référence de la méthode
Ciments	Détermination de la consistance normalisée Détermination du temps de prise Détermination de la finesse par perméabilité de l'air (méthode Blaine) Masse volumique réelle Analyse chimique	NA 443 édition 2000
Sable	Détermination de la granularité Masse volumique absolue	NF EN 196-1
Mortier	Résistance à la compression	NF P 15-403ou NA 523 EN 196-1

II.3 DESCRIPTION ET MODE OPERATOIRE DES ESSAIS

II.3.1 Ciments anhydres [10,16]

➤ Masse volumique absolue

✦ Objectif de l'essai

Il s'agit de déterminer la masse volumique absolue (ou poids spécifique) du ciment utilisé dans notre étude. La technique expérimentale utilisée est celle de l'appareil appelé "le Densimètre Le Chatelier".

✦ Principe de la mesure : (avec le chatelier-Voluménomètre)

Il consiste à mesurer le déplacement du niveau de liquide contenu dans un récipient à col étroit lorsqu'on y introduit la poudre dont on cherche la masse volumique absolue.

La méthode nécessite également une balance au décigramme, voluménomètre et un liquide inerte vis-à-vis de la poudre: ça sera par exemple du tétrachlorure de carbone, si

la poudre est du ciment (ou bien on peut remplacer le tétrachlorure par le pétrole :le benzène).

Le résultat est : $P.S=3.20 \text{ g/cm}^3$ (voir annexe B)

➤ **Mesure de la finesse**

✦ **Objectif de l'essai**

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

La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique: c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre.

La surface massique est généralement exprimée en cm^2 de surface des grains de ciment par gramme de poudre. L'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface.

✦ **Principe de l'essai**

Elle consiste à mesurer le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de ciment compacté à une dimension et une porosité spécifiées. La surface massique est proportionnelle au temps mis pour traverser la couche de ciment.

La surface massique du ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment référence dont la surface massique est connue.

Plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est long.

$SSB= 3147 \text{ cm}^2/\text{g}$ (voir annexe B)

➤ **Essais sur ciment hydraté (pâtes de ciment)**

✦ **Mesure de la consistance de la pâte**

La consistance de la pâte de ciment (pourcentage d'eau/pâte pure) caractérise sa fluidité. Pour apprécier la consistance du ciment portland utilisé. Un essai a été réalisé avec l'appareil de Vicat.

✦ **Objectif de l'essai**

Déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage qui définit une telle consistance dite «consistance normalisée». Elle est fonction du rapport E/C.

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du temps.

✦ Principe de l'essai

La consistance est évaluée en mesurant l'enfoncement d'une aiguille cylindrique de $\varnothing = 10$ mm sous l'effet d'une charge constante (300g). L'enfoncement est d'autant plus rapide et important que la consistance est plus fluide.

➤ Mesure des temps de début et fin de prise

✦ Objectif de l'essai

Il est nécessaire de connaître les début et fin de prise des pâtes de ciment (des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés. L'objectif est de déterminer le temps de début et de fin de prise de la pâte pure du ciment utilisé conformément à la norme NA 443 édition 2000.

✦ Principe de l'essai

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée; l'appareil utilisé est appareil de VICAT équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre. Quand sous l'effet d'une charge de 300 g l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que $d = 4\text{mm} \pm 1$ mm on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « TEMPS DE DEBUT DE PRISE ». Le « TEMPS DE FIN DE PRISE» correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide, le moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte que de 0,5 mm.

Le résultat est : Temps de début de prise = 195 minutes.

Temps de fin de prise = 270 minutes.

II.3.2 Essais sur sable

Analyse granulométrique du sable normalisé.

Détermination de la masse volumique réelle du sable normalisé.

Essai au bleu de méthylène.

Les caractéristiques physiques et chimiques d'un sable normalisé sont connues (voir l'annexe B), donc ça nécessite pas de lui faire des essais.

II.3.3 Essais sur mortier (NF P 15-403 ou NA 523)

✦ Mortier normal : [10]

Dans le but de confirmer l'activité pouzzolanique des différents ajouts par la variation de l'évolution des résistances mécaniques. Des éprouvettes contenant un mélange ciment Portland et différents ajouts ont été coulés selon la norme NA 523. L'incorporation des ajouts dans les ciments permet une meilleure hydratation des anhydres.

Nous avons choisi un taux de substitution du ciment Portland de 0%, 5%, 10%, 15% et 20% et 30% selon la norme EN 196-1. Les indices d'activité pouzzolanique, rapports entre les résistances en compression des mortiers du CPA contenant les différents ajouts pouzzolaniques et ceux n'en contenant pas, ont été calculés.

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques d'un ciment et notamment sa résistance. Ce mortier est réalisé conformément à la norme (même chose pour déterminer la consistance de la pâte de ciment).

Le sable utilisé est un sable appelé "sable normalisé CEN EN 196-1". Ce sable est commercialisé en sac plastique de 1350 + 5g.

➡ Mesure de résistance à la compression [8]

✦ Objectif de l'essai

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

✦ Principe de l'essai

L'essai consiste à étudier la résistance à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est la nature de liant hydraulique; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment.

✦ Equipement nécessaire

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme EN 196-1. Il est énuméré ci-dessus.

- Une salle (Le laboratoire où a lieu la préparation des éprouvettes).
- Un malaxeur normalisé (figure II.1)



Figure II.1 : malaxeur normalisé pour pâte et mortier.

- Des moules normalisé permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4cm×4cm et de longueur 16cm (ces éprouvettes sont appelés “éprouvettes 4×4×16”).



Figure II.2: Moules pour moulage des éprouvettes de mortier.

- Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de $15\text{mm} \pm 0,3\text{mm}$ à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60s.



Figure II.3: appareil à chocs.

- Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN (ou plus si les essais l'exigent) avec une vitesse de mise en charge de $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$. Cette machine est équipée d'un dispositif de compression tel que celui schématisé sur la figure II.4.



Figure II.4: machine d'essais de résistance à la compression.

◆ Conduite de l'essai

Préparation des éprouvettes et déroulement des essais mécaniques.

Soit une formulation :

La confection du mortier est réalisée conformément à la norme NF P 15-403 NA 523. Le sable utilisé est un sable normalisé.

Pesé des constituants: la masse des constituants nécessaires aux essais est déterminées en fonction de l'éprouvette (ou des éprouvettes) a préparer, elle est pesée avec précision de 0.5%.

Dans le cas de la préparation de trois éprouvettes 4*4*16, les quantités sont respectivement les suivantes : Figure II.5.

- Sable normal sec =1350 g
- liant(Ciment) =450 g de ciment \pm (0% ,5%, 10%,15%,20%,30%) g de tuf, cendre volante et laitier de haute fornau.
- Eau =225 g, soit (E/C = 0.5), quantité qui donne le même affaissement pour tous les mortiers préparés.



Figure II.5: matériaux utilisés.

◆ Le malaxage [10]

Avant d'être utilisé pour les différents essais de maniabilité, de prise, de résistance ou de retrait, on mélange la composition d'un mortier pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme NA 523 qui décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

- Verser l'eau dans le récipient ; lui ajouter du liant ;
- Mettre le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant une minute ; dans les 30 dernières secondes, introduire le sable ;
- Mettre le malaxeur a la vitesse rapide pendant 2 minutes ;
- Arrêter le mouvement ; avec le batteur démonté de son axe, recaler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie du mortier n'échappe au malaxage ;
- Après remontage du batteur, reprendre le malaxage pendant 2 minutes a vitesse rapide ;

Le tableau suivant résume les procédures de malaxage :

Tableau II.3: Procédure de malaxage [10]

opération	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Introduction du sable		Recalage du récipient		
			30s	30s	2min	15s	2min
Durée des opérations			30s	30s	2min	15s	2min
Etat du malaxeur	Arrêter		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêter	Vitesse rapide

Avec le mortier normal préparé comme indiqué (à la partie supérieure), on remplit un moule 4 x 4 x 16. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Après quoi le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle.

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression.

Les normes ENV 197-1 et NFP 15-301 définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2 (ou 7 jours) et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment. Si des essais sont réalisés à d'autres âges, ils devront être réalisés dans les limites de temps indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.4.limites de temps

Age	24h	48h	72h	7j	28j
Précision	± 15min	± 30min	± 45min	± 2h	± 8h

➤ Résistance mécanique [16]

◆ Essai de compression

L'équipement utilisé est une presse hydraulique décrite par la norme EN 196-1. Les demis éprouvettes obtenues après ruptures en flexion sont rompues en compression comme indiqué sur la figure I.6.

Si F_C est la charge de rupture de la demi-éprouvette de l'éprouvette en compression, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_C est exprimée en newton, cette résistance exprimée en méga pascals vaut :

$$R_c \text{ (MPa)} = \frac{F_c \text{ (N)}}{1600}$$

Les résultats obtenus pour chacun des 6 demi-prismes sont arrondis à 0,1 MPa près et on en fait la moyenne. Si l'un des 6 résultats diffère de $\pm 10\%$ de cette moyenne, il est écarté et la moyenne est alors calculée à partir des 5 résultats restants. Si à nouveau un des 5 résultats s'écarte de $\pm 10\%$ de cette nouvelle moyenne, la série des 6 mesures est écartée. Auquel cas il convient de chercher les raisons de cette dispersion : malaxage, mis en place, conservation lorsque le résultat est satisfaisant, la moyenne ainsi obtenue est la résistance du ciment à l'âge considéré.

✦ Résistance normale

La résistance dite résistance normale pour un ciment donné est la résistance ainsi mesurée à l'âge de 28 jours. C'est cette résistance qui définit la classe du ciment : si un ciment a, (à 28 jours), une résistance normale de 42 MPa, on dira que sa classe vraie est de 42 MPa.

➡ Masse des éprouvettes des mortiers

Les mortiers, après démolition, sont conservés dans l'eau. A chaque âge de mesure, on retire les mortiers du bac d'eau figure II.6, on éponge et assèche leurs faces et on prend leurs masses a différents âges (7, 14, 21 et 28 jours).



Figure II.6 : Immersion des mortiers dans l'eau

La figure ci-dessous montre les masses des éprouvettes confectionnées à différents âges.



FigureII.7 : masses à différents âges.

CHAPITRE III

RESULTATS ET INTERPRITATIONS

INTRODUCTION

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les mortiers confectionnées selon les différents pourcentages d'ajouts (les tufs, le laitier et les cendres volantes).

Ces résultats portent sur la résistance mécanique (compression) à moyen terme 28 jours, sur l'évaluation de la masse aux échéances 7, 14,21 et 28 jours .

III.1 INFLUENCE DES AJOUTS MINERAUX SUR LE MORTIER NORMAL A BASE DU SABLE NORMALISE

III.1.1 Essai mécanique

⊖ Résistance à la compression

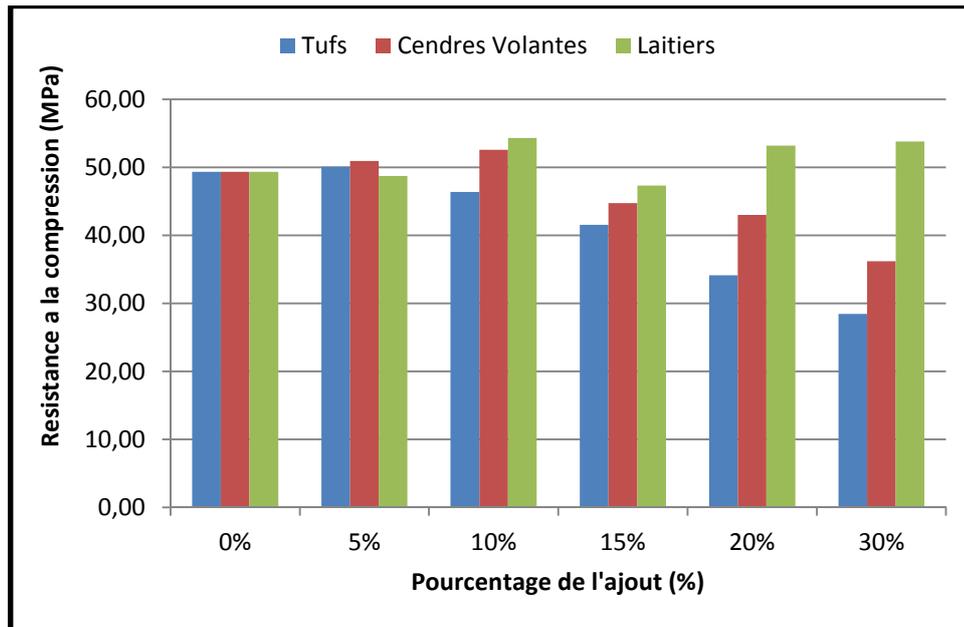


Figure III.1 : Résistance a la compression des mortiers testés à 28 jours.

Le tableau III-1 (voire l'annexe A) et la figure III-1 montrent le développement des performances des mortiers contenant différents ajouts, des pouzzolanes artificielles (cendres volantes et laitier) et naturelles (tufs), par substitution (remplacement partiel du ciment par les différents ajouts) dans le ciment (effet chimique) en fonction des différents pourcentages. On remarque que les résistances de tous les mortiers augmentent avec le type de l'ajout et pratiquement identique pour tous les échantillons testés pour chaque fraction. Cela est dû à l'accroissement de la cinétique d'hydratation du minéral C_3S (silicate tricalcique) et C_2S (silicate bicalcique). Ces derniers sont les deux principaux minéraux qui assurent le développement des résistances mécaniques à court et à moyen terme.

La réaction pouzzolanique qui est lente participe à la formation de C-S-H supplémentaire. En effet, les particules très fines adhèrent aux autres et activent le phénomène de réaction pouzzolanique de la pâte de ciment.

La réaction pouzzolanique est : $[Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \rightarrow C-S-H]$.

L'augmentation des réponses mécaniques en fonction du type de l'ajout (activation minérale) croît d'une manière différente d'un mortier à un autre, ceci dépend du pourcentage de l'activateur minéral et sa composition chimique (réactivité du mélange) incorporé dans le ciment.

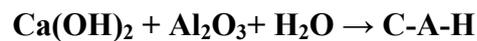
Le mortier contenant jusqu' à 5 % des différents ajouts atteindra la résistance comparable à celle du mortier de référence (mortier témoin sans différents ajouts).

Pour les autres fractions (10 ; 15 ; 20 ; 30), On remarque que :

- les résistances à la compression diminuent en fonction de l'augmentation du pourcentage de substitution du tuf et les cendres volantes, sauf pour le laitier on constate le contraire.
- Variation des résistances à différents type d'ajout.

Cela pourrait s'expliquer par :

A partir de 5% de substitution, il est à remarquer que la résistance des mortiers avec le laitier est beaucoup plus importante que les autres matériaux utilisés. Ceci est dû à la présence d'une teneur importante de **CaO**, **MgO** et **Al₂O₃** dans le matériau latent qui influence la résistance à la compression à moyen terme. Les deux oxydes CaO et MgO fait augmenter la capacité de durcissement quand la teneur en Al₂O₃ augmente la résistance.



La substitution du ciment par le tuf à différents pourcentages a donné des résistances à 28 jours qui sont inférieure à celles des mortiers avec le laitier et les cendres volantes. Ceci est dû à la lenteur de la réaction pouzzolanique du tuf. On peut s'attendre à une augmentation de la résistance à la compression au-delà de 90 jours à cause de la présence d'une teneur importante de **SiO₂ amorphe** dans le tuf. Ce sio₂ amorphe réagit avec le Ca(OH)₂ libéré lors de l'hydratation du ciment(en présence d'eau, les composés principaux du clinker à savoir: C₃S, C₂S, C₃A et C₄AF réagissent suivant des réactions qui produisent de grandes quantités de chaux hydraté appelé Ca(OH)₂) pour donner du **(C-S-H)** ,qui responsable de la résistance à la compression et de la densité et la compacité compactage de la microstructure (les C-S-H occupent les pores capillaires).

Le tuf utilisé a un potentiel pouzzolanique important selon la norme ASTM C618-89. Il présente un indice d'activité pouzzolanique de l'ordre de 0.94 en comparant aux pouzzolanes artificielles qui ne sont autre que les cendres volantes (de 1.06). Ces dernières sont connut par leurs activités pouzzolaniques.

Le laitier de l'indice d'activité pouzzolanique est de 1.10 est un matériau hydraulique latent. La présence d'une teneur importante de CaO et de MgO qui caractérise l'hydraulicité à court terme.

➤ Recommandation :

Après 28 jours le tuf utilisé est considéré comme un matériau pouzzolanique, selon la caractérisation du matériau à partir de la norme ASTM C618-89 et du diagramme de Wesche. (Voir chapitre II de la bibliographie)

Le calcul d'indice d'activité pouzzolanique selon (ASTM) est un signe du potentiel d'activité pouzzolanique.

Il est recommandé pour justifier d'avantage le potentiel d'activité pouzzolanique au-delà de 90 jours de ce matériau de procéder à d'autres testes selon certaines normes.

- Confectionner des mortiers substitue à base de tuf et faire un écrasement a 90jours.
- La surface spécifique Blaine du tuf.

Il faut noter que la réaction pouzzolanique est généralement lente et peut se développer sur plusieurs semaines. Cependant plus les ajouts (ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive) sont fins et vitreux, plus leurs réactions avec la chaux est rapide ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux. C'est l'un des avantages d'utilisation des pouzzolanes. Cette chaux contribue à la chute de résistance de la pâte de ciment hydratée. Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau, ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte de ciment. Le seul aspect positif de la présence de chaux dans un béton et mortier est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures d'acier.

III.1.2 Evaluation des masses des mortiers

La variation des masses des échantillons a différents ajouts fractionnés en fonction de temps, exposés à l'émersion dans l'eau est présentées en figures III.2, III.3, III.4, III.5, III.6 et les détails de calcul sont donnés dans le tableau III.2 (annexe A).

Les figures ci-dessous nous montrent un gain de masse remarquable des mortiers confectionnés à différentes fraction a 7 jours (jeune âge).A 14,21et 28(moyen Age) jours le gain de masse se stabilise.

Une autre remarque est signalée : pour chaque type de mortier, le gain de masse est proche et comparable à celle du mortier témoins pour toutes les fractions (5 ; 10 ; 15 ;

20 et 30 %). Mais il diffère d'un ajout à un autre. Cette différence est due certainement à l'écart de densité entre les différents ajouts cimentaires et le ciment employé (les masses volumiques de tuf, le laitier, les cendres et le ciment sont respectivement de 2.34 ; 2.906 ; 2.603 ; 3.20 (g / Cm³)).

Les matériaux à terme de tuf ne sont pas compactes. Cela est dû au manque de formation de C-S-H qui obture les pores capillaires. Ce qui explique sa légèreté par rapport aux cendres et laitier.

Le gain de masse pourrait être justifié à jeune âge par l'eau absorbée pour remplir les vides (pores capillaires) existant dans la matrice cimentaire, des produits d'hydratation des minéraux C₃S et C₂S du ciment-ajouts.

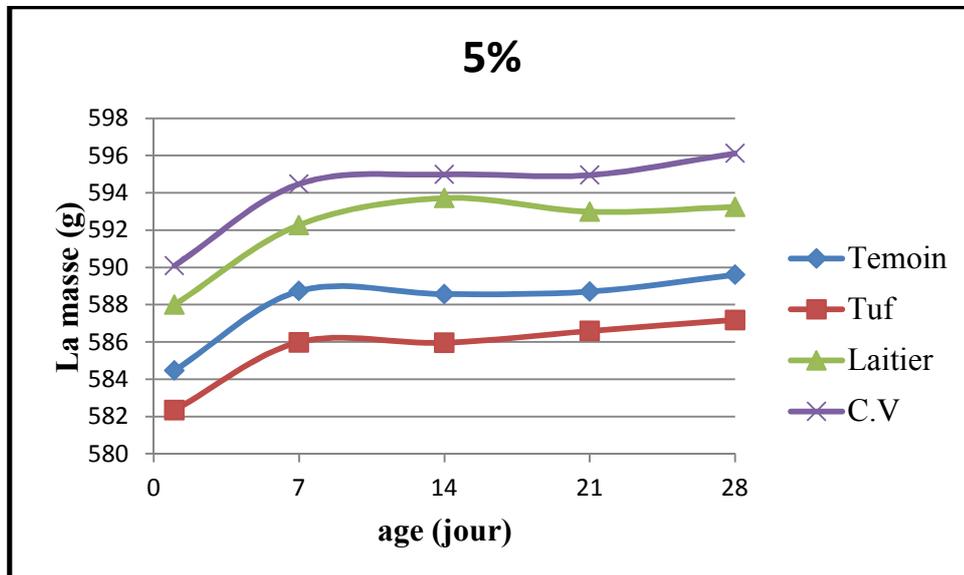


Figure III.2 : Evaluation de la masse des mortiers confectionnés à 5% de différents ajouts.

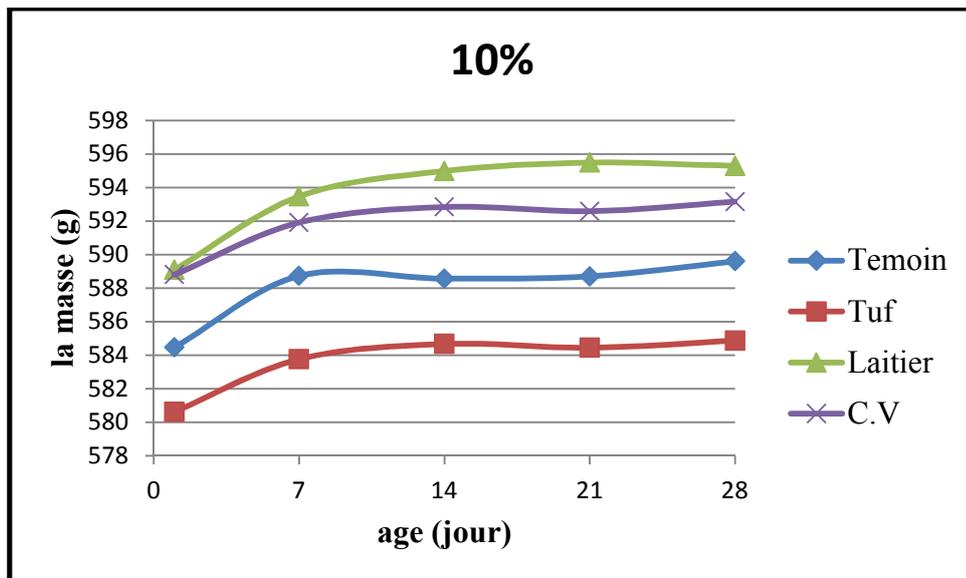


Figure III.3 : Evaluation de la masse des mortiers confectionnés à 10% de différents ajouts.

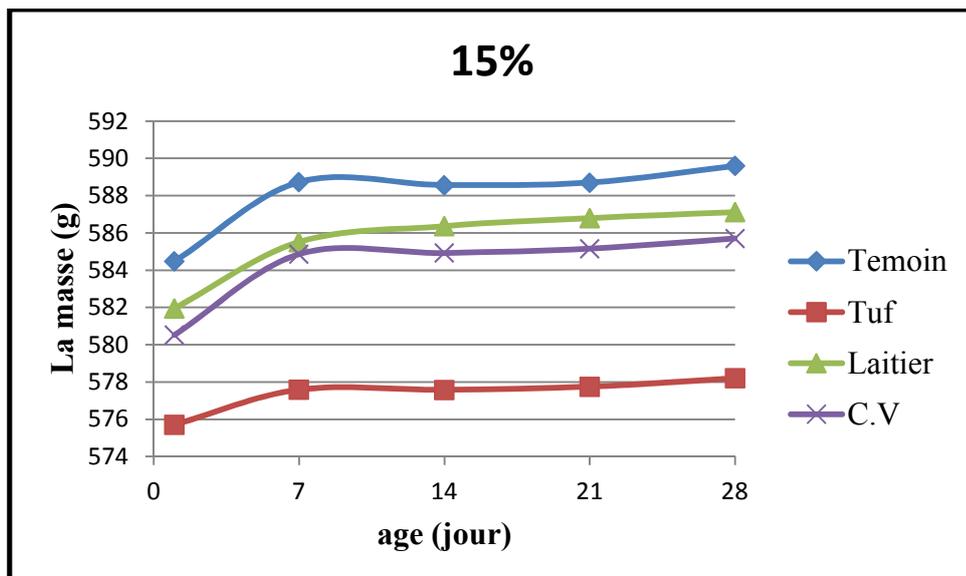


Figure III.4 : Evaluation de la masse des mortiers confectionnés à 15% de différents ajouts.

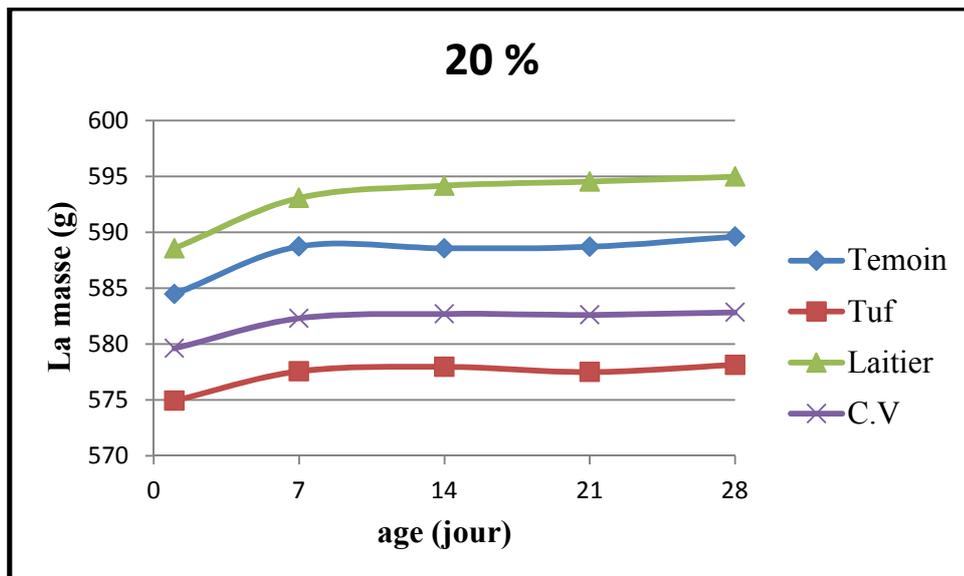


Figure III.5 : Evaluation de la masse des mortiers confectionnés à 20% de différents ajouts.

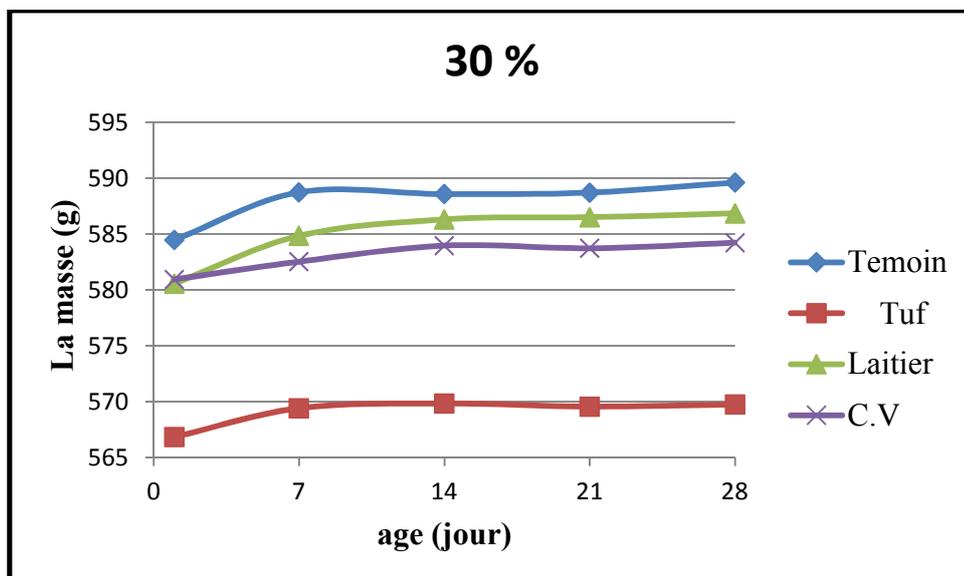


Figure III.6 : Evaluation de la masse des mortiers confectionnés à 30% de différents ajouts.

Conclusion :

A la lumière de ce qui précède, on remarque que l'incorporation des ajouts minéraux (les tufs, le laitier et les cendres volantes) au ciment CPA, contribue d'une façon positive sur les performances mécaniques et l'absorption capillaire des mortiers confectionnés avec les différents pourcentages d'ajouts. Ils offrent aux mortiers testés des résistances comparables à celles du ciment sans ajouts à moyen terme, sauf dans les cas des tufs car c'est un matériau pouzzolanique qui donne des résistances à long terme (réaction pouzzolanique lente).

CONCLUSION GENERALE

Ce travail expérimental a pour objectif d'étudier les avantages et la possibilité de substitution partielle du ciment par les ajouts pouzzolaniques (tuf volcanique ; cendre volante et les laitiers de haut fourneau) et leurs influence sur l'activité pouzzolanique des mortiers. L'ajout pouzzolanique substitué à divers pourcentages (0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 30%) afin d'étudier leurs effet sur les propriétés physique du ciment et le comportement mécanique du mortier. l'absorption, le comportement mécanique (résistance mécanique à la compression) du mortier ont été étudiées. D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que la quantité d'ajout pouzzolanique, sa composition chimique et la composition chimique du ciment sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (compression) des mortiers testés.

Les divers résultats présentés dans ce mémoire précisent clairement la lenteur de la réaction pouzzolanique à moyen terme et l'influence majeure de la teneur en Cao, Mgo et Al_2O_3 des ajouts sur la cinétique d'hydratation des ciments, et sur les propriétés mécaniques des mortiers et aussi sur l'évaluation des masses des mortiers testés.

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

L'activité pouzzolanique et le développement de la résistance des mortiers contenant les pouzzolanes (les différents ajouts) est fonction de :

- La composition chimique, la teneur en CaO , MgO et Al_2O_3 , des ajouts minéraux cimentaires. Plus la teneur augmente plus l'hydraulicité augmente le taux de fixation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ augmente et la formation d'une plus grande quantité de C.A.H (la résistance est meilleure à court terme).
- Le tuf est un matériau à caractère pouzzolanique (il présente un potentiel pouzzolanique important), car il n'entre en réaction avec les composants du ciment Portland qu'après l'hydratation et la formation de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (à long terme). Ce qui pénalise un peu plus le mélange avec tuf par apport au laitier et les cendres.
- L'activité pouzzolanique du tuf est lente. Son efficacité est à partir de 28 jours (à long terme). Mais on peut toujours l'accélérer par un broyage poussé.
- Les cendres volantes sont des matériaux pouzzolaniques.
- L'absorption capillaire augmente en fonction de l'âge. Elle est fonction de la densité du matériau.
- Augmentation de la quantité d'eau nécessaire suivant la teneur en ajout cimentaire pour obtenir une consistance normale de la pâte. Plus le pourcentage de l'ajout augmente, plus la consistance devienne plastique surtout dans le cas des tufs.
- Les résistances à la compression des mortiers mixtes (ciments -ajouts) sont comparables pour tous les types avec celle du ciment Portland à 5% de substitution.

L'introduction des ajouts minéraux améliore le comportement des matériaux à matrice cimentaire dans les environnements acides, ces derniers contribuent à la densification de la pâte de ciment durcie, à l'amélioration de la zone de transition pâte – granulat et à la consommation de la portlandite et formation des gels C-S-H.

Leurs valorisation permet :

- L'obtention d'une grande variété de ciments.
- Des économies d'énergie importantes pendant la phase de broyage.
- La préservation des ressources naturelles et la protection de l'environnement.

On peut conclure que la substitution du ciment par les différents ajouts a un effet significatif sur les résistances mécaniques (compression). Le pourcentage optimum de l'ajout minéral est de 5%. Au-delà de 10% du pourcentage de substitution, la résistance mécanique du mortier testé diminue.

Aussi nous venons de mettre en évidence que l'activité pouzzolanique augmente avec l'âge et ne peut être efficace qu'à partir de 28 jours. Ceci montre que l'activité des pouzzolanes artificielle est très lente. Cet effet est dû au fait qu'à long terme, la réaction pouzzolanique continue son effet en formant un deuxième CSH supplémentaire, et augmente de cette manière avec le dosage de l'ajout pouzzolanique sans dépasser dans notre cas de dosage de 5% d'ajout. Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral (C.P.J-C.E.M II), nécessite l'emploi d'un bon activant, chimique (utilisation des solutions alcalines qui modifient la prise et le durcissement), mécanique (broyage poussée du liant hydraulique) ou thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température).

En conclusion finale de ce travail, nous pouvons dire qu'il est possible d'utiliser le tuf issu de la ville de Boumerdes comme substituant dans le ciment car il présente un potentiel pouzzolanique important. La réaction pouzzolanique est responsable de l'amélioration de la microstructure du ciment. La valorisation des tufs comme matériaux locaux dans l'industrie cimentaire nous permet de réduire l'émission de CO₂ et du coût énergétique.

Ainsi, il est intéressant d'exploiter les gisements de ressources naturelles qui sont en abondance dans la nature (telles que les tufs qui se localise à Tinebdar, Beni ksila et Taourirt-Ighil) existantes en Algérie pour produire les ciments composés dans notre pays tant que leur approvisionnement est dès lors minime. Ces derniers présentent des intérêts incontestables du point de vue technique, économique, écologique et du point de vue résistance et durabilité envers les différentes attaques chimiques. Cette approche qui consiste à unir divers matériaux cimentaires (ciment Portland artificiel + ajouts) se montre de plus en plus réceptive à la nouvelle façon d'élaborer des bétons et mortiers.

➤ PERSPECTIVES (FUTURS TRAVAUX)

En perspective, nous proposons les axes de recherches suivants :

- 1-Influence de l'activation mécanique sur les propriétés des ciments aux additions pouzzolaniques.
- 2-Etude de l'influence du diamètre du tuf sur l'activité pouzzolanique des mortiers.
- 3- Effets des méthodes d'activation (chimique, mécanique et thermique) sur les caractéristiques physico-chimiques, thermique et mécaniques des ciments aux ajouts minéraux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. THE CEMENT ASSOCIATION OF CANADA, les ciments avec ajouts.
- [2]. CHRISTOPHE CHARRON HOLCIM : L'industrie du ciment/données générales/.Ecole thématique « Matériaux cimentaires » du 21 au 26 septembre. ATILH : Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques.
- [3].Manuel de prévention de la pollution dans le secteur du ciment, Centre d'activités régionales pour la production propre (CAR/PP) /Plan d'action pour la Méditerranée. Étude publiée en mai 2008.
- [4].GUIDE DE PRESCRIPTION DE CIMENTS POUR DES CONSTRUCTIONS DURABLES : cas des bétons coulés en place. Collection Cimbeton T14
- [5].CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS « Fiche techniques: le ciment et ses applications », collection Cimbeton, Paris 1997.
- [6].Cours Université de SHERBROOKE :Les ajouts dans le ciment GCI 712 CH.7.
- [7].BOUGLADA Mohamed Salah : 'Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier' ; Thèse de Magister, UNIVERSITE DE M'SILA 2008.
- [8].J. Baron – JP. Olivier et J.C.Weiss : « Les ciments courants » - « Les bétons, bases et données pour leur formulation » - Edition Eyrolles – 806p-1997.
- [9].Nasr-Eddine Kedjour « Le laboratoire du béton ». Office des Publications Universitaires.
- [10].CHICOUCHE HAMINA MAKHLOUF : ' influence de l'ajout pouzzolanique (argile cuite) sur les caractéristiques physico-chimiques des ciments', Thèse de

Magister, Département de Génie Civil de l'Université de « MOHAMED BOUDIAF » de M'sila.

[11]. A Kerbouche, M. Mouli, L. Laoufi, Y. Senhadji, S. Benosmane : « influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers »ENSET Oran 2009.

[12].BARRON J. SAUTEREY R. Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées Paris.p559.

[13].ROBERT L. DAY: 'POZZOLANS FOR USE IN LOW-COST' A State of the Art Report prepared for:The INTERNATIONAL DEVELOPMENT RESEARCH CENTRE OTTAWA, CANADA.Department of Civil Engineering, University of Calgary. September, 1990.

[14].Rachida IDIR : « Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique ». Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse ; Le 10 juillet 2009.

[15].Wesche.k :Baustoff fur tragende Bauteil. Bande2 :,Mauwerk,3.Berlin :Baauverlag 1993.

[16].Christophe Charron Holcim : L'industrie du ciment/données générales/.Ecole thématique « Matériaux cimentaires » du 21 au26 septembre. ATILH : Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques.

[17].De l'utilisation des pouzzolanes : La bibliothèque AL ZAMANE et la salle d'exposition MBAYE TRAMBWE.

[18].4^{ème} Séminaire sur les technologies du béton
Le béton : durabilité, solutions et innovation le 20-21 octobre 2007 hotel hilton –alger.

REFERENCES NORMATIVES

NA 443 édition 2000 : Norme Algérienne. Méthodes d'essais sur ciment.

NF EN 196-1 : Norme Française. Essais sur sable.

NF P 15-403 : Norme Française. Essais sur mortier.

ANNEXE A

Tableau III.1 : Valeurs des résistances à la compression des mortiers testés à 28 jours(MPa).

pourcentage	0%	5%	10%	15%	20%	30%
Tuf	49,368	50,095	46,382	41,568	34,110	28,466
Cendres Volantes	49,368	50,923	52,592	44,744	42,988	36,223
Laitiers	49,368	48,747	54,337	47,325	53,198	53,794

Tableau III.2 : valeurs des masses des mortiers testés (g).

	Type	1 ^{er} jour	7 ^{ème} jour	14 ^{ème} jour	21 ^{ème} jour	28 ^{ème} jours
0%	Témoins	584,473	588,727	588,567	588,700	589,600
	Tuf	582,335	585,980	585,953	586,587	587,177
5%	Laitier	588,000	592,270	593,717	592,983	593,243
	C.V	590,090	594,473	594,984	594,950	596,113
	Tuf	580,630	583,760	584,673	584,447	584,873
10%	Laitier	589,090	593,467	594,985	595,483	595,290
	C.V	588,803	591,910	592,840	592,587	593,150
	Tuf	575,710	577,590	577,580	577,753	578,207
15%	Laitier	581,947	585,513	586,363	586,793	587,117
	C.V	580,527	584,860	584,923	585,157	585,703
	Tuf	574,937	577,560	577,960	577,500	578,137
20%	Laitier	588,563	593,057	594,160	594,527	594,967
	C.V	579,607	582,300	582,697	582,613	582,833
	Tuf	566,847	569,417	569,847	569,560	569,757
30%	Laitier	580,567	584,827	586,307	586,503	586,840
	C.V	580,933	582,523	583,957	583,723	584,217

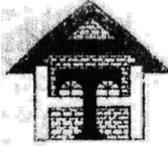
ANNEXE B

FICHE TECHNIQUE CRS 400

MOIS: AVRIL 2012

Conformément à la norme NA 443 édition 2000

COMPOSITIONS CHIMIQUES			Essais physiques		Mesures
ELEMENTS			P.S	(g / Cm ³)	3.20
SiO ₂ -T (NA 233)	%	22.20	SSB (NA 231)	cm ² /g	3147
Al ₂ O ₃	%	4.70	Temps De Prise h (NA 230)	Début	≥ 60mn 195
Fe ₂ O ₃	%	4.95		Fin	270
CaO-T	%	63.24	Expansion mm (NA 232)	A. Chaud	≤ 10 0.55
SO ₃ (NA 237) %	≤ 3,5	1.75	Refus %	90 μ	5.19
K ₂ O	%	0.28	Consistance Normale (NA 229)	%	24.08
Na ₂ O	%	0.15	Retrait à 28j (NA 440)	μm/m	/
Cl (NA 5038) %	≤ 0,1	0.002	MARS 2012		
P.A.F. (NA 237) %	≤ 4	0.97			
CaO Libre	%	0.85			
R.Insoluble (NA 236) %	< 3	0.73			
COMPOSITION POTENTIELLE DU CIMENT			CARACTERISTIQUES MECANIQUE		
C ₃ S	%	47.11	Résistance à la flexion MPa	02 JOURS	>10 3.75
C ₂ S	%	26.04		07 JOURS	6.32
C ₃ A	%	4.09		28 JOURS	7.79
C ₄ AF	%	15.06	Résistance à la compression MPa	02 JOURS	17.96
				07 JOURS	35.72
				28 JOURS	>40 52.72



Sarl ARAB TRADING HOUSE EST.

ش.ذ.م.م. البيت العربي للتجارة

Société à Responsabilité Limitée au capital social de 443 000 000 000 Dinar Algérien

OFFRE DE SERVICE

Nous avons l'honneur de vous introduire notre société comme suit :

La SARL ARAB TRADING HOUSE EST. est spécialisée dans l'exploitation des carrières - construction et industrie - extraction et traitement des sables et produits miniers - extraction et préparation du plâtre - réalisation des travaux de construction dans toutes les phases - entreprise des travaux publics et hydrauliques.

Notre société dispose de moyens humains, matériels et financier et d'une qualification professionnelle lui permettant de mener ses activités avec efficacité.

La SARL Arab Trading House Est. dispose d'une carrière sise à Douar Ben Aicha - Thénia Wilaya de Boumerdes, ainsi les analyses du tuf extrait de la carrière sont comme suit :

Echantillon	Humidité Naturelle (%)	Masse volumique (g/cm ²)	Masse spécifique (g/cm ³)	Porosité totale (%)	Absorption d'eau (%)
Tuf	14,45	1,35	2,34	42,51	8,10

reference	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	MnO	PAF
Tuf (%)	2,80	61,80	16,40	6,16	0,05	2,44	3,50	<0,05	<0,05	<0,03	7,03

A cet effet, nous nous tenons à votre disposition pour mener à bonnes fins toute opération que vous choisiriez de nous confier.

Dans l'espoir de retenir votre attention lors de votre consultation, nous vous prions de croire, Monsieur, en l'assurance de nos sentiments les plus dévoués.

DEPARTEMENT OPERATION ET COMMERCIAL

Siege Principal : 18 Rue Mustapha Ben Boulaid, Cité Plage, Jijel, Algérie
Annexe : Alger - Cooperative Al Baraka, Villa No. 439, Taher Boucharif, Bir Khadem, Alger, Algérie
Tél. : 21 21 55 02 14 20 22 - Fax : 21 21 55 01 79 / Ou. 2 Email : info@athe.ba

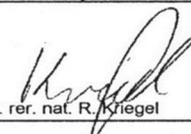
Les Cendres volantes

Analyse Chimique

Bauhaus-Universität Weimar Fakultät Bauingenieurwesen Professur Bauchemie Chemisch-analyt. Labor		Analysenprotokoll		Analysen-Nr.: 13951			
Auftraggeber : FIB/DI Peisker 2.4.03		$\rho_0 = 2,63 \text{ g/cm}^3$					
Untersuchungsmaterial : Asche A 17							
Analyseergebnis							
1.	Tv.100 C	0,1	%	16.	wl. Na2O	*0,06	%
2.	Gv.1000 C	2,8	%				
3.	SiO2	53,6	%				
4.	Al2O3	24,9	%				
5.	Fe2O3	7,6	%				
6.	CaO	2,9	%				
7.	MgO	1,8	%				
8.	MnO	0,08	%				
9.	TiO2	0,97	%				
10.	K2O	3,25	%				
11.	Na2O	0,74	%				
12.	SO3	0,4	%				
13.	Cl	0,003	%				
14.	fr.CaO	0,0	%				
15.	wl. K2O	*0,12	%				
* in der Summe nicht enthalten				Summe		99,14	
07. 07. 2003 Datum				 Dr. rer. nat. R. Krieger			

Le Laitier

Analyse Chimique

Bauhaus-Universität Weimar Fakultät Bauingenieurwesen Professur Bauchemie Chemisch-analyt. Labor		Analysenprotokoll		Analysen-Nr.: 14142			
Auftraggeber : FIB/DI Peisker 29.7.03		$\rho_0 = 2,906 \text{ g/cm}^3$					
Untersuchungsmaterial : HÜS 7 Laforge/Karsdorf		Alaine = 496 $\frac{\text{Oca}}{\text{cm}^2/\text{g}}$					
Analysenergebnis							
1.	Tv.100 C <i>kor.</i>	0,1	%	16.	wl. K2O	*0,02	%
2.	Gv.1000 C	0,3	%	17.	wl. Na2O	*0,02	%
3.	SiO2	36,6	%				
4.	Al2O3	11,1	%				
5.	Fe2O3	0,3	%				
6.	CaO	39,4	%				
7.	MgO	10,2	%				
8.	MnO	0,36	%				
9.	TiO2	0,53	%				
10.	K2O	0,43	%				
11.	Na2O	0,41	%				
12.	SO3	0,5	%				
13.	S-	1,36	%				
14.	Cl	0,006	%				
15.	fr.CaO	0,0	%				
* in der Summe nicht enthalten				Summe	101,6	%	
16. 10. 2003 Datum				 Dr. rer. nat. R. Kriegel			



Société Nouvelle du Littoral

Siège Social & Usine : Z.A. - BP 9 - 11370 LEUCATE (France)

Tél. : 33 (0) 4 68 40 14 05 - Fax : 33 (0) 4 68 40 92 72

Internet : www.s-n-l.fr - e.mail : contact@s-n-l.fr • s.n.l@wanadoo.fr

SABLE NORMALISE CEN CERTIFIE CONFORME - EN 196.1 par l'AFNOR et conforme ISO 679

Contrôlé par le Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris (L.E.M.V.P.)
4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy
75014 PARIS

CERTIFICAT de CONFORMITÉ Sable normalisé CEN, EN 196-1

Nom du client : ... (Algérie)

N° Commande : du 01/2/2012

Quantité commandée : 140 cartons de 16 sachets de 1,350 kg de sable CEN, EN 196-1

1- Période de production :	Le : 24 et 25/1/2012 et le 27/2/2012				
	Caractéristiques des grains				
	Masse volumique :	2,64 t/m3	Taux silice :	96,2 %	
	Type de sable :	Sable roulé naturel - Pays origine: France			
	Absorption eau WA (EN 1097-6) =	0,2 %	MF (EN 12620) =	2.65	
	Écoulement sable ECs (EN 933-6) =	28 s			
2- Granulométrie	Nombre de valeurs :	7			
	tamis (mm)	Refus cumulés sur les tamis (%)			
		Données		EN 196-1	
		Valeur min	Valeur max	Valeur min	Valeur max
	2	0,0	0,0	0	0
	1.6	5,3	6,8	2	12
	1	31,1	33,8	28	38
	0.5	64,2	70,9	62	72
	0.16	85,4	87,5	82	92
	0.08	99,8	99,9	98	100
3- Masse des sachets :	Nombre de valeurs :	66			
	Valeur moyenne :	1350,0 g	Ecart-type :	0,9 g	
	Minimum :	1347,2 g	Maximum :	1352,7 g	
		EN 196-1 : (1350 ± 5) g			
4- Teneur en eau :	Nombre de valeurs :	3			
	Minimum :	0,04 %	Maximum :	0,08 %	
		EN 196-1: < 0,2 %			

LEUCATE, le 16 Mars 2012

Jacques VECOVEN
Président



S.N.L. fondée en 1910 - SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 - SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z
Certifiée pour la PREPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANQUES DES CEMENTS

