



UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOuat

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Présenté par : **AISSA KAABOUCHE**

Ingénieur d'état en Génie Civil de l'Université de Laghouat

Spécialité : Génie civil

Option : Matériaux composites et calcul des structures

Effet des additions minérales sur le comportement physico-mécanique, thermique et sur la durabilité des mortiers à base de sable calcaire et sable de dunes

Membres de jury :

Mr M.M. KHENFER	Professeur, U de Laghouat	Président
Mr A. ZAIDI	Professeur, U de Laghouat	Examineur
Mr A.S. BELAIDI	Maître de Conférences, U de Laghouat	Examineur
Mr M. BEDERINA	Professeur, U de Laghouat	Directeur de thèse
Mr Z. MAKHLOUFI	Maître de Conférence, U de Laghouat	Co-directeur de thèse
Mr A. FERHAT	Maître de Conférence, U de Laghouat	Invité

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire de recherche de Génie Civil de l'Université de Laghouat. Que toute l'équipe qui travaille dans ce laboratoire trouve l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens à remercier Messieurs **Bederina Madani**, et **Makhloufi Zoubir**, Enseignants à l'Université de Laghouat, directeurs de ce mémoire, pour leur acceptation d'encadrement, leur soutien, leurs conseils et leur confiance à mon égard durant toute la période de ce travail.

Mes sincères remerciements vont également à Monsieur **Kroba Harzallah**, Enseignant à l'Université de Laghouat, de ses conseils objectifs qui m'ont été grandement profitables.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **Khenfer Mohammed Mouldi** Professeur à l'Université de Laghouat pour avoir accepté de présider ce jury.

Je tiens à remercier également le professeur **Zaidi Ali**, le Docteur **Belaidi Akram Salah Eddine** et **Mr FERHAT Ahmida**, enseignants à l'Université de Laghouat pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant de l'examiner.

Je profite aussi de cette occasion solennelle pour adresser mes remerciements à toute ma famille qui m'a toujours encouragée et soutenue tout au long des mois de cette étude.

Je remercie enfin tous ceux qui n'ont pas été cités dans ces quelques lignes et qui ont contribué de près ou de loin par leur aide au bon déroulement de ce travail.

Nous remercions profondément Messieurs **YAHIAOUI Mohamed** et **CHETTIH Tayeb**, des étudiants en Master de Génie Civil.

RESUMÉ

La recherche de nouveaux liants est devenue une préoccupation pour minimiser le coût des bétons en valorisant les matériaux locaux et les déchets industriels ou naturels, pour des raisons, à la fois économique et écologique. Dans cette optique que s'ouvre la réflexion sur la substitution d'une partie du ciment par des additions minérales. L'utilisation des ajouts a pour but la diminution de l'énergie nécessaire à la production du ciment et d'augmenter la durabilité des mortiers et bétons.

L'objectif de ce travail est d'étudier, d'une part, l'effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf et des fillers calcaires de la région de Laghouat sur le comportement physique et mécanique ainsi thermique des mortiers à base de sables calcaire concassé et de dunes, D'autre part, l'effet de ces deux additions minérales sur l'évolution du retrait, l'absorption par capillarité et la conductivité thermique de ces mortiers.

Un programme expérimental a été réalisé sur des mortiers où le ciment CPA CEM1 a partiellement été substitué par la pouzzolane naturelle et les fillers calcaires en vue d'étudier leur incidence sur les paramètres indiqués.

Mots clés : Mortier, sable calcaire, sable dunaire, filler calcaire, pouzzolane naturelle, propriétés physiques, propriétés mécaniques, propriétés thermiques, Microstructure.

ABSTRACT

The search for new binders has become a preoccupation to minimize the cost of concretes by valorization of local materials and industrial and/or natural wastes, for both reasons, economic and ecologic. It's in this optic that this study was oriented towards the substitution of a portion of cement with mineral additions. The use of additions aims to decrease the required energy for the production of cement and increase the durability of mortars and concretes.

The main objective of this work is to study, on the one hand, the effect of natural pozzolan of Beni-Saf and limestone fillers of Laghouat on the physical, mechanical, and thermal behavior of mortars containing crushed limestone sand and dune sand, and on the other hand, the effect of these two mineral admixtures on the evolution of shrinkage, capillarity absorption, and thermal conductivity of these mortars.

An experimental program was carried out on mortars, where cement CPA CEM1 was partially substituted by pozzolan and fillers in order to study their impact on the specified parameters.

Keywords: mortar, limestone sand, dune sand, limestone filler, natural pozzolan, thermal, mechanical, physical, properties, microstructure.

الملخص

لقد أصبح البحث عن روابط جديدة في مجال البناء مصدر اهتمام كبير للتقليل من تكلفة المباني وذلك بتثمين المواد المحلية و النفايات الصناعية و الطبيعية لذا جاء استعمال المضافات المعدنية مع الإسمنت لأسباب اقتصادية و بيئية لتقليل الطاقة اللازمة لإنتاج الإسمنت و تحسين ديمومة الملاط و الخرسانة. لذا فجاء هذا البحث ليتناول تأثير كل من بوزلان بني صاف و حشو الحجر الجيري على الخصائص الميكانيكية للملاط من جهة و دراسة التقلص و الامتصاص و الناقلية الحرارية من جهة أخرى.

للقيام بهذا، تم إعداد برنامج تجريبي خاص أين تم استبدال كمية من الإسمنت بكمية من البوزلان و حشو الحجر الجيري بنسب متغيرة و هذا لدراسة التغيرات المتعلقة بالخصائص الميكانيكية و التقلص و الامتصاص و الناقلية.

الكلمات الرئيسية : الملاط, الرمل الكلسي , الرمل السيليسي – الحشو من الحجر الجيري- – بوزلان -الخصائص الفيزيائية- الخصائص الميكانيكية و الخصائص الحرارية.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

N° de figures	Titres des figures et photos	Pages
Figure I-1	Microphotographie d'un clinker	6
Figure 1.2	Stades de fabrication du ciment	8
Figure I .3	Cristal de portlandite entre des C-S-H	10
Figure I.4	Image en microscopie électronique à balayage de cristaux d'ettringite	11
Figure I.5	Changement de la quantité de chaux d'un ciment pouzzolanique hydraté	18
Figure I.6	Photos de dunes de sables	19
Figure I.7	Conductivité thermique λ en fonction de la teneur en eau massique	24
Figure I.8	Schéma d'un milieu poreux	25
Figure I.9	Transfert de chaleur dans un matériau poreux	27
Figure I.10	Mouvement du fluide dans les pores	28
Figure I.11	Relation entre la perméabilité et le rapport E/C de la pâte de ciment (Ciment hydraté : 93%)	33

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

Figure II.1	Perméabilimètre de Blaine	38
Figure II.2	Appareil de VICAT	39
Figure II.3	Analyse par RX du ciment « CEMEX d'Espagne » CPA-42,5	40
Figure II.4	DRX de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf [BENYAHIA. A].	41
Figure II .5	courbe granulométrique du sable utilisé	42
Figure II .6	Dispositifs utilisés pour la mesure de l'équivalent de sable	44

Figure II.7	Pouzzolane naturelle (broyée).	48
Figure II.8	Morphologie de la pouzzolane	49
Figure II.9	Diffractogramme du calcaire	50
Figure II.10	Malaxeur normalisé pour pâte et mortier	53
Figure II.11	Maniabilimètre LCPC «B» utilisé pour la mesure de la maniabilité	54
Figure II.12	Eprouvettes prismatiques (40x40x160) cm ³	55
Figure II.13	Réfractomètre muni d'un Comparateur de mesure de la variation de longueur	55
Figure II.14	Appareil de flexion à 3 rouleaux	56
Figure II.15	Essai de compression	57
Figure II.16	Appareil de compression	57
Figure II.17	Lecture des résultats de l'essai de flexion / compression	57
Figure II.18	Appareil pour la mesure du poids	58
Figure II.19	(a)Aspect de l'échantillon lors de l'essai thermique, (b) Schéma du montage de la méthode du fil chaud.	59
Figure II.20	Ensemble du matériel thermique utilisé	60
Figure II.21	Schéma des transferts de chaleur autour du fil chaud.	60
Figure II.22	Schéma du montage de la méthode du fil chaud	60
Figure II.23	Aspect général de la sonde utilisée	61
Figure II.24	Montage expérimentale utilisé dans l'essai d'absorption	64
Figure II.25	Echantillons utilisés pour l'essai d'accessibilité à l'eau.	65
Figure II.26	Dispositif de l'essai d'accessibilité à l'eau	65
Figure II.27	Conservation dans la solution de la chaux	66

Figure II.28	Conservation dans la solution de l'acide chlorhydrique HCl 5%	67
Figure II.29	Conservation dans la solution de chlorure de sodium NaCl	67

CHAPITRE III : CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE DES MORTIERS ET ANALYSE DES RESULTATS

FigureIII.1	Variation du temps d'écoulement en fonction de la composition des mortiers	71
Figure III.2	Variation de la masse des éprouvettes en fonction de temps	72
FigureIII.3	Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour les différents mortiers	74
Figure III.4	Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de substitution des additions	75
Figure III.5	Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les différents mortiers	77
Figure III.6	Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution des additions pour les différents mortiers	78
Figure III.7	Evolution du retrait en fonction de l'âge pour les différents mortiers étudiés	80
Figure III.8	Evolution de l'absorption capillaire en fonction du temps	84
Figure III.9	Coefficient d'absorptivité à 28 j et 90 j pour chaque composition	85
Figure.III.10	Porosité accessible à l'eau pour chaque composition à 360 jours.	87
Figure.III.11	Variation de la masse des éprouvettes en fonction de la période d'immersion dans une trois solution (Chaux ,Nacl5% et Hcl5%)	88
Figure.III.12	Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour les différents mortiers et différents milieux	90
Figure.III.13	Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution des additions pour les différents mortiers et différents milieux	91
Figure.III.14	Evolution de la conductivité thermique pour chaque composition à (360jours)	93

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

N° tableaux	Titres des Tableaux	Pages
Tableau I-1	Composition minéralogique d'un clinker de ciment Portland	7
Tableau I-2	Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes	17
Tableau I .3	Epaisseur des unités Litho-Stratigraphiques Carbonatées du Mésozoïque dans la région de Laghouat	21
Tableau I.4	Caractéristiques thermiques de quelques matériaux	25
Tableau I.5	Compacité et porosité des bétons	33

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

Tableau II-1	Nature et temps de prise du ciment	39
Tableau II-2	Composition chimique du ciment	40
Tableau II-3	Analyse chimique de la pouzzolane naturelle	41
Tableau II.4	Propriétés physiques du sable étudié	45
Tableau II.5	Composition chimique de l'eau de gâchage	47
Tableau II.6	Propriétés physiques de la pouzzolane de Béni-Saf	48
Tableau II.7	Analyse chimique de la pouzzolane de Béni-Saf	48
Tableau II.8	Propriétés physiques du calcaire	51
Tableau II.9	Différents types des mortiers étudiés	53
Tableau II.10	Résultats des essais de maniabilité des différents mortiers	54

CHAPITRE III : CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE DES MORTIERS ET ANALYSE DES RESULTATS

Tableau III.1	les différentes combinaisons des mortiers %(CPA+PZN+FC)	70
Tableau III.2	Composition des mortiers utilisés pour E/L=0,57	71
Tableau III.3	Variation du temps d'écoulement en fonction du pourcentage en PN et FC.	72
Tableau III.4	Variation des résistances à la traction par flexion (R_{fmoy}) en fonction de l'âge (MPa).	74
Tableau III.5	Variation des résistances à la compression en fonction du temps (MPa).	77
Tableau III.6	Résultats d'absorption d'eau par capillarité pour les différents mortiers.	84
Tableau III.7	Equations de corrélations et valeurs de C_c pour les différents mortiers à 28 j.	86

INTRODUCTION GENERALE

L'introduction des ajouts dans le ciment présente un facteur bénéfique afin de réduire la consommation d'énergie et d'émissions de CO₂ et augmenter la production. Les fabricants de ciment utilisent des additions minérales telles que le laitier, la pouzzolane et le calcaire [Messaoudene et al., 2011].

La préoccupation des chercheurs est de mettre au point un liant en incorporant des déchets industriels (laitier ou cendre volante) ou des ressources naturelles telles que la pouzzolane naturelle et les fillers calcaires.

L'incorporation de ces ajouts minéraux actifs et inertes dans les bétons et les mortiers permet d'améliorer les caractéristiques de ces mortiers comme il a été mis en évidence dans plusieurs recherches.

Dans l'industrie cimentaire, la recherche d'un liant moins coûteux en utilisant des déchets et des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour palier au déficit dans la fabrication du ciment Portland. Cependant, malgré les avantages techniques, économiques et écologiques rapportés par l'utilisation des ciments composés, ces derniers restent associés à des inconvénients. Il est donc nécessaire de savoir si des ciments à plusieurs composants (ternaires) ont des effets synergiques de façon à ce que leurs ingrédients arrivent à compenser leurs faiblesses mutuelles [k. Ayed et .al, 2010].

Les ciments aux ajouts permettent non seulement de réduire les coûts de production mais aussi de régler quelques problèmes environnementaux en plus d'offrir au béton des meilleures performances (meilleure maniabilité, faible chaleur d'hydratation, meilleure durabilité, etc...).

Cependant, l'utilisation des ajouts cimentaires est associée à des inconvénients tels que le mûrissement humide initial prolongé et de faibles résistances au jeune âge. A cet effet, la combinaison avec le ciment Portland de plusieurs ajouts cimentaires (2 ou 3) permet de développer de nouveaux types de liants hydrauliques (ciments ternaires ou quaternaires) ayant des propriétés mécaniques et une durabilité supérieure au ciment Portland seul [Ali Aichouba et .al, 2005].

Notre travail s'inscrit donc dans la continuité de ces travaux avec un objectif visant

l'étude de l'effet de la pouzzolane naturelle (PN) et des fillers calcaires (FC) sur le comportement physico-mécanique et thermique des mortiers.

Dans cette étude nous avons suivi l'évolution des résistances mécaniques (Traction par flexion et Compression) à des différents milieux (à l'aire libre, milieux agressifs), la maniabilité, le retrait, et l'absorption d'eau par capillarité des mortiers élaborés à des différents pourcentages d'ajouts substitué en parallèle (mortiers ternaires) au ciment portland, six combinaisons ont été préparées à partir des différents pourcentages d'ajouts suivant : [(70% CPA -30% PN), (70% CPA -24% PN-6%FC), (70% CPA -18% PN-12% FC), (70% CPA -12% PN-18%FC), (70% CPA -6% PN-24% FC) et (70% CPA -30% FC) et un mortier témoin (100% CPA)].

Notre mémoire est partagé comme suit :

La première partie est consacrée à l'étude bibliographique qui traite en détail les différents types des mortiers, leurs composants et les différents ajouts cimentaires ainsi que leurs propriétés vis-à-vis du comportement physico-mécanique et la durabilité des mortiers.

Dans la deuxième partie on a essayé d'élaborer et de caractériser les matériaux utilisés (ciment, sable, pouzzolane naturelle, fillers calcaires et eau de gâchage) et établir la formulation des mortiers. A la fin de ce chapitre on a présenté les techniques expérimentales (maniabilité, retrait, résistances, absorption.) et les essais thermique .

La troisième partie présente les résultats de l'étude de comportement physico-mécanique et thermique, l'analyse et l'interprétation de ces résultats.

Cette étude est finalisée par une conclusion générale.

I.1 Introduction

Le domaine de l'Atlas Saharien est connu par des bancs de roches calcaires et des dunes de sable. Le sable occupe un pourcentage important de la surface de l'Atlas Saharien et du Sahara algérien qui n'est pas actuellement exploité [Bracene, 2002]. La valorisation de ces matériaux disponibles en grandes quantités peut contribuer à confronter le déficit en agrégat.

Plusieurs causes rendent cette valorisation nécessaire:

- Abondance de ces matériaux ;
- Raréfaction des granulats alluvionnaires ;
- Cout de transport des granulats: l'utilisation de ces matériaux locaux réduit les surcouts engendrés par le transport à grandes distances.

I.2 Le ciment

I.2.1 Historique

Le ciment dit « ciment Portland » est le matériau du 20^{ème} 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 XXe 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 [Ghomari, 2006].

I.2.2 Définition

Le ciment est un liant hydraulique qui durcit tant à l'air que sous l'eau. Il est obtenu par broyage fin du clinker avec une quantité nécessaire de gypse et un / ou des ajout(s) minéraux actifs (ciment composé), faite simultanément ou par malaxage minutieux des mêmes matériaux broyés séparément.

1.2.3 Etapes de fabrication

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

1.2.3.1 Extraction et la préparation des matières premières

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore par ripage au bulldozer. La roche est reprise par des dumpers vers un atelier de concassage. Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps.

Mais si elle peut varier d'une cimenterie à l'autre en fonction de la qualité du gisement exploité, la composition du cru reste dans des proportions bien définies [Venuat, 1989].

- Carbonate de calcium (CaCO_3) : de 77 à 83 % ;
- Silice (SiO_2) : de 13 à 14% ;
- Alumine (Al_2O_3) : de 2 à 4% ;
- Oxyde ferrique(Fe_2O_3) : de 1,5 à 3 %.

La roche est échantillonnée en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice). Le mélange est ensuite réalisé dans un hall de pré-homogénéisation où la matière est disposée en couches horizontales superposées puis reprise verticalement.

1.2.3.2 Séchage et broyage

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 trois 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 semi-sèche).

1.2.3.3 Cuisson

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 :

- la décarbonatation du carbonate de calcium (calcaire) donne de la chaux vive.
- l'argile se scinde en ses constituants, silices et alumine, qui se combinent à la chaux pour former des silicates et aluminates de chaux. Ce phénomène progressif constitue la clinkérisation.

1.2.3.4 Broyage du clinker

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.

1.2.3.5 Expéditions

Après le broyage, le ciment est sous sa forme définitive, tel que nous le connaissons sur les chantiers. Il est alors stocké dans des silos verticaux qu'il faut entretenir régulièrement. En effet, au bout d'un certain temps, le ciment sèche dans les silos et s'entasse. Il faut donc qu'il se renouvelle régulièrement dans les silos afin qu'il n'y stagne pas. Pour se faire, on installe, des injections d'air dont la pression est plus forte vers l'extérieur et moins forte vers le centre du silo. En tête du silo, un aspirateur d'air est également mis en place pour dégonfler le silo. Par ce procédé, le ciment acquiert les propriétés d'un fluide et ne se bloque plus, économisant des

pertes qui peuvent être conséquentes. Le ciment est ensuite extrait de ces silos par un bec verseur. Ensuite, les ciments quittent l'usine en sacs ou en vrac.

1.2.4 Constituants du ciment

Les principaux constituants du ciment sont le clinker, le gypse, les ajouts minéraux, etc.

1.2.4.1 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 [Ghomari, 2006]. 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 1.1) :

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

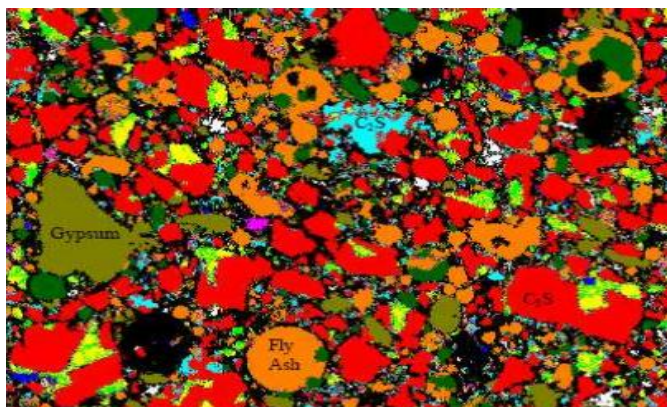


Figure 1.1. Microphotographie d'un clinker

Noir = porosité, rouge = C_3S , bleu clair = C_2S , vert = C_3A , vert = sulfates de calcium, jaune = K_2SO_4 , et blanc = CaO [Guillon, 2004].

Les compositions chimiques et minéralogiques du clinker sont comprises dans les limites données par le tableau 1.1.

On constate que les quatre oxydes CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 interviennent pour plus de 95% de la composition chimique du clinker. On les appelle les oxydes majeurs. Ainsi les oxydes mineurs, les plus importants dans le ciment, sont:

- la magnésie (MgO) provenant de la dolomite qui est souvent présente avec le calcaire.
- les oxydes alcalins K_2O et le Na_2O provenant en général, de l'argile et des feldspaths
- l'anhydride sulfurique (SO_3) dans le clinker provenant des matières, telles que la pyrite (FeS_2).

Mais aussi du calcaire ou de l'argile et surtout des combustibles utilisés tels que le charbon, le fuel ou le gaz naturel.

Tableau 1 .1: Composition chimique et minéralogique du clinker [Baron, 1997]

Composants minéralogiques	Teneurs limites (%)	Teneur moyenne(%)
C_3S	40-70	60
C_2S	00-30	15
C_3A	02-15	08
C_4AF	00-15	08
Oxydes		
CaO	60-69	65
SiO_2	18-24	21
Al_2O_3	04-08	06
Fe_2O_3	01-08	03
MgO	< 05	02
K_2O, Na_2O_3	< 02	01
CO_3	<03	01

1.2.4.2 Le gypse ($CaSO_4$)

En effet, le clinker est obtenu selon la technique montrée dans la Figure 1.2. il est « pur » et 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 ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$).

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.

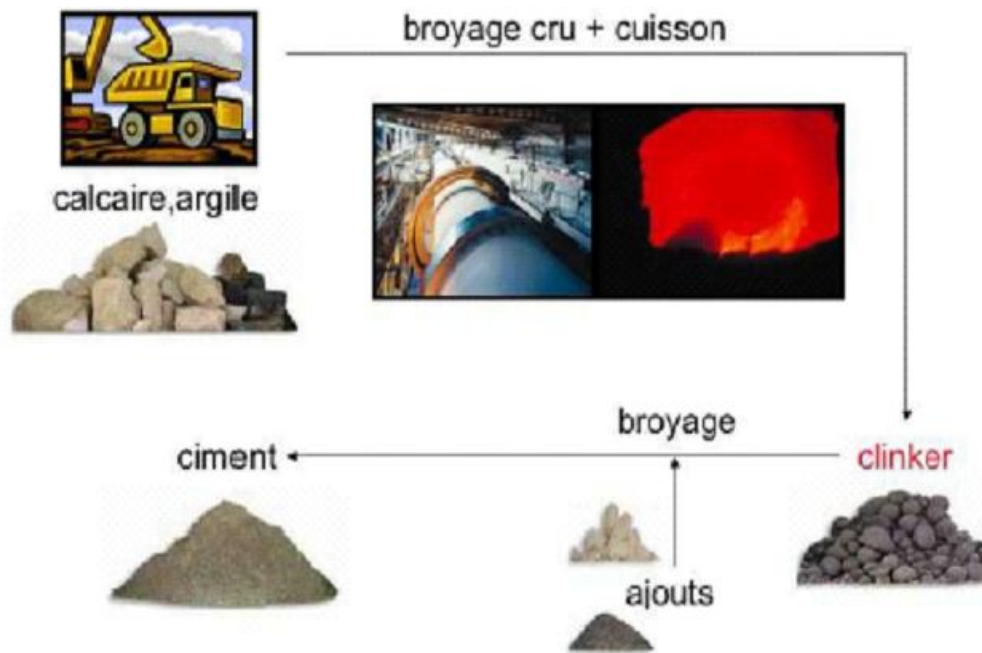


Figure 1.2 .Stades de fabrication du ciment

1.2.4.3 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.

1.2.5 Hydratation du ciment

1.2.5.1 Introduction

Le ciment est un liant hydraulique: il se combine à l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. La réaction chimique d'hydratation du ciment conduit donc à la formation d'une pâte qui, après prise, durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été mis en lumière, dès la fin du siècle dernier, par Henri Le Chatelier. Il a notamment décrit les trois phénomènes concomitants qui concourent au phénomène de prise [Pliskin, 1993].

- la dissolution des constituants du ciment dans l'eau;
- la formation de solutions sursaturées par rapport aux différents hydrates ;
- la précipitation et la cristallisation de ces hydrates dans les vides intergranulaires.

1.2.5.2 Hydratation des composants du ciment Portland

Lorsque le ciment entre en contact avec l'eau, une réaction exothermique instantanée se produit avec une forte libération de chaleur, cette période dite de pré-induction est de courte durée (10 - 20 minutes). Elle est suivie d'une période relative inactivée appelée période d'induction ou période dormante au cours de laquelle le dégagement de chaleur est faible, mais jamais nul. La durée de cette période peut varier entre 2 et 8 heures.

La période d'induction est très importante, quant à l'ouvrabilité des bétons et mortiers, car à sa fin s'amorce la prise du ciment avec un fort dégagement de chaleur qui correspond à la période d'accélération associée au début de prise et de durcissement du ciment.

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

1.2.5.2.1 Hydratation du silicate tricalcique C_3S

L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté et l'hydroxyde de calcium. La réaction du C_3S avec de l'eau est la suivante:



Où $\left\{ \begin{array}{l} \text{CSH représente le } 3CaO.2SiO_2. 3H_2O \text{ (Silicate de calcium hydraté)} \\ \text{et CH représente le } Ca(OH)_2 \text{ (Portlandite).} \end{array} \right.$

Les hydrates ainsi obtenus au cours de l'hydratation du C_3S (Figure 1.3) sont:

- les silicates de calcium hydratés (CSH) qui occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils ont une structure en feuillets formées de cristaux très petits et mal cristallisés. La surface spécifique est très élevée (100 - 700 m²/g). La cohésion des feuillets de CSH est due aux forces de Van Der Waals entre leurs parties colloïdales.
- l'autre composant principal dans l'hydratation des silicates tricalciques est l'hydroxyde de calcium CH (ou Portlandite) qui occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de

ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate [Kiran ,1998].

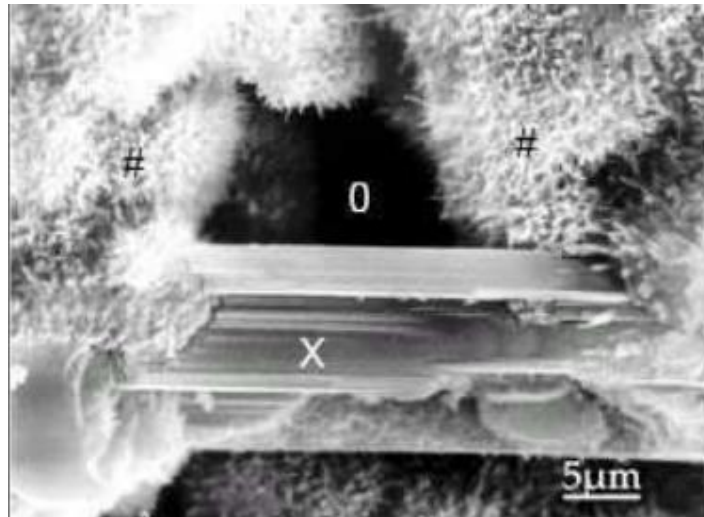


Figure 1.3. CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#), La porosité est repérée par (O) [Regourd et al., 1975]

1.2.5.2.2 Hydratation du silicate bi calcique C_2S

Une fois hydraté, C_2S donne aussi des CSH. La réaction est donnée par:



Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C_3S mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs de stœchiométrie, l'hydratation de C_3S produirait 61% de gel de CSH et 39% de CH alors que l'hydratation de C_2S produirait 82% de gel de CSH et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C_2S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Cependant, Pour la résistance au jeune âge, plus de C_3S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée.

α - Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). En l'absence du gypse, la réaction de C_3A 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 C_3A réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (Ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale (Figure 1.4). La réaction est donnée par:

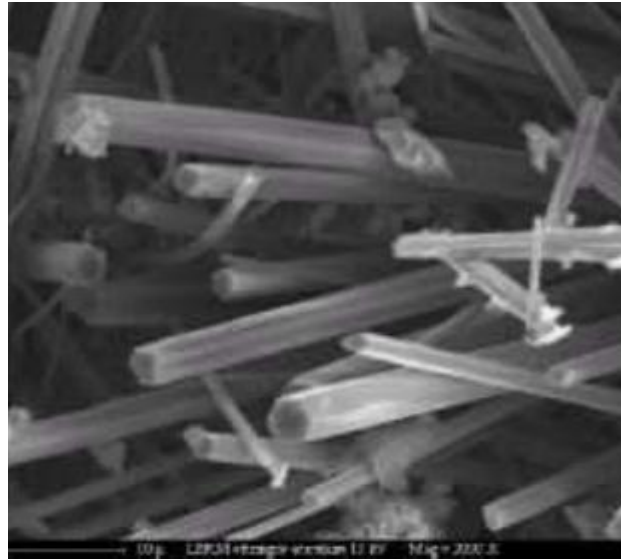
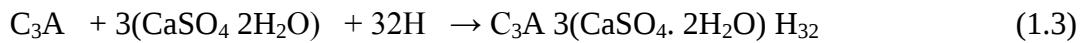


Figure 1.4. Visualisation de l'ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton par Microscopie Electronique à Balayage [Guillon, 2004]

Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en éttringite. Il apparaît donc secondairement un monosulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales [Older, 1998]. La réaction est donnée par:



Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydraté [Gané, 2002].

b - Hydratation de L'aluminoferritetétracalcique C₄AF

Le C₄AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C₃A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente. 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 [Kiran, 1998].

L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique par ce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

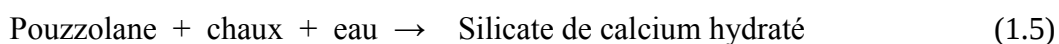
1.2.5.2.5 Conclusion

La réaction d'hydratation du ciment combine les réactions d'hydratation des principaux composants du clinker et, éventuellement, celles de ses composants secondaires. Cependant, les réactions sont plus complexes du fait des interactions chimiques et thermiques qui se produisent au cours du processus d'hydratation et du fait des impuretés présentes dans la solution solide qui influencent beaucoup l'hydratation de chaque phase.

1.3 Ajouts minéraux

1.3.1 Généralités

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 et durabilité. 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 :



Il faut noter qu'à la température de la pièce, cette réaction est généralement lente et peut se développer sur plusieurs semaines. Cependant plus la pouzzolane est fine et vitreuse, plus sa réaction avec la chaux est rapide.

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.

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.

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

1.3.2 Classification des ajouts minéraux

Selon la norme [ENV 2006] (paragraphe 3.1.5), les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes. On distingue quatre classes d'ajouts minéraux :

1.3.2.1 Principaux ajouts minéraux inertes

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60 μm ne subissent pas une hydratation complète, même au cours du durcissement à long terme ; pour cette même raison, les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305).

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, elles jouent le rôle de micro agrégats.

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, etc.). Parmi ces additifs, on distingue les fillers calcaires et la poussière.

1.3.2.1.1 Fillers calcaires

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes etc.). Les fillers se différencient les uns des autres par:

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- Leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- Leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles:

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C_3S et du C_3A et à la formation de carboaluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent, ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.

1.3.2.1.2 Poussière

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000cm/g, le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celles du ciment sans ajouts.

Le temps de prise, le fluage et le retrait augmentent avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

1.3.2.2 Ajouts minéraux actifs

1.3.2.2.1 Pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu soluble dans l'eau et possédant des propriétés liantes [Venuat,1989].

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

- ***A) pouzzolane naturelle***

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

- **B) Pouzzolane artificielle**

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement: argiles, schistes, latérite, bauxite et moler.

Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories [Venuat, 1989].

- Les constituants actifs: phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées.
- Les constituants inertes: phase cristallisée autre que les zéolites.
- Les constituants nocifs: substances organiques et argiles gonflantes :

- **Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes**

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées (cas des squelettes siliceux de micro-organismes).

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux [Sersale, 1990].

Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactives. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux.

Les pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux (portlandite).

Des tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation ne suffisent pas pour déterminer la réactivité pouzzolanique.

D'autre part, la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure [Venuat, 1989].

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

- ajouts de produits chimiques.

-
- broyage à une finesse plus élevée.
 - traitement thermique.

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

- **Propriétés hydrauliques**

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

- **Propriétés physiques de remplissage**

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

1.3.3 Intérêt d'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil

1.3.3.1 Intérêt du point de vue économique

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts. En effet, le clinker étant obtenu par transformation de la crue (argile + calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction de cet ajout [Beni-Remour, 1993].

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.

1.3.3.2 Intérêt du point de vue technique

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) de même classe de résistance. Parfois la chute de résistance à court terme limite leur utilisation en préfabrication. En second lieu, les ciments composés (CPA + ajouts) présentent souvent l'avantage sur le CPA, d'une meilleure résistance aux agressions chimiques.

Le remplissage des vides est lui-même aussi responsable de la durabilité du mortier ou béton obtenu.

Les ciments composés seront toujours recommandés chaque fois que les bétons seront exposés aux agents agressifs (ouvrages à la mer ou bien exposés aux produits chimiques).

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.

1.3.3 Utilisation des ajouts en Algérie

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, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf. Le tableau (1.2) donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes.

Tableau 1.2 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [Aichouba, 2005].

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

1.3.4. Hydratation des ciments pouzzolaniques

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 [A.K.Ramezani, 1987]. Il est à noter que la première est une réaction de consommation de chaux, tandis que la dernière est une réaction de consommation-production de chaux (Figure.1.5) [Mehta, 1981].

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 ciment 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 [Shi, 2000].

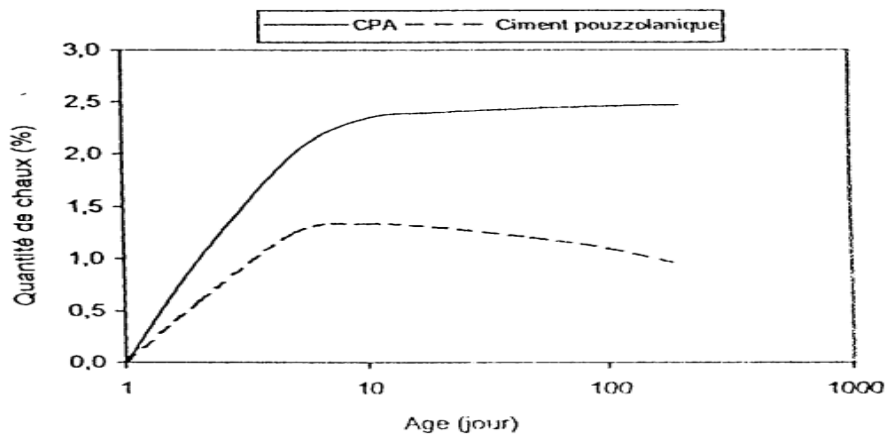


Figure 1.5. *Changement de la quantité de chaux d'un ciment pouzzolanique hydraté [Shi, 2000]*

I.4. Sable

I.4.1. Introduction

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, ne pas contenir d'éléments nocifs il convient de se méfier de la présence de sables granitiques, de micas en paillettes, d'argile, de sulfates... et dans le cas de sable concassé, des poussières, des plaquettes, des aiguilles [Arroudj et al., 2002].

I.4.2. Sable de dune

I.4.1 Introduction

Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie etc. Les déserts de sable, ou ergs, se localisent dans les vastes cuvettes d'épandage où des puissantes accumulations alluviales se sont concentrées par de grands écoulements liés aux périodes pluviales du début du quaternaire (Figure I.6). Le sable de dune peut être considéré comme une source quasi inépuisable de matériau.

L'utilisation et l'exploitation future de ce type de sable constituent ainsi une des nouvelles préoccupations des chercheurs et intéressent différents domaines comme la microélectronique, l'énergie solaire (cellule photovoltaïque), la métallurgie, le génie civil, et le génie mécanique, ses applications et son exploitation sont liées à sa teneur en silice et à la taille, la forme et la nature de ses grains.



Figure I.6. Dunes de sables

Le sable de dune est composé de différents minéraux, tels que la silice, les silicates, les carbonates et les argiles (les silicates sont la famille la plus abondante dans la nature, représentant 90 % en masse de l'écorce terrestre). Les sables de dunes étudiés sont essentiellement des sables Siliceux, les carbonates et les argiles se trouvant sous forme de traces [Alimen, 1957].

I.4.2 Sable calcaire

Les sables de concassage calcaires sont le produit fin d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières. Les roches calcaires sont des roches carbonatées qui contiennent au moins 50% de Carbonates de Calcium (CaCO_3). Ils peuvent être accompagnés de Dolomite, d'Aragonite, de Sidérites et de Minéraux Argileux [Alimen, 1957]. La production des sables de concassage de roches massives est toujours accompagnée d'une grande quantité de fines ($80\mu\text{m}$) plus ou moins importante. Ces fines peuvent être inertes ou actives :

a. Fines inertes

Elles adhèrent peu à la surface des grains de sable, ce qui permet de les éliminer par la ventilation à l'air par exemple, elles ont pour effet l'amélioration de la maniabilité à condition

d'être en proportion limitée, le maintien de l'homogénéité des bétons et l'empêchement de la ségrégation des granulats. Elles ont aussi des effets physico-chimiques favorables à savoir :

- La création de liaisons entre les réseaux des éléments du ciment et de la Calcite à l'échelle des assemblages Cristallins.
- L'activité pouzzolanique : la combinaison avec la chaux du ciment et certaines fines siliceuses.
- L'accélération des réactions due à la dispersion de la pâte de ciment par des fines de mêmes dimensions et création de germes cristallins.

b. Fines actives

Ce sont celles qui présentent des propriétés colloïdales, dues à leur micro-structure et leurs charges électriques. Ce phénomène est défini comme l'activité superficielle d'un minéral, c'est-à-dire toute manifestation physique et chimique de la charge superficielle. Le comportement colloïdal se manifeste au-dessous de 2 microns, c'est-à-dire dans les argiles. Parmi les propriétés colloïdales on distingue :

- Flocculation (capacité de s'agglutiner sous forme de flocons).
- Echange ionique.
- Thixotropie (propriétés des suspensions argileuses de se prendre en masse au repos).

1.4.3 Formations Géologiques en calcaire de la région de Laghouat

Les séries sédimentaires de la région de Laghouat et des régions avoisinantes sont constituées par des formations Mésozoïques qui sont déposés, à l'origine, dans un sillon subsidence. Il existe aussi des formations Cénozoïques et Quaternaires. Les formations Mésozoïques se trouvent selon quatre ensembles principaux :

- Jurassique inférieur avec des argiles gypso-salines, accompagnées de roches éruptives attribuées au trias, et n'affleurant généralement qu'à la faveur de diapirs et de quelques accidents locaux.
- Jurassique supérieur caractérisé par une alternance de calcaires, de grès et de marno-calcaires, de marnes et d'argiles.
- Crétacé inférieur connu par les puissantes séries détritiques gréco-argileux avec des passées carbonatées, il s'agit des formations Barrémien-Aptien-Albien. Ces séries occupent de vastes zones de dépression entre les Anticlinaux et les Synclinaux.
- Crétacé supérieur, ce sont des argiles à gypses et bancs dolomitiques (Cénomanién Turonien Sénonien), constituent des Synclinaux perchés. Les terrains tertiaires sont à dominante Silico-Calcique, souvent Azoïques et constituent les principaux dépôts du

tertiaire continental et prennent une position souvent discordante sur les formations secondaires, tandis que les formations quaternaires sont représentées par des terrasses qui témoignent des oscillations climatiques ou cours du quaternaire dans les vallées.

Les sols ont une origine alluviale, tandis que les dunes de sable quaternaire occupent les zones déprimées et les flancs des reliefs. L'étude géologique montre la puissance des formations carbonatées à l'échelle verticale et particulièrement à l'échelle horizontale, présentées principalement par des calcaires qui peuvent être regroupées en plusieurs unités lithologiques, comme il est illustré sur le tableau I-3 ci-dessous :

Tableau I.3 : Epaisseur des unités Litho-Stratigraphiques Carbonatées du Mésozoïque dans la région de Laghouat [Makhloufi, 2001].

Lithostratigraphie de la formation géologique	Epaisseur (m)
Calcaire du Sénonien	x10
Bonne Calcaire Dolomitique du Turonien	plus de 20
Calcaire fin blanc de l'Albien Supérieur	60
Bonne Calcaire Intra Gréseuse Aptienne	15-20
Bonne Calcaire Portlandienne	160-250
Marno-Calcairesbleutés du Kimméridgien Supérieur	200-350
Repérés Calcaires massifs du Kimméridgien Inférieur	50-130
Calcaires Lumachelliques du Kimméridgien Inférieur	200
Calcaires à Polypiers du Kimméridgien Inférieur	Plus de 100

D'après les études réalisées par certains chercheurs, il s'est largement avéré que les carbonates et plus particulièrement les calcaires favorisent les réactions d'hydratation du ciment Portland en améliorant la cohésion de la matrice (pâte de ciment) au granulat. Cette caractéristique est mise en évidence par le mode de propagation de la fissure dans un mortier, ou un béton calcaire où la fissure est trans granulaire. Cette adhérence améliore aussi la résistance à la traction des bétons calcaires.

L'étude comparative de deux bétons à hautes performances, l'un composé d'un sable siliceux et l'autre d'un sable calcaire, a révélé que les affaissements sont presque les mêmes, et que les résistances à la compression sont quasi-identiques jusqu'à 28 jours, tandis qu'à l'âge de 90 jours les bétons à sable siliceux montrent une augmentation de la résistance de l'ordre de 6 MPA par rapport aux bétons à sable calcaire.

Pour les ciments de nature différente, les performances mécaniques des mortiers composés de sable normal, se sont montrées légèrement supérieures à celles des mortiers constitués de sables

calcaires tendres.

L'utilisation des bétons et mortiers à bases de sables calcaires concassés peut être recommandés à condition que la dureté de ces granulats satisfasse aux exigences des normes en vigueur. L'emploi de ces bétons semble être intéressant surtout lorsqu'ils sont associés à des adjuvants. La résistance à la compression peut atteindre 55 MPa lorsqu'on additionne un adjuvant Medafluid SFA au béton ; elle peut même aller jusqu'à 60 MPa avec un adjuvant Medafluid SF [Makhloufi, 2001].

1.4.4 Influence des sables calcaires sur les bétons ordinaires

Les granulats calcaires ont été utilisés dans les bétons ordinaires mais une mauvaise connaissance du comportement mécanique de l'assemblage pâte durcie-granulats et du rôle des fines avaient conduit les prescripteurs à établir des normes dont certaines exigences avaient pour conséquence de les exclure.

Ont effectué des recherches portant principalement des sables calcaires issus de roches dont la résistance mécanique couvre une vaste gamme (Los Angeles de 22 à 62). Ils avaient pour objet de juger de l'intérêt et de l'utilité de spécifier un critère de résistance « la friabilité pour les sables », de montrer le rôle bénéfique des fines calcaires, de mieux comprendre leur comportement et d'adopter ainsi des éléments concrets pour réviser les normes actuelles ou en établir de nouvelles [Bertrand et al., 1993].

Quatorze matériaux calcaires, de Los Angeles compris entre 22 et 62, répartis dans les diverses formations de roches carbonatées des massifs calcaires et grands bassins sédimentaires français ont été choisis.

Les sables qui en sont issus ont été composés de façon à ce que la granularité de la fraction supérieure à 0.08 mm soit une constante, leur proportion de fines variant suivant la séquence 0-6-10-15-20%. Le sable de base à 6 % de fines a un module de finesse de 2.64 ± 0.21 . Il s'inscrit dans un fuseau dont l'étendue est de $\pm 3\%$ à $\pm 5\%$. Deux sables alluvionnaires et le sable normalisé sont retenus à titre de comparaison.

Sur des mortiers (éprouvette 4 x 4 x 16 cm), à rapport sable / ciment égal à 3,5 en volume absolu confectionné avec un ciment CPA 55 et des sables à 6 % de fines à rapport E/C constant ou à maniabilité constante, [R. Bertrand, 1993] et ses collaborateurs [Arroudj, 2002] ont étudié les variations de caractéristiques :

- ✚ Résistance (traction et compression, module d'élasticité).
- ✚ Retrait-capillarité.

L'étude réalisée par Makhloufi [Makhloufi, 2001] a permis de conclure les résultats suivants :

- ✚ Les bétons fabriqués à partir des granulats calcaires concassés, ont un comportement mécanique qui se rapproche de celui des bétons fabriqués par des granulats alluvionnaires siliceux et silico-calcaires.
- ✚ Après 28 jours de conservation dans un environnement ambiant, la résistance à la compression peut atteindre 25 MPa.
- ✚ L'étude des propriétés mécaniques a montré, aussi, que malgré la tendance analogue des bétons calcaires non superplastifiés et des bétons traditionnels à granulats siliceux, la résistance à la compression à 28 jours des BCNS (béton calcaire non superplastifié) reste toujours inférieure à celle des BT (béton traditionnel) sans superplastifiant notamment, pour des rapports C/E >2 où la réduction peut aller de 24 à 40 %, pour des rapports C/E <2, cette réduction est de l'ordre de 20%.
- ✚ Les résistances à la traction par fendage a mis en évidence une augmentation de 15% pour un rapport C/E=1,5.
- ✚ La résistance à la traction des bétons calcaires est nettement supérieure à celle des bétons traditionnels.

I.5 Propriétés thermiques

I.5.1 Introduction

La plupart des matériaux utilisés dans la construction pour l'isolation thermique des bâtiments sont des matériaux poreux. Aussi la connaissance des propriétés physiques de ces milieux poreux revêt-elle une grande importance, en particulier les lois qui régissent les transferts de chaleur et de masse dans ces matériaux.

La conductivité thermique λ est le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique λ est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

Un béton usuel à base de granulats rigides, contient de l'air, dû à l'arrangement de la phase solide (squelette granulaire) et à la prise de liant. Or, l'air immobile conduit faiblement la chaleur. Les bétons à base de granulats légers ont donc été développés, car ils permettent d'augmenter la proportion volumique d'air dans le matériau, en ajoutant l'air intra-particule. A

titre comparatif, un béton hydraulique ($\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de $2,0 \text{ W/(m.K)}$ tandis qu'un béton d'argile expansé ($\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de $0,60 \text{ W/(m.K)}$ [Arnould, 1986].

Un deuxième élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la chaleur massique ou chaleur spécifique C en J/(kg.K) . Cette grandeur caractérise la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de 1°C . Plus la chaleur massique sera élevée, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente. Il sera donc moins sensible aux variations de températures du milieu extérieur. Un coefficient C élevé traduit une forte inertie thermique donc une tendance du matériau à peu évoluer lorsque les conditions extérieures changent. Il sert ainsi de régulateur de la température à l'intérieur de la structure.

Un dernier élément concernant les propriétés thermiques des bétons légers est lié au pouvoir absorbant de ces matériaux, qui peuvent contenir des quantités d'eau non négligeables. L'eau étant un excellent conducteur, elle induit une augmentation de la conductivité thermique du béton, en se substituant à l'air isolant.

Des études similaires à celles réalisées sur les bétons de granulats légers, montrent les variations de conductivité λ en fonction de la teneur en eau, voir figure I-7.

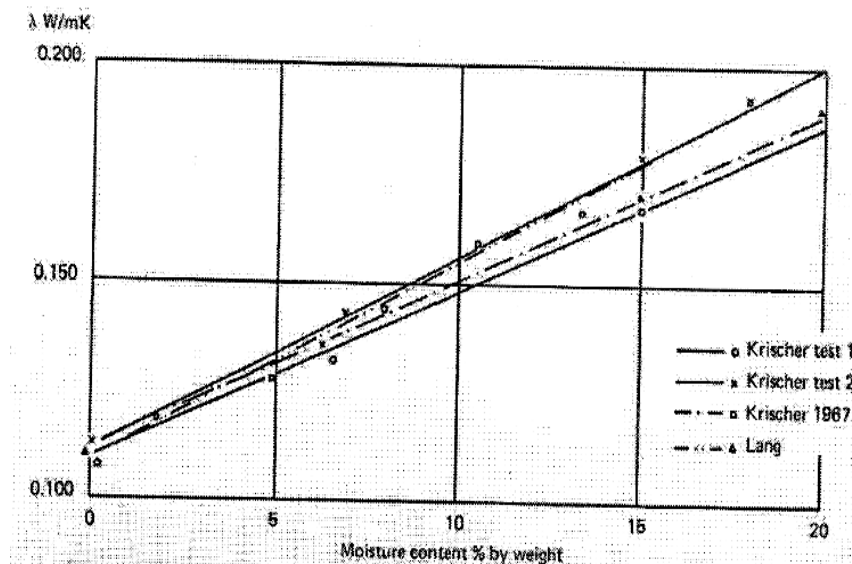


Figure I.7. Conductivité thermique λ en fonction de la teneur en eau massique

Les caractéristiques thermiques de certains matériaux sont illustrées dans le tableau I-4.

Tableau I.4 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux [Hinana et al. , 2010].

	P (kg/m ³)	Porosité s (%)	C (J/kg.k)	(W/m.k)
Air	1.2	-	1000	0.026
Eau liquide	998	-	4180	0.602
Béton hydraulique	2330	8	1050	1.80 à 2.00
Béton argile expansé	1600	36	900	0.46
Béton cellulaire	350à650	75 à 82	880	0.16 à 0.33
Béton de bois	600 à 900	52	1200	0.09 à 0.30
Brique	1800	-	860	1.15

1.5.2 Caractérisation d'un milieu poreux

Un milieu poreux est un mélange de plusieurs phases de caractéristiques différentes. Une des phases constitue la matrice solide supposée indéformable. Cette phase définit les frontières d'un certain nombre d'espaces appelés "pores" renfermant un ou plusieurs fluides (Figure 1.8). Les pores peuvent être isolés au sein du matériau (pores fermés) ou débouchant à la surface (pores ouverts).

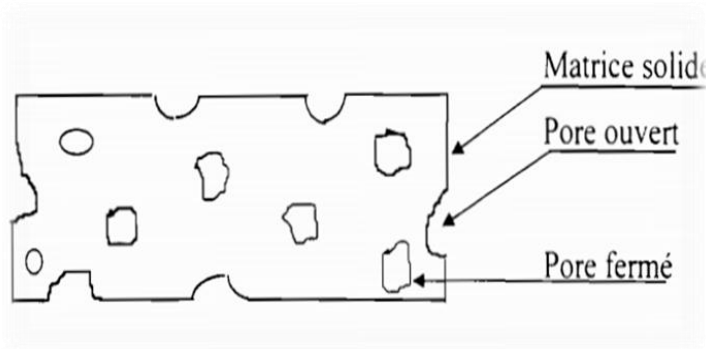


Figure 1.8. Schéma d'un milieu poreux

La proportion des pores par rapport à la matrice solide est variable d'un matériau à un autre, elle définit sa porosité. La phase liquide occupant une partie des pores caractérise la teneur en humidité du matériau: celle-ci est directement liée aux caractéristiques thermiques et mécaniques du matériau.

1.5.2. 1 Porosité totale

La porosité totale ϵ d'un matériau est la fraction sans dimension du volume occupé par les pores ouverts et fermés sur le volume total apparent. Elle donne des informations quantitatives sur les volumes respectifs des deux phases (solide - fluide) en présence, mais ne fournit pas d'indication sur leur répartition dimensionnelle et spatiale.

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_a} \quad (1.6)$$

avec :

V_p : volume total des pores,

V_a : volume apparent du matériau poreux : $V_a = V_p + V_s$.

V_s : volume occupé par la phase solide.

1.5.2. 2 Porosité ouverte

La porosité ouverte d'un matériau ε_0 est la fraction sans dimension du volume occupé

par les pores ouverts sur le volume total:

$$\varepsilon_0 = \frac{V_0}{V_a} \quad (1.7)$$

Avec V_0 : volume des pores ouverts

1.5.2. 3 Porosité fermée

La porosité fermée d'un matériau ε_1 est la fraction sans dimension du volume occupée par les pores fermés sur le volume total.

$$\varepsilon_1 = \frac{V_1}{V_a} \quad (1.8)$$

Avec V_1 : volume des pores fermés.

1.5.3 Transferts thermiques dans les matériaux poreux

La qualité isolante des matériaux poreux utilisés dans le bâtiment revêt un caractère important. Nous présenterons, de ce fait, les mécanismes de transfert de chaleur dans ce type de matériau.

Si on considère une paroi mince constituée de matériau poreux d'épaisseur e et de températures T_c et T_f sur les deux faces (Figure 1. 9).

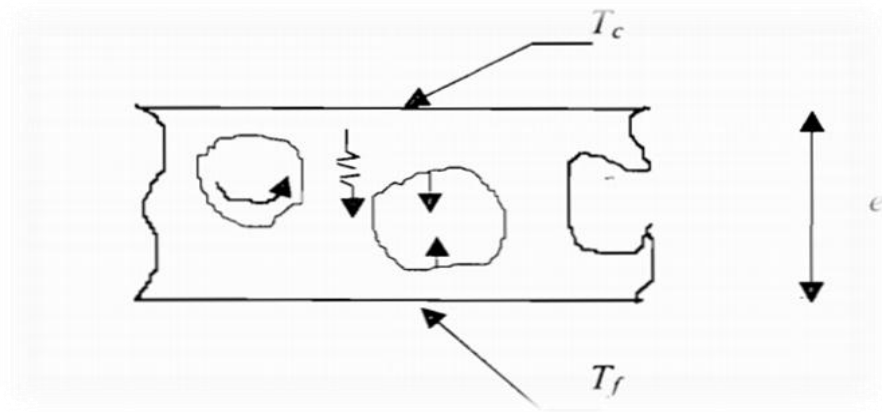


Figure.1.9. Transfert de chaleur dans un matériau poreux

En régime permanent la densité des flux Q qui traverse le matériau est égale à:

$$Q = \frac{\lambda}{e} (T_c - T_f) \quad (1.9)$$

λ est la conductivité thermique globale ou apparente, car tout en supposant le matériau sec donc en négligeant les transferts de matière. Différents mécanismes de transfert superposent:

- convection dans les pores,
- conduction thermique dans la matrice solide,
- conduction thermique dans le fluide de contenu dans les pores,
- rayonnement entre les parois des pores.

1.5.3.1 Transfert de chaleur par convection

L'apparition d'un gradient de température au sein d'un matériau poreux entraîne l'existence d'un gradient de masse volumique du fluide contenu dans les pores. Un mouvement de l'air ou de tout autre gaz présent au sein des cavités peut intervenir (Figure 1.10), il dépend du sens du gradient de température entre les parois par rapport aux forces de pesanteur. Ce mouvement est d'autant plus actif que :

- la différence de températures $T_c - T_f$ est forte.
- le diamètre des pores est grand.

Dans le cas des matériaux du bâtiment $T_c - T_f$ est faible et le diamètre des pores est relativement faible : les phénomènes de convection dans les pores sont donc négligeables.

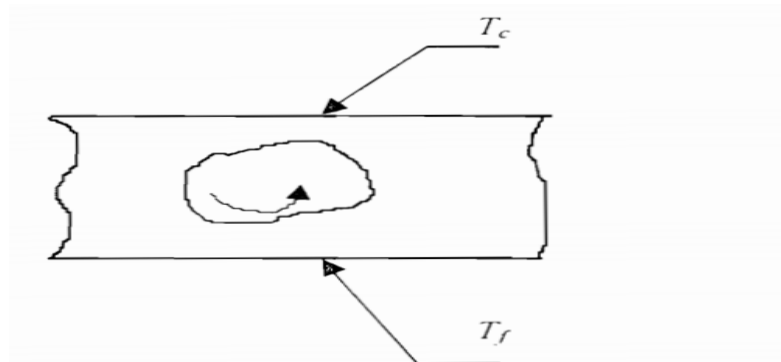


Figure 1.10. Mouvement du fluide dans les pores

1.5.3.2 Transfert de chaleur par conduction

Le transfert de chaleur par conduction concerne les systèmes solides et les fluides où la conduction de chaleur ne peut avoir lieu que lorsque deux points du même système sont à des températures différentes. En effet, ce mode de transfert thermique résulte du mouvement dû à l'agitation moléculaire qui est liée à l'existence d'un gradient de températures.

En assimilant le milieu poreux hétérogène par nature à un milieu continu homogène "équivalent" et en négligeant l'influence du changement de phase sur le champ thermique (faibles températures). Les phénomènes de transfert thermique au sein d'un matériau poreux saturé par un fluide immobile sont décrits par l'équation:

$$\text{Div} (\lambda \text{ grad} T) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.10)$$

En général la conductivité thermique λ est un tenseur d'ordre deux. Ce dernier se réduit à un scalaire pour un milieu homogène isotrope, dont les caractéristiques thermiques sont indépendantes des coordonnées spatiales et de la température. L'équation prend alors la forme:

$$\frac{\lambda}{\rho C_p} \Delta T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.11)$$

Le rapport $\frac{\lambda}{\rho C_p} = a$ est la diffusivité thermique du matériau.

C_p : capacité thermique.

ρ : la masse volumique.

λ : la conductivité thermique.

La transmission de chaleur par conduction pure s'effectue:

- dans les gaz inclus dans les pores,
- dans la structure du solide.

En tenant compte de la distribution aléatoire des pores et de leur géométrie peu régulière, différents modèles approchés ont été mis au point pour représenter le transfert de chaleur par conduction pure dans le matériau. L'objet de cette approche de la modélisation du transfert de chaleur dans les matériaux poreux est de présenter quelques modèles théoriques permettant d'interpréter ou de prévoir la conductivité thermique apparente des milieux poreux lors des transferts de chaleur sans migration.

Les résultats de plusieurs essais ont montré que la conductivité thermique d'un milieu poreux est toujours comprise entre la conductivité de la phase solide et celle de la phase liquide. L'ensemble des modèles existant tente de prévoir la conductivité thermique effective du matériau poreux en se basant sur plusieurs hypothèses concernant la nature des interfaces solide- fluide.

I.6 Durabilité du béton

I.6.1 Introduction

La durabilité peut être définie comme le maintien de la qualité de l'ouvrage sur une longue durée. On peut dire que la durabilité d'un ouvrage n'est rien d'autre que la durabilité de ses propriétés de service. Il existe un très grand nombre de structures en béton âgées de 40 à 90 ans qui sont encore en excellent état. Il existe aussi de très nombreux cas où une mauvaise durabilité a provoqué la ruine complète ou partielle des ouvrages.

Dans tous les pays, on rencontre des structures qui datent de plusieurs siècles. Cependant, des accidents peuvent survenir durant la réalisation ou à tout moment de la durée de vie des constructions. Ce sont les accidents, limités en nombres, mais généralement fatals en vie humaine et en coût qui attirent l'opinion publique [Baron, 1997].

La qualité du béton n'a pas cessée de connaître des progressions considérables dans ses performances. Par ailleurs ; la qualité du béton (matériaux et mise en œuvre) représente parfois une cause principale des cas pathologiques des constructions, et des désordres qui en résultent à long terme (durabilité) par des processus physico-chimiques (infiltration d'eau, fissuration,

corrosion,.....etc.).

1.6.2 Causes de désordres dans les constructions

Plusieurs chercheurs ont analysé les causes principales des désordres dans les constructions. Les désordres sont en général dus à la conjonction de plusieurs causes qui peuvent être liées :

- Au calcul et à la conception : erreurs de conception et de calcul; insuffisance des hypothèses de calcul, la non prise en compte des variations dimensionnelles ;
- A la qualité des matériaux : granulats, ciment, eau de gâchage, adjuvant et aciers.
- Au sol: absence ou insuffisance d'étude géotechnique et mauvais choix du site.
- A la mise en œuvre: absence de détails de dessins, de contrôle, non-respect des règles de l'art, des prescriptions concernant surtout l'enrobage des aciers, l'ancrage des armatures, bétonnage, la cure, le coffrage et le décoffrage.

1.6.3 Principales causes de détériorations

Le béton frais a un caractère fortement basique, dû à une proportion élevée d'hydroxyde de calcium($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Le PH du béton non-carbonaté est d'environ 12,5. Mais le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est peu à peu carbonaté par le CO_2 de l'air, ce qui fait baisser le PH. Dans des bétons ou mortiers étanches à l'eau, il est impossible d'avoir une attaque par des solutions agressives ou d'autres, dans la partie carbonatée, le PH descend environ à 7, ce qui est le PH d'équilibre de la solution saturée de carbonate de calcium, mais s'il y a une humidité dans l'ouvrage. Il se produit un échange de protons, ce qui rend imprécise la frontière du PH. En revanche, dans le cas d'une eau riche en acide carbonique, la carbonatation peut être accélérée. Le béton durci est produit à la suite de l'hydratation du ciment Portland qui réagit avec l'eau pour former des C-S-H (silicates de calcium hydratés).

Les C-S-H jouent le rôle de colle qui solidarise les granulats entre eux pour créer un matériau rigide. La pâte de ciment représente 25% à 40% du volume de béton. La plupart des propriétés du béton et plusieurs aspects de la durabilité du béton sont les propriétés physico-chimiques. Il est donc important de comprendre la structure de base de la pâte de ciment hydraté. [Baron, 1997].

1.6.4 Facteurs de durabilité

Pour fabriquer un ouvrage durable, il faut utiliser un matériau durable. Les caractéristiques du mortier et béton qui contrôlent la durabilité sont citées dans ce qui suit :

1.6.4.1 Influence des propriétés des matériaux

Pour que le béton ou le mortier soit fabriqué correctement, il faudra que les constituants des matériaux aient une qualité convenable et suivent certains traitements de façon inadéquate au cours de fabrication.

a) Type de ciment

Certains types de ciment offrent de meilleures performances en présence d'eau de mer ou de granulats potentiellement réactifs en milieu marin. Il peut être nécessaire d'utiliser un ciment type 50 à faible teneur en alluminate tricalcique (C_3A) pour limiter les risques de réaction alcali-granulats, comme on peut choisir un ciment à faible teneur en alcalis

b) Ajouts minéraux

Certains ajouts minéraux tels que, la fumée de silice, les cendres volantes, les laitiers et le calcaire peuvent modifier considérablement le comportement du béton ou mortier exposés à un environnement donné. Ils peuvent parfois améliorer ou diminuer la durabilité selon le dosage et la réactivité. A l'heure actuelle, il est possible de fabriquer des bétons de 150 MPa à condition de pouvoir disposer d'un ciment spécialement conçu à cet effet, des ajouts et des granulats particulièrement performants [Bedard, 1990].

1.6.4.2 Influence du rapport E/C

Le rapport E/C est un paramètre fondamental qui contrôle la plupart des propriétés physico-chimiques du béton. Du point de vue durabilité, une réduction du rapport E/C est presque toujours bénéfique car elle entraîne la diminution de la porosité de la pâte de ciment hydraté ainsi que la perméabilité [Baron, 1997]. De plus une résistance à la compression élevée est généralement un indice de bonne qualité et signe d'un rapport E/C faible qui produit une pâte de ciment durci de meilleure qualité (porosité et perméabilité plus faible) [Belaidi, 2003].

1.6.4.3 Mise en œuvre du matériau

Si les méthodes de mise en place et de mûrissement ne permettent pas au béton de développer toutes ses qualités, la durabilité de l'ouvrage pourra être considérablement réduite. A titre d'exemple, une mauvaise technique de mûrissement et de cure réduit la capacité du béton à résister à différents types d'agressions. Comme il faudra aussi vérifier l'étanchéité et la conception des coffrages [Belaidi, 2003].

1.6.4.4 Effets du climat chaud sur la durabilité du béton et mortier

Une structure de béton évolue de manière rapide en fonction des conditions climatiques et du type d'exposition face aux agents potentiellement agressifs. Dans les climats chauds et secs, les exigences touchant à la qualité du béton et mortier sont généralement sévères.

Les températures élevées sont toujours les principales causes de la dégradation du béton et mortier [Guemmadi et al, 2001]. Elles entraînent des désordres plus graves si on se trouve sous un climat très sec, et favorisent l'évaporation rapide de l'eau de gâchage ce qui provoque ainsi un retrait important. Cette évaporation est d'autant plus à craindre lorsqu'elle affecte l'eau nécessaire à l'hydratation [Belaidi, 2003].

1.6.4.5 Perméabilité

La perméabilité du béton à un fluide (eau, air, etc.) est une propriété très importante en pratique pour l'utilisation des éléments en béton et pour leur durabilité. L'étude et la mesure expérimentale de celle-ci présente plusieurs difficultés. Dans un milieu poreux, la perméabilité est influencée par l'importance des espaces vides, des discontinuités (fissures) de la structure et du réseau de pores. La figure I.11 montre la relation entre la perméabilité et le rapport E/C de la pâte de ciment à maturité (ciment hydraté : 93%) [Neville, 2000].

D'une façon générale, la perméabilité dépend des paramètres suivants : rapport E/C, type de ciment, humidité relative. Par contre la diffusivité est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Contrairement à la perméabilité, la diffusivité dans un matériau poreux ne dépend pas de la taille des pores, mais dépend de leur interconnexion [Makhloufi, 2001].

1.6.4.6 Compacité et porosité

La compacité est une propriété essentielle qui conditionne la résistance mécanique, le module d'élasticité et la durabilité. La porosité est définie comme étant le paramètre du premier ordre de la durabilité, car pour une porosité donnée, la diminution de la dimension des pores entraîne une augmentation de la résistance de la pâte de ciment. Le tableau I.5 présente la qualité des bétons en fonction de la compacité et la porosité.

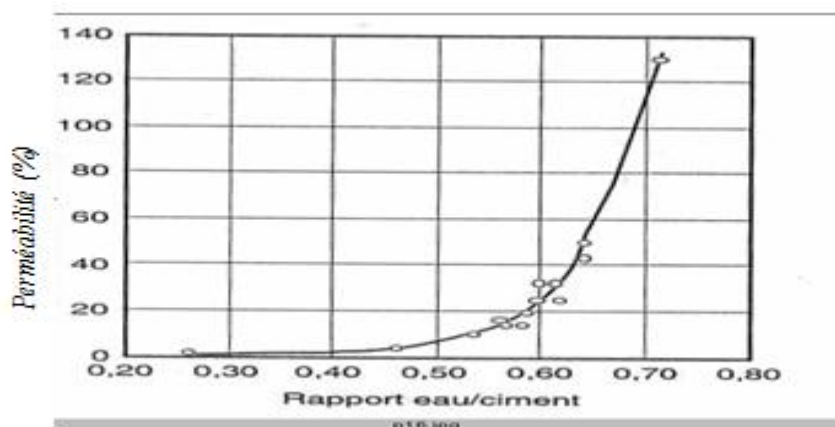


Figure I.11. Relation entre la perméabilité et le rapport E/C de la pâte de ciment
(Ciment hydraté : 93%) [Neville, 2000]

1.6.4.7 Phénomène de carbonatation

La carbonatation est la transformation de la portlandite en carbonate de calcium par l'action du gaz carbonique dissous dans la phase liquide interstitielle dans la pâte de ciment durci, ce qui provoque la corrosion des armatures [Baron, 1997]. Le taux de carbonatation augmente avec la teneur en CO₂ et la présence des fissures dans le béton et mortier.



Des chercheurs ont montré que s'il y a prolongation de la période de mûrissement humide de 1 à 3 jours, la profondeur de carbonatation diminue d'environ 40% [Guemmedi, 2001]. D'autres signalent que les ajouts de laitiers et de cendres volantes dans le béton accroissent de façon significative la carbonatation par rapport à un béton de ciment Portland [Baron, 1997].

Tableau I.5 : Compacité et porosité des bétons [Bedard et al., 1990].

Compacité et porosité des bétons		
Compacité	Porosité	Qualité des bétons
0.89 à 0.9	10 à 11%	Excellente
0.85 à 0.86	12 à 15%	Bonne
0.82 à 0.84	16 à 18%	Satisfaisante
0.78 à 0.81	19 à 22%	Médiocre
<0.78	>22%	Mauvaise

1.6.4.8 Cycles gel –dégel

Chaque cycle de gel provoque une migration de l'eau vers les zones où elle peut geler. Ces

zones de gel comprennent de fines fissures qui s'élargissent sous l'effet de la pression de la glace et ne se referment pas lors du dégel, puis elles se remplissent d'eau.

Lorsque les conditions en service font que la température d'un béton saturé passe en dessous du point de congélation, l'eau dans les pores capillaires de la pâte durcie gèle progressivement d'une façon identique à celle des pores d'une roche et donne lieu à une expansion. Le phénomène d'expansion du béton se produit principalement dans la pâte de ciment hydraté et les vides les plus importants dus à un serrage ou compactage incomplet du béton [Bedard et al., 1990].

1.6.4.9 Action des solutions agressives

La durabilité du béton s'explique, en grande partie, par la difficulté à la quelle les agents agressifs pénètrent dans le réseau poreux des bétons ou mortiers. De ce fait, l'agressivité du milieu où se trouve l'ouvrage doit être prise en considération. Pour un CPJ contenant 63% de clinker, 10% de laitier et 17% de cendres volantes, qui sont tous des éléments actifs, on s'attendra à des bonnes résistances au milieu agressives. Tandis que pour un ciment CPJ constitué de 75% de clinker et 25% de filler dont l'activité chimique est tout à fait négligeable.

I. 7 Conclusion

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments.

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET

ESSAIS REALISES

II.1 Introduction

Avant d'effectuer les différents essais sur les mortiers, il convient de déterminer les caractéristiques mécaniques, physiques et thermiques de chaque matériau entrant dans la composition du composite étudié et de donner un aperçu sur les différentes techniques expérimentales utilisées.

En effet, les matériaux de base utilisés sont : un sable dunaire et un sable calcaire provenant de la région de Laghouat, un ciment espagnole, une pouzzolane naturelle provenant de Beni-saf (Ouest algérien) et des fillers calcaires obtenus par tamisage des déchets de concassage des granulats calcaires de la région de Laghouat et de l'eau potable.

II.2 Ciment

Le ciment employé est un ciment portland de type CPA CEMI 42.5. C'est un ciment résistant aux sulfates disponible sur le marché et provenant de la cimenterie CEMEX d'Espagne.

II.2.1 Masse Volumique Absolue

C'est la masse par unité de volume absolue du corps, c'est à dire de la matière qui constitue le corps sans tenir compte du volume des vides. Cet essai est réalisé selon la norme NFP18-555.

$$\rho_{ab} = M_s / V_s \quad (II.1)$$

M_s : masse des grains solides ;

V_s : volume des grains solides.

Dans notre cas $\rho_{ab} = 3125 \text{ kg/m}^3$

II.2.2 Masse Volumique Apparente

C'est la masse par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Cet essai est réalisé selon la norme NFP18-555 .

$$\rho_{app} = M_t / V_t \quad (II.2)$$

M_t : masse total de l'échantillon ;

V_t : volume total de l'échantillon.

Dans notre cas $\rho_{app} = 1024 \text{ kg /m}^3$.

II.2.3 Finesse du ciment

Pour cette caractéristique, on utilise, le perméabilimètre "BLAINE" qui détermine la surface spécifique qui est le total des aires des grains contenus dans l'unité de masse ou de volume (Figure II-1).

Le principe consiste à déterminer le temps de passage d'une certaine quantité d'air à travers une certaine quantité de poudre dans des conditions bien déterminées [Lanchon, 1978].

La surface spécifique a pour expression :

$$S = k \frac{\sqrt{e^3 \sqrt{t}}}{\rho(1-e)\sqrt{n}} \quad (II.3)$$

Ou:

K : Constante de l'appareil ;

e : Porosité ;

t : Temps mesuré en secondes;

ρ : Masse volumique absolue ;

η : Viscosité dynamique de l'air en fonction de la température.



Figure II.1. Perméabilimètre « Blaine »

Dans notre cas, la surface spécifique du ciment utilisé est de $S_{SP} = 2980 \text{ cm}^2/\text{g}$.

La surface spécifique d'un ciment CPA est généralement comprise entre 2800 et 3600 cm^2/g ; le résultat ainsi obtenu est donc acceptable.

II.2.4 Prise et consistance du ciment

II.2.4.1 Essai de consistance

Le but de cet essai est de déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage. Pour déterminer cette quantité d'eau, on utilise l'appareil de VICAT, muni de la sonde de consistance (cylindre $\varnothing$ 10 mm). La pâte est un mélange de ciment et un pourcentage d'eau.

En effet, l'essai de consistance ne donne pas directement une valeur numérique. Il ne peut que répondre par (oui) si la pâte est de consistance normale ou par (non) si la pâte n'est pas de consistance normale. Dans ce dernier cas, on doit changer le pourcentage d'eau de gâchage. La pâte est considérée à consistance normale si la distance de la sonde au fond du moule est entre 5 et 7 mm.

II.2.4.2 Essai de prise

Pour déterminer le début et la fin de prise, on utilise toujours l'appareil de VICAT (Figure II-2) muni d'une aiguille de VICAT (section 1mm²). La pâte étudiée sera gâchée avec la quantité d'eau déjà obtenue par l'essai de consistance.

Le tableau II-1 donne la nature de prise selon le temps de prise [Amel et al., 2005].

Tableau II.1: Nature et temps de prise du ciment.

Désignation	Temps de prise (tp)
Ciments à prise rapide	5 à 8 minutes
Ciments à prise ½ lente	8 à 30 minutes
Ciments à prise lente	30 minutes à 6 heures
Ciments à prise très lente	plus de 6 heures



Figure II.2. Appareil de VICAT

Avec : $t_p = t_{\text{final}} - t_{\text{initial}}$

Résultats expérimentaux

-Consistance

Après plusieurs essais avec différents pourcentages d'eau, on a trouvé, que le pourcentage 30 % donne une pâte à consistance normale. L'épaisseur mesurée est de 6,5 mm.

- Le début de prise est de 2h 40' à froid et 50' à chaud ;

- La fin de prise est de 5h 65' à froid et 85' à chaud.

D'après les caractéristiques physiques étudiées, nous constatons que :

-La finesse élevée du ciment utilisé aura pour effet l'augmentation de la résistance, mais elle aura une tendance à un retrait plus ou moins important.

-La prise du ciment à chaud est rapide, mais à froid elle satisfait aux spécifications des ciments courants.

II.2.5 Caractéristiques chimiques du ciment

La composition chimique du ciment CEMI est présentée dans le tableau II-2.

Tableau II.2 : Composition chimique du ciment [Itim et al., 2010].

Composants	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Cl	PAF
%	20,58	62,8	0,53	4,90	4,70	2,28	2,17	1,00

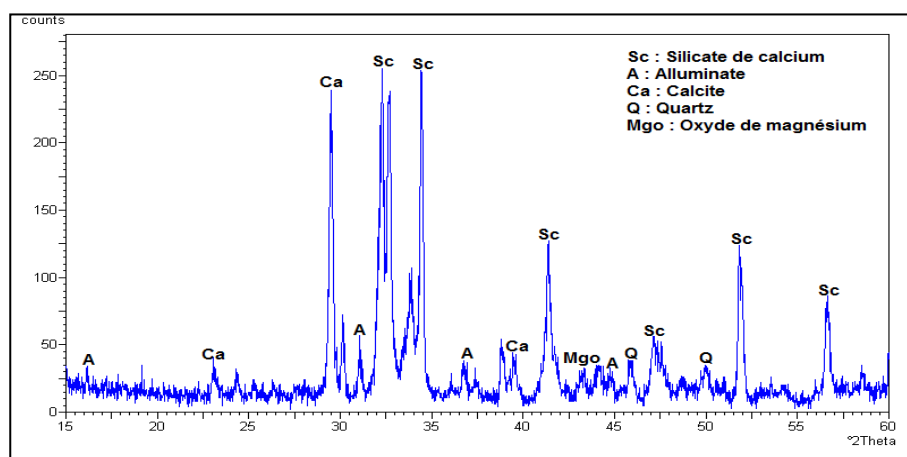


Figure II.3. Analyse par RX du ciment « CEMEX d'Espagne » CPA-42,5

D'après la figure II.3, on remarque la présence importante de silicate de calcium (C3S et C2S). L'aluminat se présente par des petites quantités, le quartz et la calcite se trouvent d'une façon systématique dans le ciment anhydre (C3S, C2S, C3A et C4AF).

II.3. Pouzzolane naturelle

Nous avons utilisé une pouzzolane naturelle, issue du gisement de Bouhammidi situé au sud de Beni-Saf (Algérie). La masse volumique absolue de cette pouzzolane est de 2.59 g/cm^3 . En outre, la Figure II.4 et le tableau 3, montrent respectivement, le spectre DRX et son analyse chimique.

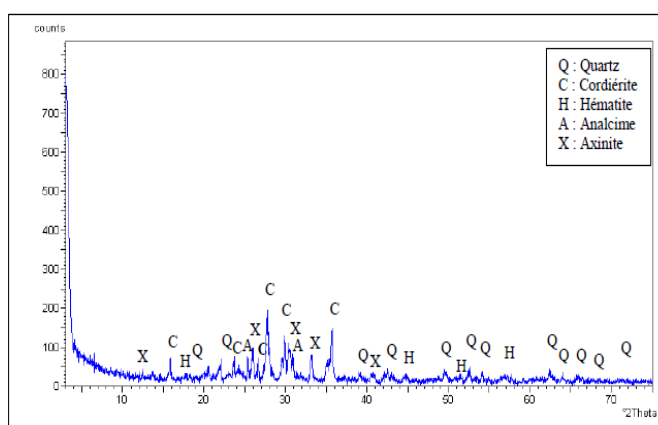


Figure II.4. DRX de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf [Makhloufi. Z , 2001]

Tableau II.3: Analyse chimique de la pouzzolane naturelle [Makhloufi. Z , 2001].

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Perte au feu
57.10	15.82	6.16	5.95	2.09	2.0	1.1	0.28	1.2

La pouzzolane naturelle est riche en silicate (SiO₂) et avec un degré moins l'Alumine, l'oxyde de fer et la chaux .

II. 4 Sable

II.4.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est l'un des essais primordiaux effectués pour un sable constituant un mortier; elle est définie par la norme NF P 18-560. Cet essai permet de déterminer la grosseur et

les pourcentages pondéraux des différentes espèces de grains constituant le sable étudié (Figure II-5). Le sable étudié est composé de 60% de sable de calcaire et 40% de sable dunaire.

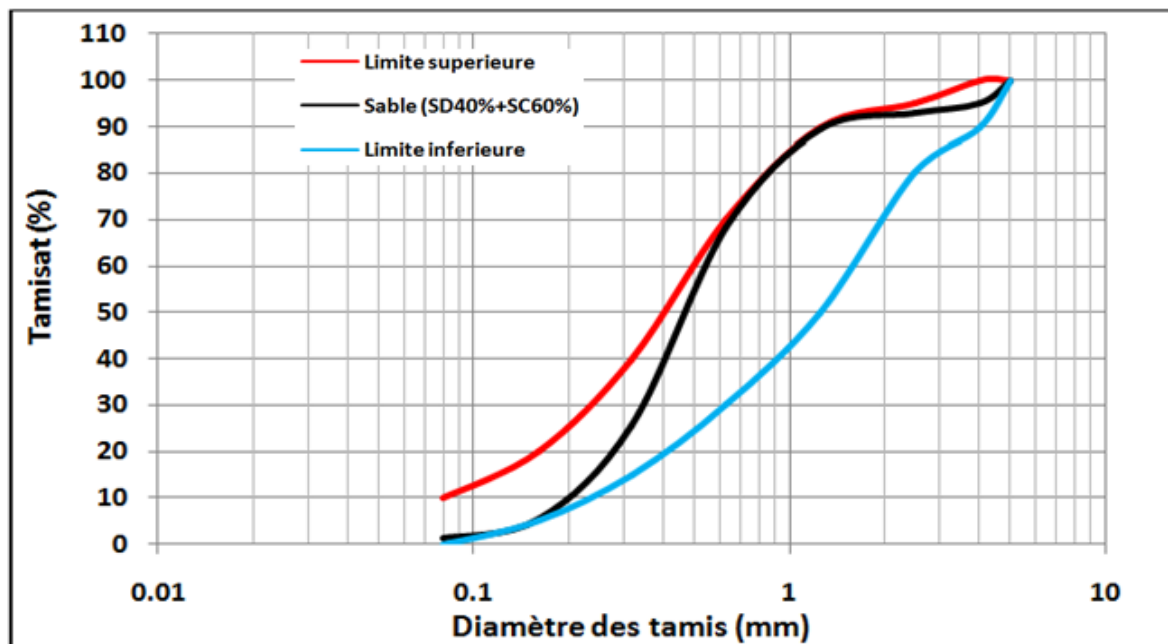


Figure II.5. Courbe granulométrique du sable utilisé (SD+Sc)

D'après l'analyse granulométrique de ce sable, on constate que la granulométrie est étalée, donc différents classes granulaires sont obtenues (différents diamètres existent, du plus petit grain au plus grand). Le squelette granulaire sera donc plus compact et par conséquent la porosité est relativement faible.

II.4.2 Module de finesse

Cet essai, qui est caractérisé par un facteur appelé module de finesse, consiste à évaluer la finesse des granulats. Ce module dépend essentiellement de la taille et de la répartition des agrégats utilisés. Il est donné par la relation II.4 [NFP 18-598].

Le module de finesse est égale au 1/(100)ème de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante :

0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5 – 10 – 20 – 40 et 80 mm.

$$M_f = \frac{\sum \text{refuscumulés}(\%) \text{ destamis (0.16, 0.315, 0.63, 1.25 et 5mm)}}{100} \quad (\text{II. 4})$$

M_f : Module de finesse $(1/100) \times 143,77 = 1,47$

Les résultats de l'étude du sable utilisé permettent de conclure qu'il est plus ou moins fin, propre et bon pour l'élaboration d'un mortier.

II.4.3 Masse volumique apparente

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent du corps. Elle est calculée selon la norme [NF P 18-555] et elle est exprimée par la relation II-5 :

$$\gamma_{app} = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (II. 5)$$

γ_{app} : Masse volumique apparente ;

M_2 : Masse du récipient + échantillon ;

M_1 : Masse du récipient vide ;

V : Volume du récipient.

II.4.4 Masse volumique absolue

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (sans vide), elle est exprimée par la relation II. 6.

$$\gamma_{ab} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (II. 6)$$

γ_{ab} : Masse volumique absolue ;

M : Masse de l'échantillon ;

V_2 : Volume après introduction de l'échantillon;

V_1 : Volume avant introduction de l'échantillon.

II.4.5 Equivalent de sable (E_s)

Cet essai consiste à évaluer la propreté du sable et à déterminer le pourcentage des impuretés et des poussières nuisibles (Figure II-6). Il est noté par « E_s » et calculé par la relation II-7.

$$E_s(\%) = 100 \cdot \frac{h_2}{h_1} \quad (\text{II. 7})$$

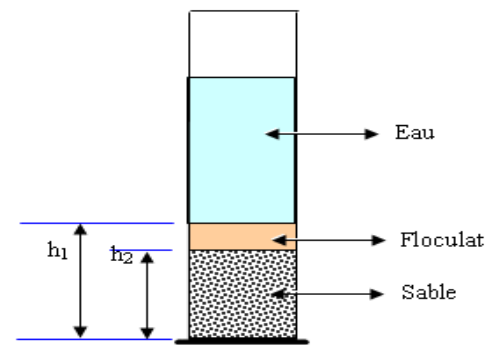


Figure II.6. Dispositifs utilisé pour la mesure de l'équivalent de sable

Où

h_1 : Hauteur du niveau supérieur du flocculat par rapport au fond de l'éprouvette.

h_2 : Hauteur du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette ;

II.4.6 Compacité (C)

La compacité est le rapport de la masse volumique apparente sur la masse volumique absolue comme montré par la relation II.8.

$$C = \frac{\gamma_{app}}{\gamma_{ab}} \quad (\text{II. 8})$$

Où

γ_{app} : Masse volumique apparente ;

γ_{ab} : Masse volumique absolue.

II.4.7 Porosité (P)

La pénétration de l'eau dans les pores du matériau conduit à former un béton (ou un mortier) moins durable surtout dans des milieux agressifs. Donc il est indispensable de connaître la porosité des constituants entrant dans la composition des bétons (ou des mortiers). La porosité du sable est déterminée par la relation II-9.

$$P(\%) = (1 - C) \times 100 \quad (\text{II.9})$$

Où :

P : Porosité ;

C : Compacité

Tableau II.4: Propriétés physiques du sable étudié.

Propriétés physiques	
Masse volumique absolue en (k/m ³)	2643
Masse volumique apparente en (kg/m ³)	1509,72
Compacité (%)	57,12
Porosité (%)	42,88
Module de finesse (%)	1 ,47
Equivalent de sable visuel (%)	89,70
Equivalent de sable au piston (%)	87,65

Les résultats de l'étude des sables utilisés permettent de tirer les conclusions suivantes:

- Les valeurs obtenues pour l'équivalent de sable montrent que les sables utilisés calcaire (S_C) et dunaire (S_D) sont des sables très propres, signe d'un manque presque total de fines argileuses.
- Elles montrent également que ces sables conviennent parfaitement pour la confection des mortiers de haute qualité.

-
- Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse M_F .
 - Plus le module de finesse est faible ($M_F = 1.47$) et inférieur à 1.80 %, plus le sable est riche en éléments fins. Par ailleurs, les sables utilisés, donc, ne comportent qu'une faible proportion d'éléments fins.
 - le sable ($S_D + S_C$) est un sable moins dense et moins compact, ce qui influe négativement sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers.

II.5 Eau de gâchage

La qualité d'eau de gâchage joue un rôle primordial sur la qualité finale du mortier. Les impuretés contenues dans l'eau peuvent influencer la prise de ciment ou la résistance du mortier. Elles peuvent également causer l'apparition des taches à la surface du béton ou même favoriser la corrosion des armatures.

L'eau utilisée dans cette partie expérimentale est l'eau du robinet de laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat. Le tableau II.5 donne la composition chimique de l'eau de gâchage utilisé.

Tableau II.5 : Composition chimique de l'eau de gâchage.

		Robinet	
Ca ⁺² en mg/l	119.04	Balance Cation m. éq/l 15.10	5.94
Mg ⁺² en mg/l	32.93		2.71
Na ⁺ en mg/l	144.90		6.30
K ⁺ en mg/l	5.69		0.14
Cl ⁻ en mg/l	169.96	Balance Anion m. éq/l 16.24	4.79
SO ₄ ⁻² en mg/l	420		8.75
HCO ₃ ⁻ en	153.80		2.52
NO ₃ ⁻ en mg/l	11.07		0.18
Résidu sec à 110°C 1172mg/l	PH 7.77	Conductivité en 1/10mmà 25°C 16.30	Dureté totale 43.25
Test chlore(ml d'eau de javel à 15° /m ³) 0.30 ml/l		T.A.C 12.60	S.A.F 67.70
MINERALISATION 1010.60	M.O milieu Acide en O ₂ 8.53	SiO ₂ 4.45	Somme des ions 1057.40
Cations	Ca ⁺² = 39.34%	Mg ⁺² =18%	Na ⁺ +K ⁺ =43.01%
Anions	HCO ₃ ⁻ =15.5%	SO ₄ ⁻² =53.8%	Cl ⁻ +NO ₃ ⁻ =30.6%

- L'analyse chimique de cette eau, effectuée au laboratoire de l'EPDEMIÀ de Laghouat, révèle qu'elle est dépourvue des excès de sels, de sulfures et d'acides.

II.6 Ajouts minéraux

II.6.1 Pouzzolane naturelle

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle de provenance du gisement de Bouhamidi (Beni-Saf), extraite et fournie en quantité suffisante pour la confection de tous les mortiers. Cette pouzzolane est sous forme de roches concassées de type pierre ponce et scorie de diamètres variant de 5 à 10mm.

Nous avons d'abord procédé à son étuvage à 105°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage. Elle a ensuite été complètement broyée 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 proportions.

Les analyses des compositions chimiques et minéralogiques moyennes de la pouzzolane naturelle issue du gisement de Bouhamidi, sont effectuées au laboratoire de la cimenterie de Zahana [Kaid et al., 2009].



Figure II.7. Pouzzolane naturelle (broyée)

Tableau II.6: Propriétés physiques de la pouzzolane de Béni-Saf [Kaid et al., 2009].

<i>Masse volumique absolue (kg/m³)</i>	<i>Surface spécifique Blaine (m²/kg)</i>
2670	450

Tableau II.7: Analyse chimique de la pouzzolane de Béni-Saf [Kaid et al., 2009].

<i>Composants</i>	<i>SiO₂</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>Perte au feu</i>
%	56.3	9.8	1.8	17.0	8.6	6.5

La morphologie de la pouzzolane, observée au microscope électronique à balayage (MEB) de type ESEMXL30 est illustrée sur la figure II.8.

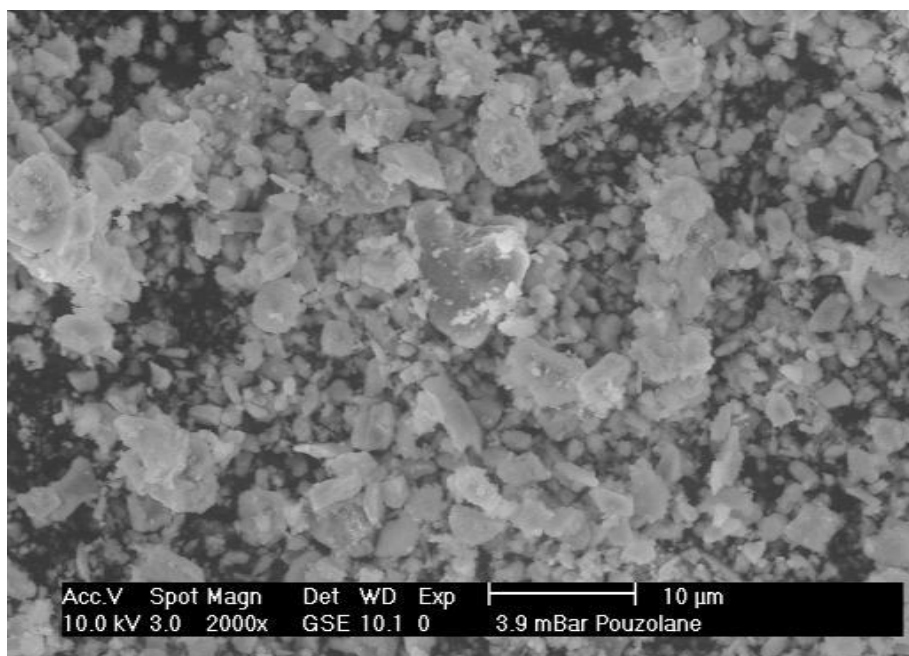


Figure II.8. Morphologie de la pouzzolane [Mansour et al., 2010]

La figure II.8 montre la morphologie des matériaux utilisés et révèle que la pouzzolane possède une texture compacte avec des particules de forme irrégulière et plus fines. En effet, le diamètre moyen des particules de la pouzzolane est $d_{50} = 9.5 \mu\text{m}$. La pouzzolane joue le rôle de l'effet de micro filler dans le ciment. Ceci améliore la fluidité des pâtes cimentaires lors de leur écoulement.

II.6.2 Fillers calcaires

Les fines calcaires utilisées proviennent d'une carrière située à Laghouat. Elles sont de couleur blanchâtre. Elles sont ajoutées au mélange à des pourcentages choisis. Elles sont tamisées à un diamètre ($\Phi = 0.08 \text{ mm}$).

Les caractéristiques physiques obtenues sont récapitulées sur le tableau II.8.

II.6.2.1 Analyse Minéralogique

L'analyse des différents pics du diffractogramme aux Rayons-X a permis de déceler la nature des différents éléments composant le calcaire. La méthode consiste à balayer la surface de l'élément selon un angle θ et avec une source émettrice de rayon x et de longueurs d'onde λ .

Les conditions de diffraction par une famille des plans réticulaires parallèles sont données par la loi de Bragg. La figure II.9 montre que le calcaire utilisé est de type calcite (CaCO_3) en majeure partie.

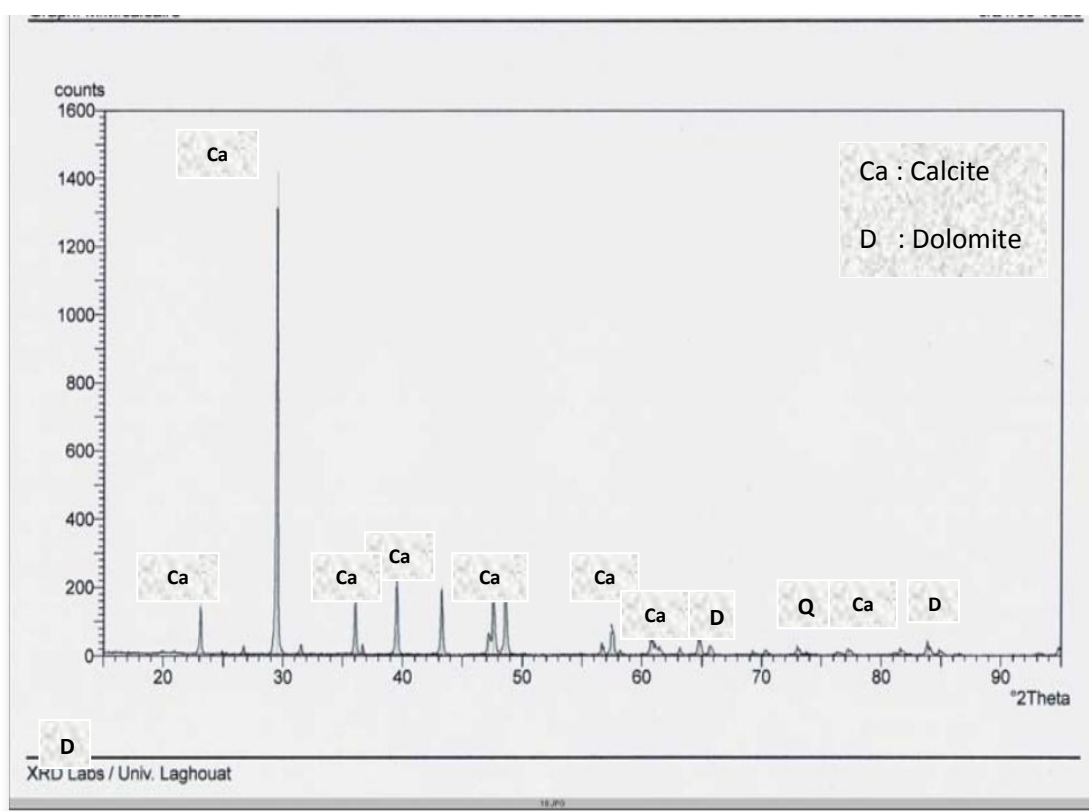


Figure II.9. Diffractogramme du calcaire

II.6.2.2 Résultats Obtenus

Le tableau (II. 8) regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur le calcaire utilisé.

Tableau II.8: Propriétés physiques du calcaire.

Propriétés physiques	Résultats
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.73
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.3
Surface spécifique (cm ² /g)	2738
Module de finesse (%)	2.26

Les résultats de l'étude des sables utilisés permettent de tirer les conclusions suivantes:

- Les valeurs obtenues pour l'équivalent de sable montrent que les sables utilisés (SD+SC) sont des sables très propres, signe d'un manque presque total de fines argileuses.
- Elles montrent également que ces sables conviennent parfaitement pour la confection des mortiers de haute qualité.
- Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse MF. - Plus le module de finesse est faible ($M_f = 1.47\%$) est inférieur à 1.80%, plus le sable est riche en éléments fins.
- le sable (S_D+S_C) est un sable moins dense et moins compact ce qui influe négativement sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers.

II.7 Etude du mortier

II.7.1 Formulation

Après la caractérisation des différents composants de base, on va essayer de caractériser les mortiers étudiés à l'état frais.

Les compositions de base utilisées pour l'étude de la formulation des mortiers sont : Le sable (60% sable calcaire + 40% sable de dune), le ciment, la pouzzolane naturelle et les fillers calcaires. On mélange ces ingrédients en premier temps à sec puis on ajoute de l'eau. On veille toujours à effectuer un bon malaxage durant une durée de 30 secondes puis on accélère le malaxage pendant 90 secondes, dans le but d'obtenir un mortier bien malaxé. La composition prise en compte est celle donnée par la norme NFP15-403 :

450g de liant, les ajouts étant toujours introduits en substitution du ciment.

1350g de sable.

Ceci correspond donc à un rapport sable/ciment égal à 3.

Les principaux paramètres étudiés sont :

- La maniabilité ;
- Les résistances mécaniques ;
- Le retrait ;
- L'absorption d'eau par capillarité ;
- Les propriétés thermiques ;
- La durabilité (immersion totale dans les milieux agressifs).

Pour la caractérisation des mortiers, nous avons utilisé 70% CPA + 30% Ajouts minéraux (pouzzolane et filler calcaire) et un rapport sable/liant (S/L) =3.

Dans ces différents types de mortiers, la pouzzolane et le filler calcaire ont été incorporés à différents dosages comme indiqué dans le tableau II-9.

Tableau II.9 : Différents types de mortiers étudiés.

Mortiers Différent % PN et FC	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
CPA	100	70	70	70	70	70	70
PN	0	30	24	18	12	6	0
FC	0	0	6	12	18	24	30

II.7.2 Malaxage et mode de conservation

Le malaxage a été effectué par un malaxeur de mortier (Figure II-10) en versant, l'un après l'autre, les composants (sable, ciment, ajouts) et enfin l'eau de gâchage.



Figure II.10. Malaxeur normalisé pour pâte et mortier

Les éprouvettes utilisées sont de dimensions 40x40x160mm³. Elles sont démoulées après 24 h du moment de coulage, ensuite conservées à l'air libre à la température ambiante du laboratoire (Température 20°±3, humidité relative HR 50%).

II.7.3 Maniabilité et confection d'éprouvettes

Tous les mortiers mis en œuvre ont été confectionnés avec un rapport (S/L=3) constant et un rapport eau/liant (E/L) égale 0.57. La mesure du temps d'écoulement est effectuée à l'aide d'un maniabilimètre LCL (Figure II-11). Le maniabilimètre LCL est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule, après avoir enlevé la paroi mobile.



Figure II.11. Maniabilimètre LCL «B» utilisé pour la mesure de la maniabilité

Les résultats des essais obtenus sont regroupés dans le tableau II-10.

Tableau II.10: Résultats des essais de maniabilité des différents mortiers.

Mortiers	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
E/L	0.57	0.57	0.60	0.60	0.57	0.57	0.57
Temps (s)	11.00	11.4	10.10	11.10	11.90	11.70	10.70

Le temps mesuré nous permet d'obtenir des mortiers plastiques selon la norme NFP 18-452.

Réalisées les éprouvettes prismatiques 40x40x160 mm³ (Figure II-12).



Figure II.12. *Éprouvettes prismatiques (40x40x160) mm³*

II.7.4 Etude du retrait

Le retrait est dû à la perte de l'eau engendrant une diminution de volume au cours du temps. Il dépend des conditions de conservation (humidité, température) et des constituants du mortier.

On mesure la valeur du retrait avec un rétractomètre muni d'un comparateur digital (Figure II-13). Les mesures de retrait ont été effectuées sur des éprouvettes 40x40x160 mm³. Les mesures ont été prises du 1^{er} jour jusqu'au 360^{ème} jour suivant la formule II.10.



Figure II.13. *Rétractomètre muni d'un comparateur de mesure de la variation de longueur*

La température du laboratoire dans la période est d'environ $20 \pm 5^\circ\text{C}$, et humidité relative $49 \pm 5\%$)

$$\varepsilon \left(\frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right) = \frac{\Delta l}{L} = \frac{(l_i - l_f) * 1000}{0,160} \quad (\text{II.10})$$

Où :

l_i (mm): Lecture initiale (1er jour) ;

l_f (mm): Lecture (jour de mesure) ;

L : Longueur initiale de l'éprouvette.

II.7.5 Résistances mécaniques

L'évolution de la résistance mécanique a été suivie au cours du temps, en faisant des essais de flexion et de compression à différents âges : 3, 7, 14, 28, 90, 180 et 360 jours pour les différents types de mortiers.

II.7.4 .1 Essais de flexion

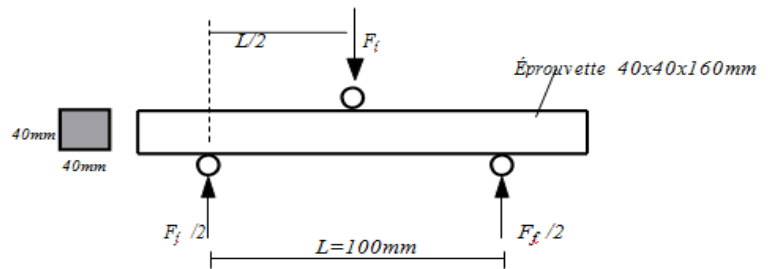
La rupture est effectuée sous charge concentrée à l'aide d'une machine conforme à la norme NF P 18-433 et munie d'un dispositif de flexion à 3 rouleaux (Figure II-14).



Figure II.14. Appareil de flexion à 3 rouleaux

La relation qui calcule la résistance à la flexion est déterminée par l'équation II.11.

$$R_f(\text{MPa}) = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_f \cdot L}{d^3} \cdot 1000 \quad (\text{II.11})$$



Avec :

F : Force de rupture (kN) ;

L : Distance entre les deux rouleaux inférieurs (L =100 mm) ;

d : Coté de l'éprouvette (d=40mm).

II.7.4 .2 Essais de compression

Les demi-éprouvettes obtenues dans l'essai de flexion sont soumises à un essai de compression au moyen d'une presse mécanique selon la norme NF P 18-406 (Figures II-15 et 16).

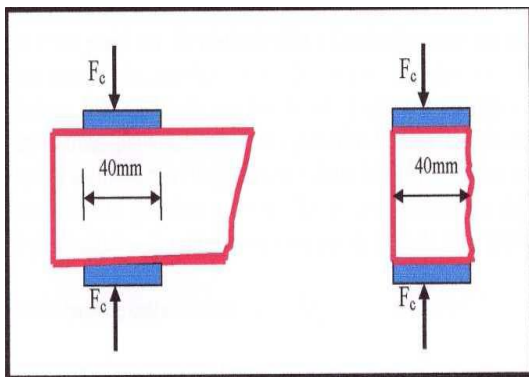


Figure II.15. Essai de compression



Figure II.16. Appareil de compression

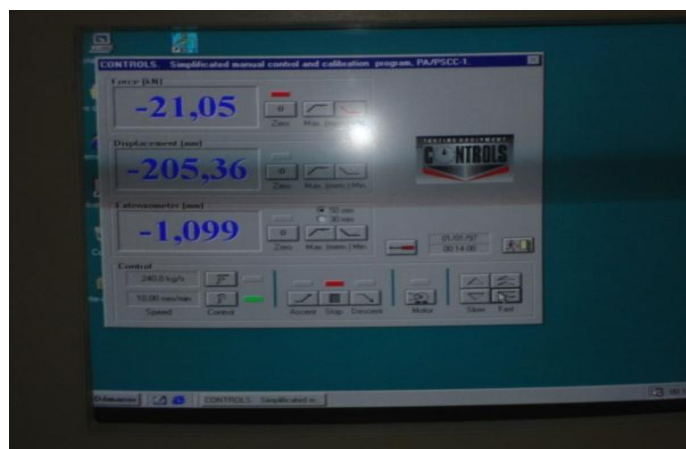


Figure II.17. Lecture des résultats de l'essai de flexion et de compression sur la presse

La résistance à la compression est exprimée par la relation II.12 :

$$R_c(\text{MPa}) = \frac{N}{S} \cdot 1000 \quad (\text{II.12})$$

N: Force de rupture (kN) ;

S: Surface de chargement ($S = 40 \times 40 = 1600 \text{mm}^2$).

Les demi-prismes obtenus après rupture en flexion de l'éprouvette ont été soumis à la compression au moyen d'une presse d'écrasement (Figures II.16 et II.17).

II.7.5. Mesure de poids

Les éprouvettes sont immergées dans des solutions chimiquement agressives. Leurs poids initiaux sont ceux mesurés après 28 jours de conservation dans l'eau, les éprouvettes sont pesées périodiquement (Figure II-18) après les avoir séchées à l'étuve à une température de 105°C , puis on les remet de nouveau dans les solutions des agressions chimiques.



Figure II.18. Appareil pour la mesure du poids

La variation de poids est donnée par la formule suivante :

$$\Delta m = m_0 - m_1 \quad (\text{II.13})$$

Où m_0 est le poids de l'éprouvette avant immersion dans les solutions.

II.7.6 Mesure de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud :

II.7.6.1 Principe de la méthode

Le dispositif utilisé pour la caractérisation thermique est montré dans les Figures II-19 et II-20. Un flux de chaleur constant ($\phi=0$ si $t < t_0$; $\phi = \phi_0$ si $t > t_0$) est appliqué au fil chauffant. Un thermocouple nous permet de relever l'évolution au cours du temps de la température $T_0(t)$ de ce fil. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces, c'est-à-dire lorsque l'hypothèse du milieu infini est valide, on peut supposer que le transfert dans l'échantillon autour du fil est radial (Figures II.21, II.22 et II.23). La modélisation de ce transfert de chaleur permet de calculer l'évolution de la température au centre de l'échantillon.

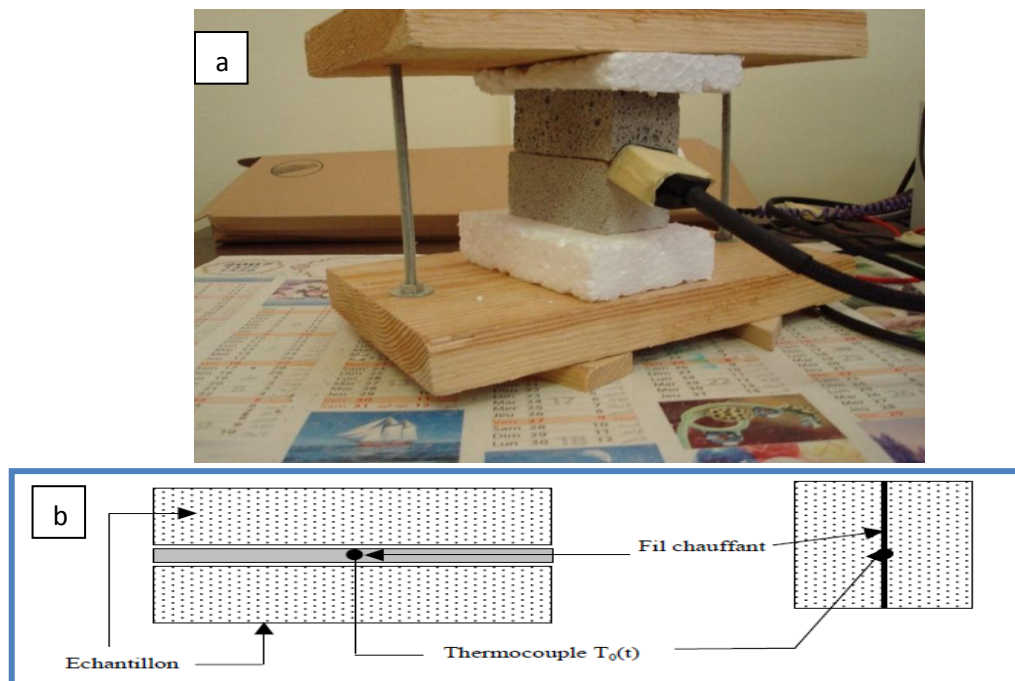


Figure II.19. (a)Aspect de l'échantillon lors de l'essai thermique, (b) Schéma du montage de la méthode du fil *chaud*.

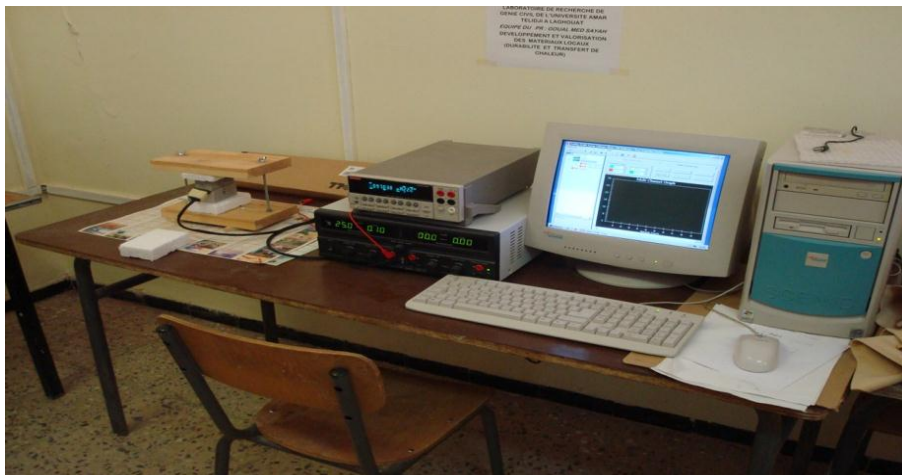


Figure II.20. Ensemble du matériel thermique utilisé

Une méthode d'estimation judicieusement choisie de façon à minimiser l'écart entre les courbes théoriques et expérimentales nous permet d'évaluer la conductivité thermique λ , la capacité thermique (mc)s de l'ensemble sonde + résistance chauffante et la résistance de contact R_c à l'interface sonde/échantillon.

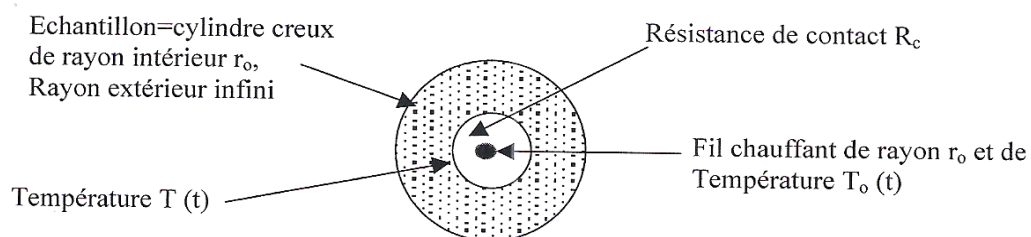


Figure II.21. Schéma des transferts de chaleur autour du fil chaud

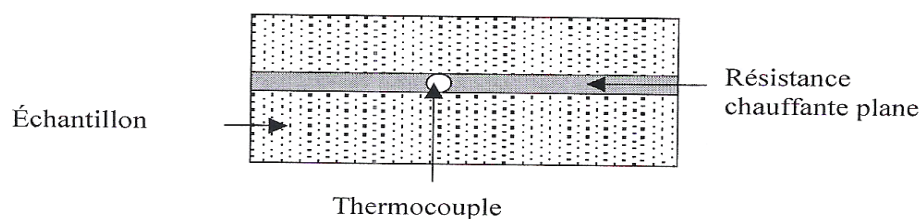


Figure II.22. Schéma du montage de la méthode du fil chaud

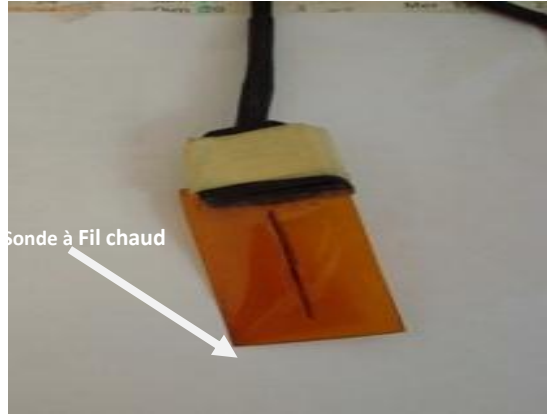


Figure II.23. Aspect général de la sonde utilisée

II.7.6.2 Modélisation du fil chaud

La modalisation du système à l'aide du formalisme des quadripôles permet d'écrire :

$$\begin{bmatrix} \theta_0 \\ \frac{\varphi_0}{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2\pi\lambda L q_0} \frac{I_0(qr_0)}{I_1(qr_0)} - \frac{1}{\rho c \pi r_0^2 L p} \\ \rho c \pi r_0^2 L p & \frac{q r_0}{2} \frac{I_0(qr_0)}{I_1(qr_0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ 2\pi\lambda L q r_0 \frac{K_1(qr_0)}{K_0(qr_0)} \theta \end{bmatrix} \text{ avec } q = \sqrt{\frac{p}{a}} \quad (\text{II-14})$$

Où :

θ_0 : Transformée de Laplace de la différence $T_s(t) - T_s(t=0)$;

θ : Transformée de Laplace de la différence $T(t) - T(t=0)$;

R_c : Résistance de contact à l'interface résistance chauffante/échantillon ;

c : Capacité calorifique du thermocouple+résistance ;

λ : Conductivité thermique de l'échantillon ;

a : Diffusivité thermique de l'échantillon ;

p : Variable de Laplace ;

r_0 : Rayon du fil chauffant ;

L : Longueur du fil chauffant ;

Φ_0 : Puissance dissipée dans la résistance chauffante ;

I_0, I_1, K_0, K_1 fonctions de Bessel.

On en déduit θ_0 :

$$\theta_0 = \frac{\varphi_0}{p} \frac{A_0 + (A_0 R_c + B_0)/Z}{C_0 + (C_0 R_c + D_0)/Z}$$

$$\begin{aligned} A_0 &= 1 ; & B_0 &= \frac{1}{2\pi\lambda L q r_0} \frac{I_0(q r_0)}{I_1(q r_0)} - \frac{1}{\rho \pi r_0^2 p L} ; \\ C_0 &= \rho \pi c r_0^2 p L & D_0 &= \frac{q r_0}{2} \frac{I_0(q r_0)}{I_1(q r_0)} ; & \frac{1}{Z} &= 2\pi\lambda q L r_0 \frac{K_1(q r_0)}{K_0(q r_0)} \end{aligned}$$

Les paramètres inconnus à déterminer sont la conductivité thermique λ de l'échantillon, la résistance de contact R_c entre la sonde et l'échantillon et la capacité thermique (mc) de la sonde.

II.7.6.3 Estimation simplifiée aux temps longs

En considérant r_0 petit (fil fin) et aux temps très longs $p \rightarrow 0$ on a les développements limités au voisinage de 0 suivants :

$$\begin{aligned} K_0(x) &\cong -\ln(x) , & K_1(x) &\cong \frac{1}{x} , \\ I_0(x) &\cong 1 , & I_1(x) &\cong \frac{x}{2} \end{aligned}$$

Ce qui conduit à :

$$A_0 = 1 ; \quad B_0 = 0 ; \quad C_0 = \rho c \pi r_0^2 L p ; \quad D_0 = 1 ; \quad \frac{1}{Z} = -\frac{2\pi\lambda L}{\ln(q r_0)}$$

On en déduit :

$$\theta_0 = \frac{\varphi_0}{p} \frac{Z + R_c}{mc p (R_c + Z) + 1} \approx \frac{\varphi_0}{p} (Z + R_c) \approx \frac{\varphi_0}{p} \left[-\frac{\ln\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a}}\right)}{2\pi} + R_c \right] \approx \frac{\varphi_0}{p} \left[\frac{-\ln(p)}{4kL} - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a}}\right)}{4kL} + R_c \right] \quad (\text{II-15})$$

L'utilisation des tables de la transformée inverse, permet de calculer la température $T_0(t)$ aux temps longs :

$$T_0(t) - T_0(0) \approx \frac{\varphi_0}{2\pi\lambda L} \ln(t) + R_c \varphi_0 - \frac{\gamma \varphi_0}{2\pi\lambda L} - \frac{\varphi_0 \ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a}}\right)}{2\pi\lambda L} \quad (\text{II-16})$$

avec $\gamma = 0.57721$ la constante d'Euler.

On obtient finalement :

$$T_0(t) - T_0(0) \approx \frac{\varphi_0}{2\pi\lambda L} \ln(t) + \varphi_0 \left(R_c - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a}}\right)}{2\pi\lambda L} + \frac{\gamma}{2\pi\lambda L} \right) \quad (\text{II-17})$$

Le tracé de $T_0(t) - T_0(t=0)$ en fonction de $\ln(t)$ est une droite de pente $\frac{\varphi_0}{2\pi\lambda L}$ ce qui nous permet de déduire la conductivité thermique λ ($\text{W.m}^{-1}.\text{C}^{-1}$).

II.7.7 Essais de durabilité

II.7.7.1 Absorption capillaire

L'essai est effectué sur des éprouvettes $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ selon la NF P 18-310-5, Séchées au préalable à l'étuve pour l'élimination totale de l'eau contenue dans le matériau, les faces latérales des éprouvettes ont été plastifiées ce qui force l'eau à adopter un cheminement uniaxial et éviter l'évaporation par ces mêmes faces (Figure II.24).



Figure II.24. Technique expérimentale utilisée dans l'essai d'absorption capillaire

On pose les éprouvettes ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) de mortier sur leurs bases $40 \times 40 \text{ mm}^2$, en les séparant d'au moins de 10 mm et en les maintenant dans l'eau à une profondeur constante de 5 mm pendant la durée de l'essai. Cet essai dure 1 heure 30 minutes. Les mesures sont effectuées toutes les 5 minutes. Les éprouvettes sont pesées à des intervalles de temps réguliers. Le coefficient d'absorption capillaire est donné par la relation suivante :

$$A_c = \frac{M_w}{S\sqrt{t}} \quad (\text{II-18})$$

Ou :

A_c : Coefficient d'absorption capillaire ($\text{g.cm}^{-2} \text{ min}^{-0.5}$) ;

M_w : Masse d'eau absorbée (g) ;

S : Surface de la base $(4 * 4) \text{ cm}^2$;

t : Temps de mesure (min).

▪ Technique de saturation totale (Porosité accessible à l'eau)

L'échantillon est placé dans une enceinte fermée dans laquelle on établit le vide. L'échantillon est mis en dépression à l'air pendant une certaine durée (24 heure) environ dans le but de le saturer sous vide. On introduit alors de l'eau déminéralisée dans l'enceinte jusqu'à remplissage. Après une certaine durée de 72 heure environ, la perméabilité de mortier permet de supposer que l'échantillon est saturé le plus complètement possible. L'échantillon « saturé » est alors pesé (Figures II-25 et II.26).

On obtient alors la masse de l'échantillon saturé (m_{sat} (g)). En fait, la porosité est la somme de la porosité connectée ou ouverte (ensemble des pores reliés à l'extérieur) et de la porosité fermée ou vacuolaire (celle qui n'est pas connectée avec l'extérieur). Seule la première est accessible aux fluides par occurrence l'eau. Par la technique de saturation totale de l'échantillon, on mesure donc la porosité ouverte accessible à l'eau. Le volume des pores accessibles à l'eau (V_e) sous vide est égal au volume d'eau qui a pénétré dans l'échantillon (V_{eau}), autrement dit $V_e = V_{\text{eau}}$. Si on note (V_v) le volume des vides et si on suppose que la porosité fermée est négligeable ou très faible, alors $V_v = V_e$.



Figure II.25. Echantillons utilisés pour l'essai d'accessibilité à l'eau



Figure II.26. Dispositif de l'essai d'accessibilité à l'eau

Par conséquent, $V_v = V_e = V_{eau} = \frac{m_{eau}}{\rho_{eau}} = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{\rho_{eau}}$ avec ρ_{eau} représente la masse volumique de l'eau, estimée à $\rho_{eau} = 1\text{g/cm}^3$. La porosité s'obtient ainsi par simple pesée de l'échantillon sèche et de l'échantillon saturée.

II.7.7.2 Milieux de conservation

Afin d'étudier le comportement des mortiers vis-à-vis des agressions chimiques, différents milieux de conservation ont été envisagés. Ces milieux sont :

Solution à la chaux (Figure II.27) :

Ce milieu est considéré comme un milieu de référence (non agressif), parce qu'il est riche en calcium par dissolution de la chaux dans l'eau.



Figure II.27. Conservation dans la solution de la chaux

Les réactions d'hydratation doivent avoir lieu d'une manière normale, loin de toute lixiviation qui peut être due aux milieux acides et agressifs. Pour ce milieu, on a choisi une concentration massique de 5 %.

- Solution de l'acide chlorhydrique (HCl) (Figure II.28) :

Selon la littérature, ce milieu est également agressif, [Mouli et al., 2000]. Sa concentration massique est prise égale à 5% afin d'accélérer l'attaque par cette acide.



Figure II.28. Conservation dans la solution de l'acide chlorhydrique HCl 5%

Il consiste à immerger les éprouvettes de mortier ($4 * 4 * 16 \text{ cm}^3$) dans les solutions HCl en renouvelant chaque mois la solution du milieu pour assurer un PH constant.

Suivi permet de déterminer la perte ou le gain en masse.

Chlorure de sodium NaCl (Figure II.29)

Le chlorure de sodium est dissous dans l'eau à une concentration de 5%.



Figure II.29. Conservation dans la solution de chlorure de sodium NaCl

Pour bien suivre l'évolution des éprouvettes de nos mortiers au cours du temps, chaque éprouvette a fait l'objet d'un suivi régulier.

Il s'agit de la mesure la plus simple à réaliser. Ce suivi permet de déterminer la perte ou le gain en masse. Cette variation relative de masse est exprimée par la relation suivante :

$$\frac{\Delta m(\%)}{m} = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \quad (\text{II.19})$$

II.8 Conclusion

- Les essais physiques et thermiques, ainsi que les analyses chimiques et minéralogiques effectués dans les différents laboratoires donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers qui seront étudiés au prochain chapitre du point de vue mécanique et durabilité.
- La connaissance de ces caractéristiques aide, d'une façon significative, à commenter les résultats des essais expérimentaux des mortiers étudiés.
- Il était également important et nécessaire de présenter les différentes techniques expérimentales employées afin de caractériser, d'une part les matériaux de base et d'autre part le composite étudié.

CHAPITRE III : Résultats expérimentaux et analyses

III.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les mortiers à base de sable dunaire et calcaire confectionnés selon les différentes combinaisons d'ajouts de Pouzzolane Naturelle(PN) – Filler Calcaire(FC) , suivi par des discussions et interprétations basé sur la littérature.

III.2 Compositions et paramètres étudiés de l'effet des additions minérales

L'ajout des additions minérales est réalisé par substitution massique du ciment, tout en gardant la quantité du sable fixe. Le rapport sable/liant égale à 3/1 et E/L égale à 0,57. Le mortier sans ajout (100% CPA) est le mortier témoin M0. Pour les six mortiers M1, M2, M3, M4, M5 et M6, on a varié les pourcentages de la pouzzolane naturelle et les fillers calcaires : Le tableau III.1 montre les compositions utilisées et les taux de substitution du ciment par les additions minérales.

Tableau III.1: Différentes combinaisons des mortiers en % (CPA+PN+FC).

Mortiers	Ciment CPA(%)	Pouzzolane(%)	filler calcaire(%)
M0	100	00	00
M1	70	30	00
M2	70	24	6
M3	70	18	12
M4	70	12	18
M5	70	6	24
M6	70	00	30

Les différents paramètres étudiés sont :

- ✓ Les propriétés physiques ;
- ✓ les résistances mécaniques (R_c , R_f) ;
- ✓ le retrait ;
- ✓ l'absorption d'eau par capillarité ;
- ✓ la conductivité thermique.

Les essais ont été réalisés sur des mortiers qui ont été confectionnés à partir de différentes formulations données dans le tableau III.2

Tableau III.2 : Compositions des mortiers étudiés (pour $E/L=0,57$).

Mortiers	Sable (g)	Ciment (g)	Pouzzolane (g)	Filler calcaires (g)	Eau (g)
M0	1350	450	0	0	256.5
M1	1350	315	135	0	256,5
M2	1350	315	108	27	256,5
M3	1350	315	81	54	256,5
M4	1350	315	54	81	256,5
M5	1350	315	27	108	256,5
M6	1350	315	0	135	256,5

III.2.1 Effet des différents pourcentages de PN et FC sur la maniabilité

Les résultats de la variation du temps d'écoulement en fonction des différents pourcentages d'ajouts sont regroupés dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Variation du temps d'écoulement en fonction du pourcentage en PN et FC.

Mortiers	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
E/L	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
Temps (s)	11.00	13	12	12	11	11	10

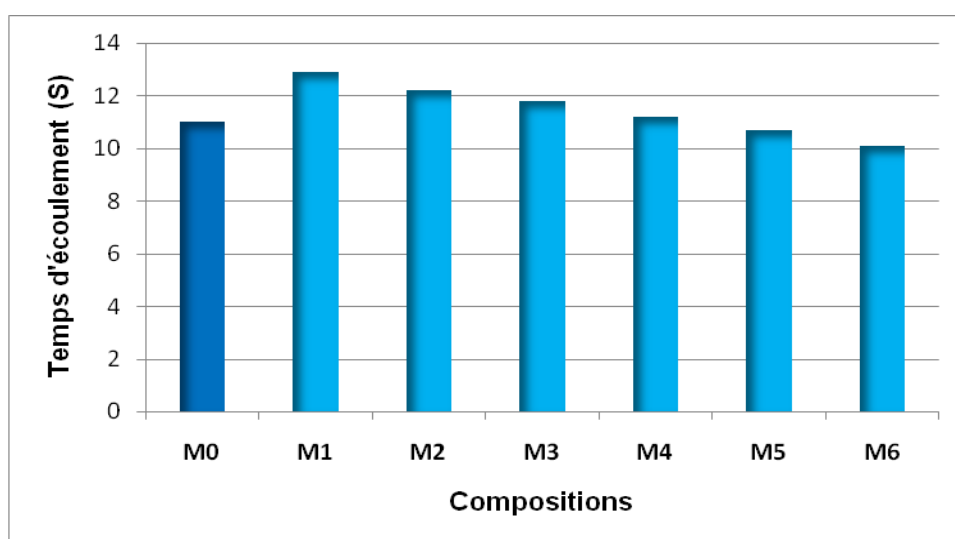


Figure III.1. Variation du temps d'écoulement en fonction de la composition des mortiers

La figure III.1 présente la maniabilité des mortiers contenant les additions minérales et le mortier témoin.

Les résultats de la variation du temps d'écoulement en fonction des différents pourcentages de pouzzolane et filler calcaire montrent que le temps d'écoulement varie de 10 s à 13 s et que les différents mortiers présentent une faible variation du temps d'écoulement (quel que soit le type et la teneur d'ajout) par rapport au mortier témoin dont le temps d'écoulement est 11s.

On remarque que les mortiers contenant des taux élevés en pouzzolane naturelle présentent une consistance avec des teneurs élevées en pouzzolane.

III.3 Etude des mortiers conservés à l'aire libre

III.3.1 Variation de masse

D'après les courbes de la figure III-2 qui présente l'évolution de la variation de masse en fonction du temps, soit un gain ou une perte de masse en fonction du temps, nous remarquons:

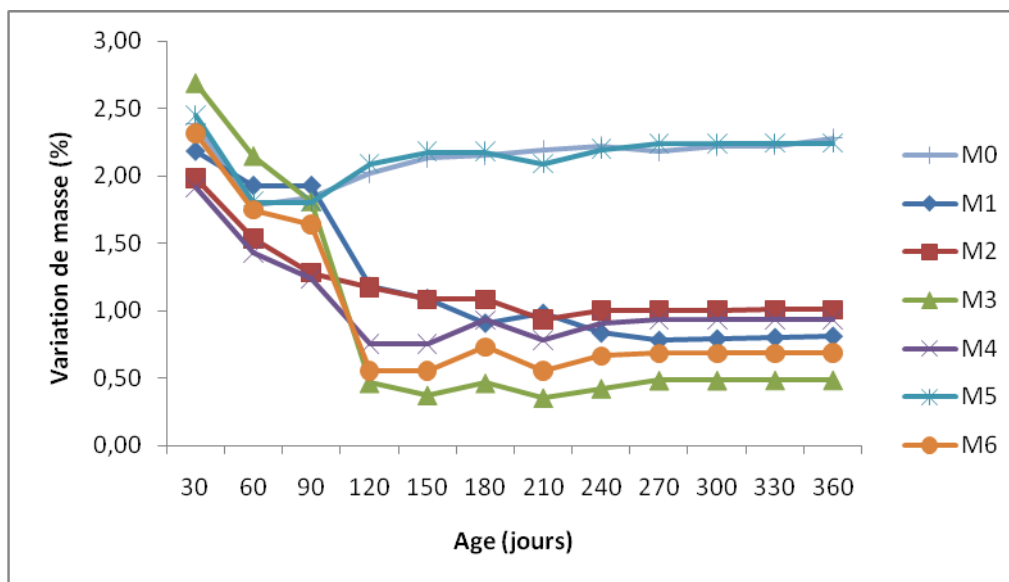


Figure III.2. Variation de la masse des éprouvettes en fonction du temps

- ✓ Une perte de masse très importante pour le mortier M3 par rapport au mortier de référence M0 .
- ✓ La même perte de masse est enregistrée pour les mortiers M0 et M5 .
- ✓ Un perte de masse important pour tous les mortiers M1 ,M2, M4, et M6 on enregistre une grande perte allant jusqu'à 120 jours ; après 120 jours, nous constatons une diminution de la perte jusqu'à 360 jours .

Dans les ciment avec ajouts, la quantité de silicate de calcium hydraté (CSH) étant de manière significative moins importante que dans le ciment sans ajout, cela est du à la réaction pouzzolanique qui fixe la chaux .

III.3.2 Résistance mécanique

III.3.2.1 Résistances à la traction par flexion

Les résultats des résistances à la traction par flexion obtenus sont présentés dans le tableau III.4

Tableau III.4 : Variation des résistances à la traction par flexion ($R_{f\text{ moy}}$) en fonction de l'âge (MPa).

Résistances à la traction par flexion (MPa)							
Âge (jours) Mortier	3	7	14	28	90	180	360
M0	2,20	3,15	3,85	4,50	4,57	4,62	4,71
M1	4,45	5,64	6,02	6,27	6,36	6,75	7,33
M2	4,20	5,05	5,23	7,09	7,12	7,2	7,26
M3	4,62	5,8	6,35	7,17	7,23	7,27	7,32
M4	4,61	5,07	5,77	6,82	6,91	6,98	7,05
M5	4,28	5,53	5,71	6,02	6,1	6,18	6,23
M6	3,49	4,45	5,1	5,54	5,62	5,7	5,76

$R_{f\text{ moy}}$: moyenne de 03 essais.

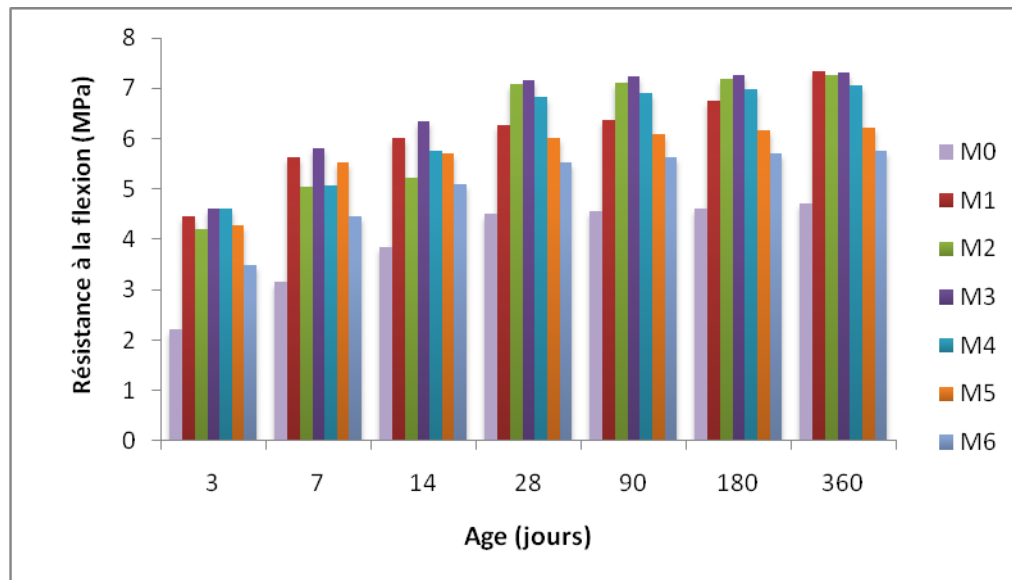


Figure III.3. Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour les différents mortiers

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la traction par flexion évolue positivement en fonction de l'âge et tend à se stabiliser au environ de sa valeur maximale à l'âge de 360 jours (figure III.3).

La figure III.3 montre l'effet des additions minérales susmentionnées sur les résistances à la flexion. Les valeurs des résistances à la traction par flexion des mortiers confectionnés en remplacement partiel du ciment par les additions sont fonction croissante du temps à différentes échéances, quelque soient la nature et le taux des additions.

On remarque également que le mortier M₀ présente les valeurs les plus faibles des résistances à la flexion par rapport aux autres types de mortier, quelque soit le type et le taux des ajouts. Le mortier M₀ présente la plus faible résistance à long terme, par contre les mortiers M₃ présentent les meilleures résistances (Figure III.3). Le mortier M₃ présente la valeur maximale de résistance à court terme la valeur 4,62 MPa mais à long terme les valeurs maximale de résistance des mortiers M₁ et M₃ et 7,33 et 7,32 MPa respectivement.

En effet, les résistances des mortiers M₂ et M₅ sont presque similaires à long terme .

L'écart entre les résistances des mortiers tend à augmenter à long terme. D'une manière générale, les résistances à la traction par flexion sont assez proches et il convient de noter que la combinaison M₁et M₃ donne les meilleures résistances à long terme.

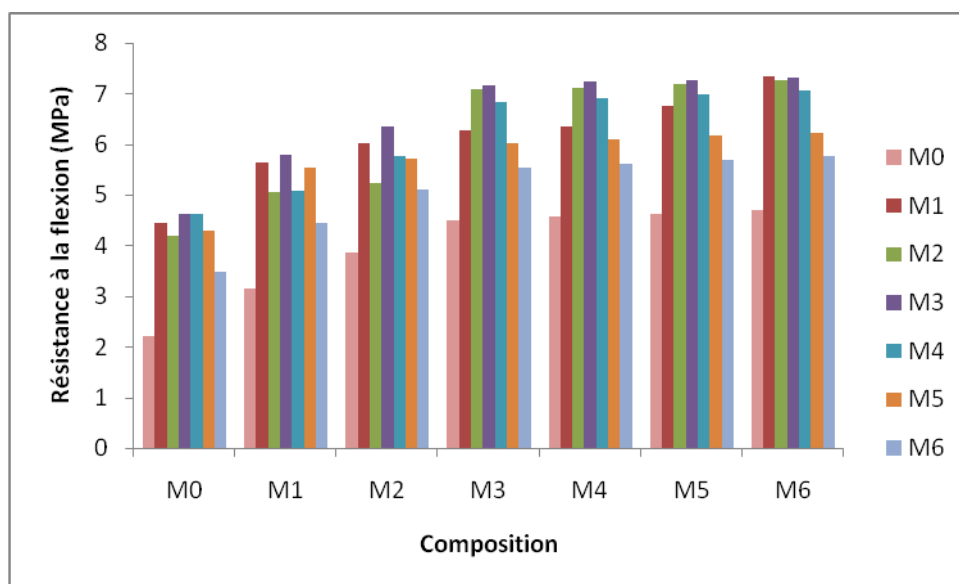


Figure III.4. Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de substitution des additions

Ont étudié l'influence des différentes combinaisons « PN/FC » sur les résistances à la flexion, ils ont montré qu'à 3 jours, l'incorporation du calcaire réduit la résistance à la flexion des mortiers contenant la pouzzolane naturelle [Ghrici et al., 2007].

A 7 et 28 jours, la combinaison 80% CPA, 10% PN et 10% FC semble donner une résistance comparable à celle du mortier de contrôle. A 90 jours, la combinaison 70% CPA, 20% PN et 10%FC donne une résistance à la flexion très comparable à celle du mortier de contrôle.

L'étude de l'influence de l'incorporation de la pouzzolane sur la résistance à la flexion des mortiers à l'âge de 2 et 7 jours permet de constater, aussi, comme dans le cas de la résistance à la compression (voir ci-après), une augmentation régulière des résistances à la flexion de tous les mortiers avec l'âge de durcissement. Les mortiers pouzzolaniques développent leurs résistances plus fortement que le mortier de référence au jeune âge [Boualla et al., 2012].

Kerbouche et al.(2009). ont trouvé des résultats contradictoires, en notant que les résistances à la flexion des mortiers contenant la pouzzolane à jeune âge (2 à 7 jours) sont faibles comparativement à celles du mortier témoin et deviennent comparables à long terme (90 jours) pour un taux de 30% [Kerbouche et al., 2009]. Les mortiers contenant 10% de fines calcaires développent des résistances comparables à celles du mortier témoin à très jeune âge (2 jours), par contre elles diminuent de 11% à l'âge de 7 jours et de 7% à l'âge de 28 jours.

En étudiant l'effet du calcaire sur la résistance à la flexion des mortiers calcaires de concassage à liants quaternaires, Makhloufi et al.(2015). Ont remarqué des réductions systématiques de la

résistance à la traction par flexion lorsque le taux du filler calcaire augmente en comparaison avec celle du mortier de contrôle à tous les âges, tandis que les résistances à la flexion de ces mortiers (avec des taux élevés en calcaires) sont les plus élevées comparées à celles des mortiers avec additions à court terme ; par contre elles diminuent avec le temps par rapport aux autres mortiers composés de filler calcaire, de pouzzolane naturelle et de laitier de haut-fourneau. Ces résistances diminuent au jeune âge au fur et à mesure que les calcaires sont incorporés avec la pouzzolane et le laitier dans les mortiers [Makhloufi et al., 2015].

On peut remarquer que l'effet de l'ajout de la pouzzolane et les fillers calcaires ont un effet positif sur la résistance à la flexion pour les mortiers.

III.3.2.2 Résistances à la compression

Le tableau ci-dessous présente les valeurs de la résistance à la compression pour les différentes compositions étudiées.

Tableau III.5 : Variation des résistances à la compression en fonction du temps (MPa).

Résistances à la compression (MPa)							
Âge (jours) Mortier	3	7	14	28	90	180	360
M0	15,1	19,5	22,2	25,3	28,2	30,4	32,5
M1	11,93	17,30	19,21	21,71	32,4	36,8	43,4
M2	13,29	17,18	18,55	20,78	27,3	33,1	37,7
M3	16,23	19,43	21,30	23,91	29,5	31,2	35,3
M4	14,96	19,13	21,99	23,78	26,3	29,6	32,4
M5	13,94	16,45	19,54	23,18	25,8	27,9	30,6
M6	13,36	18,93	19,54	20,56	24,3	26,1	29,4

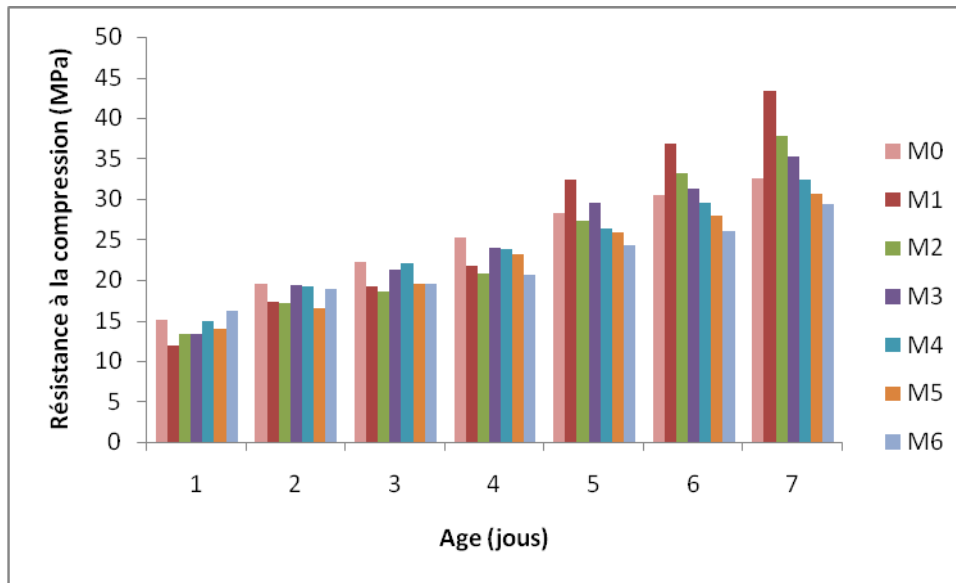


Figure III.5. Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les différents mortiers

La figure III.5 montre le développement des résistances en compression des mortiers en fonction de l'âge de durcissement. On remarque que les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute de résistance.

A court terme, la figure III .5 montre que la résistance du mortier M₃ est la plus élevée (16,23 MPa), par contre le mortier M₁ présente la plus faible valeur (11,93 MPa).

A 3 jours les mortiers M₂, M₅ et M₆ présentent presque les mêmes valeurs.

A long terme le mortier M₁(70%CPA, 30%PN, 0%FC) donne la valeur maximale de résistance, cette valeur qui est égale à (43,4 MPa) .

Ces résultats ainsi obtenus peuvent être validés par Ghrici et al. qui ont confirmé que l'étude de l'effet des couples « PN / FC » sur les résistances à la compression et à la flexion montrent que la combinaison 70 % CPA, 30 % PN et 0 % FC donne une résistance très comparable à celle du mortier de contrôle [Ghrici et al., 2007].

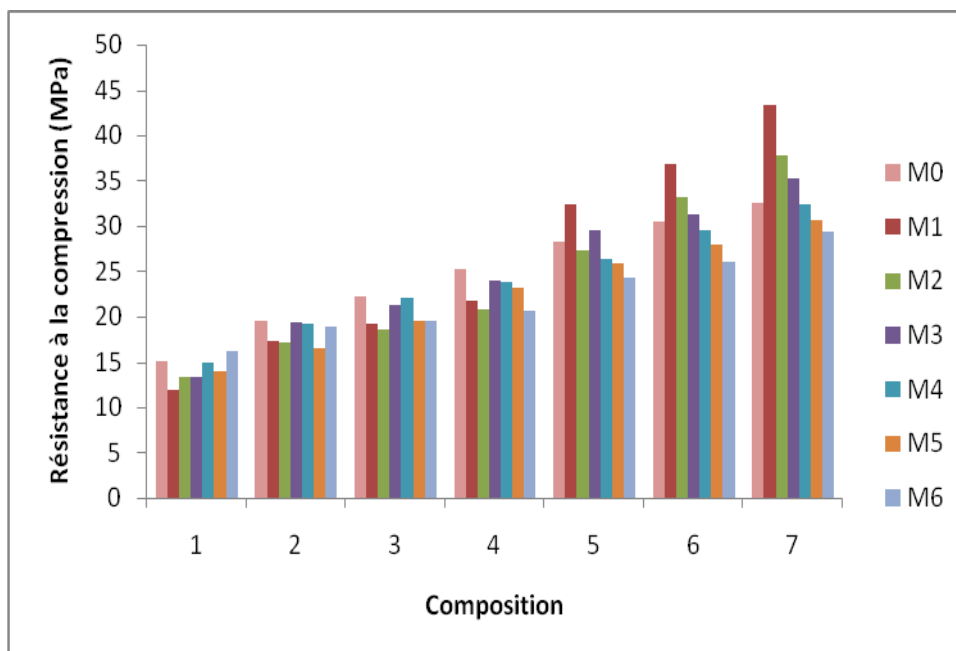


Figure III.6. Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution des additions pour les différents mortiers

Kerbouche et al.(2009) ont trouvé presque la même combinaison d'additions minérales. Les résistances des mortiers contenant à la fois de la pouzzolane naturelle et les fines calcaires sont faibles comparativement à celle du mortier de contrôle à jeune âge (2 et 7 jours), mais se développent à long terme (28 et 90 jours) et deviennent comparables pour la combinaison (80% CPA, 10% PN et 10% FC) [Kerbouche et al., 2009].

A long terme, les mortiers contenant un taux de 30% de pouzzolane développent des résistances comparables à celle du mortier de contrôle et représentent 89% et 91% aux âges de 28 et 90 jours respectivement. Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et se développe à long terme en fixant la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée par l'hydratation du ciment Portland donnant naissance à des C-S-H supplémentaires de deuxième génération occupant un espace important de la matrice cimentaire et contribuant ainsi au développement de la résistance mécanique. La chute de résistance pour les mortiers contenant 40% de pouzzolane naturelle peut être attribuée à la quantité insuffisante de chaux libérée au cours de l'hydratation du ciment et par conséquent à des réactions chimiques incomplètes.

Boualla et al.(2012) ont montré le développement des performances des mortiers contenant différents pourcentages de pouzzolane par substitution partielle au ciment en fonction des différents âges. Ils ont remarqué que les résistances mécaniques des mortiers contenant jusqu'à 5% de PN augmentent régulièrement avec l'âge par rapport à celles des mortiers témoins [Boualla et al., 2012]. Cela peut être dû à la variation de la cinétique d'hydratation du C_3S (silicate tricalcique) et C_2S (silicate bicalcique). La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout (à court et moyen terme 2 et 7 jours). Cette diminution de la résistance est considérable surtout au jeune âge et diminue lorsque le pourcentage de l'ajout augmente. Cette diminution de la résistance est due au fait que la réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge. Les C_3S et C_2S sont les deux principaux minéraux qui assurent le développement des résistances mécaniques à court et à moyen terme.

Selon Benkadour et al.(2009) la résistance à la compression diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge surtout à 2, 7 et 28 jours a titre d'exemple, la substitution de 30% de PN diminue la résistance à la compression de 36.68%, 6.16% et 24.45% à 2, 7 et 28 jours respectivement.

La résistance à la compression des mortiers à 10% PN rejoint celle du témoin à 28 jours, la différence de la résistance à la compression des mortiers qui contiennent 10% à 30% de pouzzolane naturelle ne dépasse pas 5% quelque soit l'âge.

Cette diminution de la résistance est attribuée principalement à l'activité lente de la pouzzolane naturelle. Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane naturelle et le $Ca(OH)_2$ libéré par l'hydratation du C.P.A. ce qui donne à la pouzzolane naturelle la propriété de fixer la chaux [Benkadour et al., 2009].

III.3.3 Variations dimensionnelles

L'étude de l'évolution de la variation de longueur des mortiers et des bétons est un moyen nécessaire est d'une importance majeure qui permet de prévoir le comportement d'une structure, car la durabilité d'une structure est compromise lorsque le matériau de construction de base a tendance à rétrécir au jeune âge.

Si la variation relative de dimension est très grande, la durabilité par conséquent est affectée et on doit établir de nouvelles formulations afin d'optimiser le comportement de la structure vis-à-vis de l'apparition des fissures causées par le retrait.

La manifestation de phénomènes de fissuration ouverte dans la zone de l'enrobage peut augmenter les propriétés de transfert des bétons et nuire ainsi à leur durabilité.

Dans cette optique, la maîtrise de la fissuration précoce des bétons liée aux phénomènes de retrait apparaît essentielle [Ghrichi et al., 2007] .

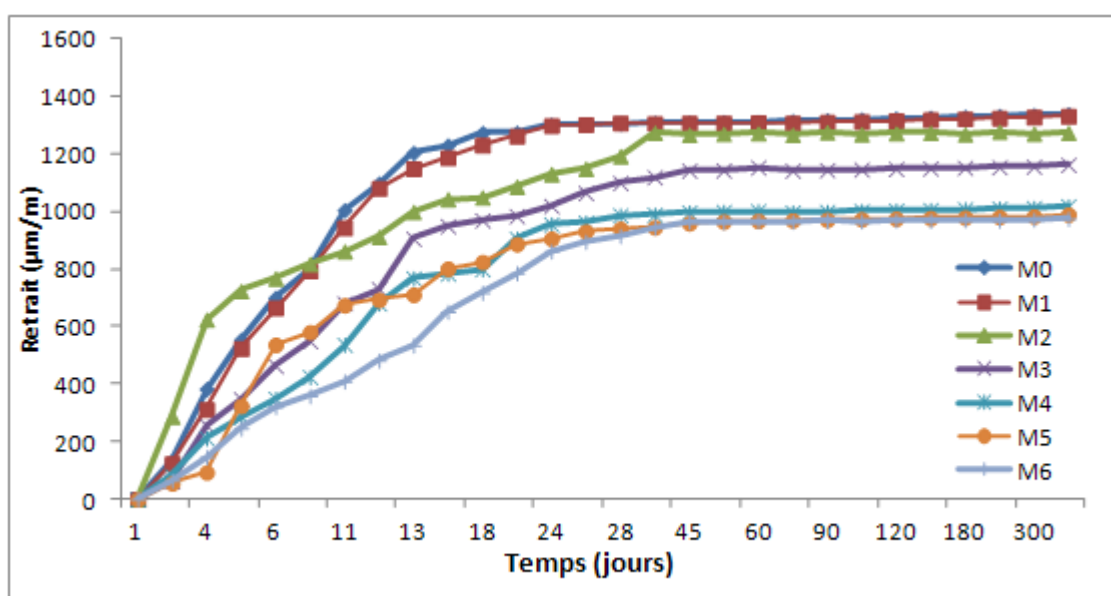


Figure III.7. Evolution du retrait en fonction de l'âge pour les différents mortiers étudiés

Les mesures de retrait ont été effectuées durant la période du 1er au 360^{ème} jour pour tous les mortiers. Les résultats ainsi obtenus sont représentés sur la figure III.7

Les courbes montrées permettent d'illustrer l'évolution du retrait des différents mortiers en fonction de l'âge.

On remarque que l'évolution du retrait est similaire pour l'ensemble des mortiers confectionnés. Tous les mortiers ont montré une augmentation de retrait (Expliquée par l'assèchement des éprouvettes exposées à l'air libre), jusqu'au 360^{ème} jour. Comme le montre la figure III.7, le mortier témoin M₀ a montré une grande tendance au retrait par rapport aux autres mortiers. Le mortier M₁, où on a que de la pouzzolane, paraît quand même très proche du mortier M₀. A partir

du 9^{ème} jour, le retrait du mortier M_0 augmente d'une manière plus ou moins significative en enregistrant un seuil de retrait de 1312,08 $\mu\text{m/m}$. Le mortier M_1 donne une valeur égale à 1308,75 $\mu\text{m/m}$.

Au âge 360 jour, les mortiers M_2 et M_3 ont atteint respectivement les valeurs suivantes : 1275 $\mu\text{m/m}$ et 1163 $\mu\text{m/m}$. Les mortiers M_4 , M_5 et M_6 ont donnés des valeurs légèrement inférieures qui sont respectivement 1019.27 $\mu\text{m/m}$, 990 $\mu\text{m/m}$ et 975.85 $\mu\text{m/m}$.

Ces constatations nous permettent de dire que le retrait est influencé par le type d'ajout étant donné que le mortier M_1 , à base de 30% de pouzzolane naturelle a donné des valeurs de retrait supérieures à celles des autres mortiers.

Le retrait des éprouvettes représenté sur la figure III.7 montre également que le mortier M_6 présente la plus faible déformation ; en augmentant le pourcentage de calcaire, le retrait devient moins important. Par contre en augmentant régulièrement la pouzzolane naturelle, le retrait devient de plus en plus important.

Selon Bellifa (2012) et Benkaddour et al.(2009) les fillers calcaires améliorent la distribution des tailles des pores et les propriétés physiques des mortiers. L'ajout du filler calcaire réduit la porosité grâce à l'occupation d'une partie des vides intergranulaires par les fines, réduisant ainsi la taille des pores capillaires [Bellifa, 2012 ; Benkaddour et al., 2009]. En revanche, la pouzzolane naturelle ralentit l'hydratation du ciment au cours des premiers jours ; de ce fait la porosité des mortiers formée est supérieure à celle du mortier à base de ciment à filler calcaire. A long terme, les réactions pouzzolaniques prennent place et renforcent le développement de la microstructure pour la rendre plus dense. La porosité des mortiers diminue sensiblement avec l'âge de ces derniers. Cette diminution est traduite par l'avancement des réactions d'hydratation du ciment et la création des produits d'hydratation qui combler les vides dans la matrice cimentaire.

Itim et al.(2010) ont montré que le retrait total des éprouvettes de mortier de ciment au calcaire présente une importante déformation dépassant celle du mortier à ciment sans calcaire (mortier témoin). Après le septième jour, le retrait du mortier témoin évolue beaucoup plus rapidement et se distingue de ceux du calcaire jusqu'à l'âge de six mois. A long terme, le calcaire n'a pas d'effet significatif sur le retrait final, où les valeurs de retrait des mortiers contenant un taux 4,5 et 6 élevé en filler calcaire se rejoignent. Les valeurs de retrait des éprouvettes de mortier à la pouzzolane se rejoignant avec celles du mortier témoin. Après le 5^{ème} jour, la pouzzolane

engendre un retrait légèrement moins important que celui du mortier témoin. Après le 10^{ème} jour, l'échantillon à 10% de pouzzolane déclenche un retrait très important et dépasse celui du mortier témoin. A une année d'observation, le retrait de l'éprouvette à 20% de pouzzolane atteint celui de l'éprouvette témoin tandis que celui à 30% de pouzzolane reste légèrement inférieur. De son côté, la pouzzolane naturelle fait augmenter le retrait à 10% de substitution, et une fois ce taux dépassé sa valeur est réduite. Le mortier à calcaire engendre un retrait semblable à celui du mortier témoin. Les pertes d'eau sont plus significatives au jeune âge pour le calcaire, ceci montre la nécessité d'une cure prolongée pour les éprouvettes de calcaire et un peu moins pour celles à la pouzzolane pour éviter toute perte d'eau qui peut entraîner l'affaiblissement de l'hydratation [Itim et al., 2010].

Kaid et al.(1998) ont pu démontrer que les déformations du mortier contenant 10% et 15% de pouzzolane naturelle se rapprochent de celle du mortier témoin (avec ou sans superplastifiant) [Kaid et al., 1998]. Par contre, le retrait du mortier contenant 5% d'ajout diminue d'environ 30% par rapport à celui du mortier témoin. Alors que le retrait du mortier contenant 10% de pouzzolane diminue de 6%. Ceci est probablement dû à la quantité d'eau de gâchage plus importante pour le mortier avec 10% de pouzzolane. Pour une teneur de 5 % de pouzzolane, le mortier subit un séchage moins important que celui du mortier témoin. Ce mortier contient vraisemblablement des pores plus gros que ceux du mortier témoin et des mortiers confectionnés à partir de 10% et 15% de pouzzolane. Le retrait du mortier pouzzolanique semble être inférieur à celui du témoin. Le retrait du mortier se développe rapidement et atteint 70% à 75% de son maximum. Cette évolution est fortement ralentie après un mois, et se stabilise vers 90 jours[Kaid et al., 1998].

III.3.4.Absorption capillaire des mortiers

Les résultats d'absorption d'eau par capillarité pour les différents mortiers sont regroupés dans le tableau III .6.

Tableau III.6 : Résultats d'absorption d'eau par capillarité pour les différents mortiers.

Temps (min)	Absorption capillaire (g/cm²)						
	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,24	0,22	0,17	0,25	0,22	0,25	0,22
10	0,35	0,29	0,23	0,32	0,30	0,33	0,30
15	0,45	0,36	0,34	0,42	0,42	0,46	0,41
20	0,48	0,42	0,41	0,48	0,48	0,51	0,46
25	0,56	0,46	0,44	0,55	0,53	0,59	0,53
30	0,70	0,55	0,53	0,63	0,61	0,67	0,63
35	0,75	0,59	0,58	0,70	0,70	0,73	0,70
40	0,80	0,64	0,64	0,74	0,75	0,79	0,76
45	0,83	0,68	0,70	0,78	0,80	0,84	0,82
50	0,90	0,72	0,73	0,86	0,88	0,90	0,88
55	0,94	0,77	0,77	0,88	0,89	0,95	0,92
60	1,00	0,79	0,80	0,90	0,93	0,97	0,96
65	1,02	0,79	0,81	0,90	0,95	0,97	0,97
70	1,06	0,83	0,84	0,98	0,99	1,04	1,03
75	1,08	0,88	0,88	1,03	1,03	1,07	1,08
80	1,12	0,88	0,88	1,03	1,04	1,07	1,08
85	1,20	0,93	0,92	1,08	1,11	1,16	1,17
90	1,20	0,93	0,92	1,08	1,11	1,16	1,17

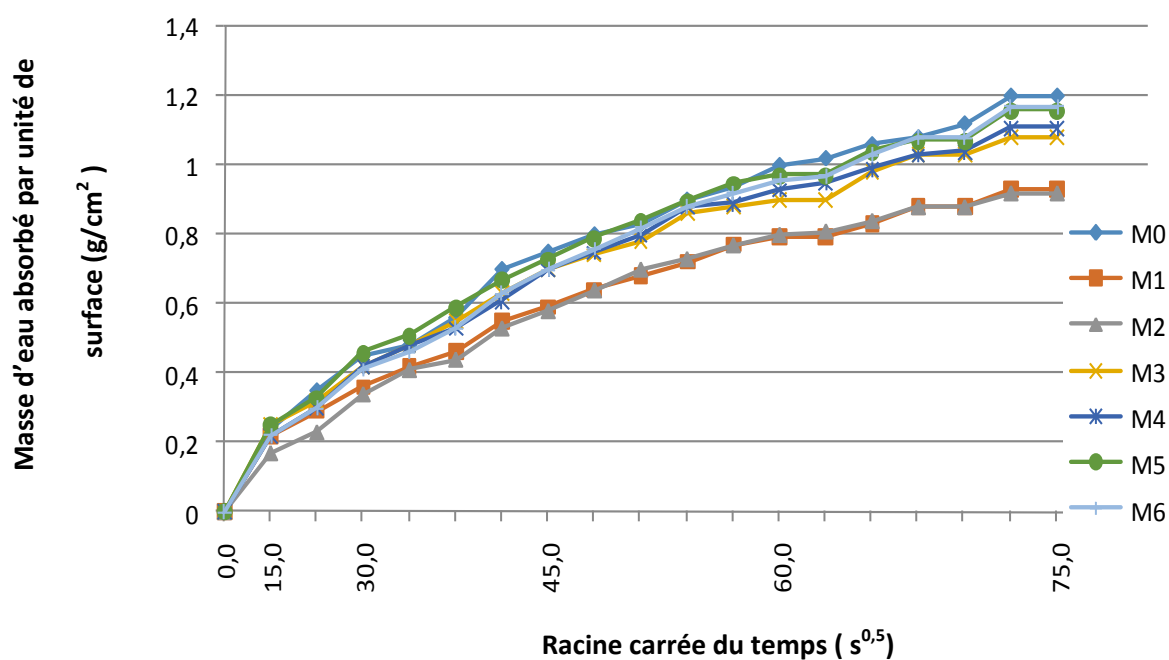


Figure III.8. Evolution de l'absorption capillaire en fonction du temps

On peut noter qu'au cours des premières minutes, il existe d'une corrélation linéaire entre la quantité d'eau absorbée et le temps. Cette relation peut être donnée par l'équation suivante :

$$Y = a + bx \quad (\text{III.13})$$

$a = 100 \cdot M/S$ et b : la pente (C_c)

Et un coefficient de corrélation R .

Donc le coefficient d'absorption d'eau représente dans le tableau III.7.

Tableau III.7 : Equations de corrélations et valeurs de Cc pour les différents mortiers à 28 j.

Mortier	Equation de corrélation	Coef. de corrélation	« Cc » Coefficient d'absorption ($\text{g/cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$)
M0	$Y=0.017x - 0.050$	0.993	0.017
M1	$Y=0.0132x - 0.0169$	0.996	0.013
M2	$Y=0.0137x - 0.051$	0.989	0.014
M3	$Y=0.0154x - 0.0244$	0.995	0.015
M4	$Y=0.0161x - 0.0503$	0.993	0.016
M5	$Y=0.0164x - 0.0293$	0.995	0.016
M6	$Y=0.017x - 0.0767$	0.992	0.017

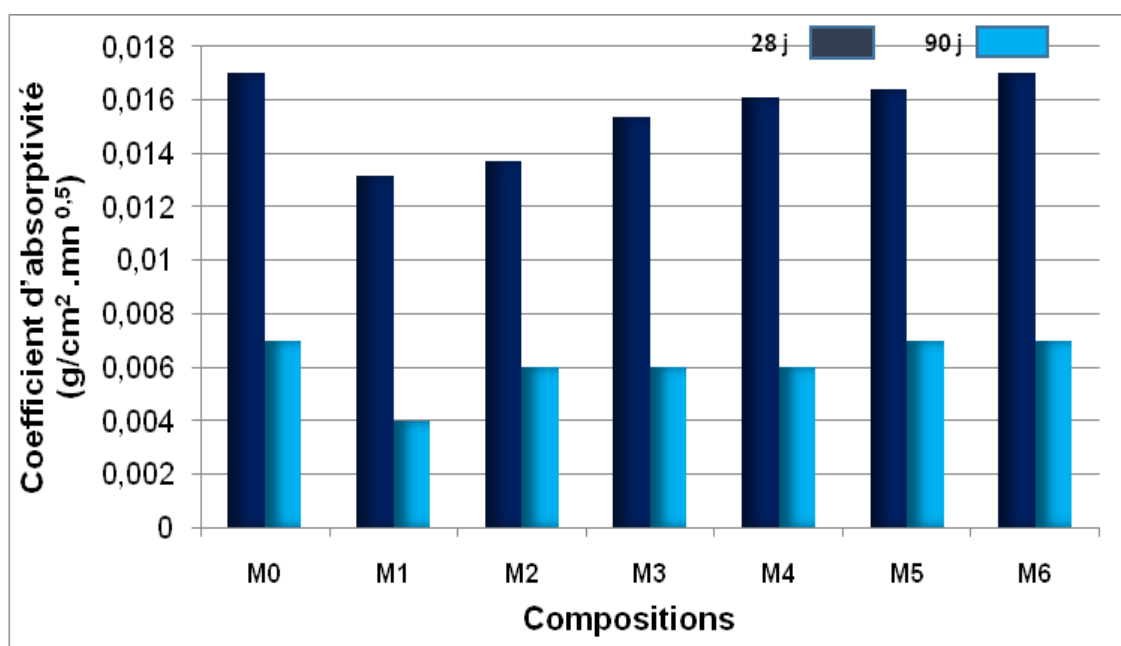


Figure III.9. Coefficient d'absorptivité à 28 j et 90 j pour chaque composition

Les résultats de l'essai d'absorptivité des différents mortiers sont illustrés en traçant les droites représentant l'augmentation des masses d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps,

comme indiquées dans la figure III.8. Les premières mesures montrent une augmentation de la masse dès l'instant où les pores superficiels ouverts du matériau se trouvent immergés de 2 à 5 mm du bas de l'éprouvette.

Les résultats d'absorptivité des différents mortiers confectionnés mesurés dans une période de 1h30mn (figure III.8) montrent que les valeurs obtenues sont comprises entre $0,0132 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ et $0,017 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$.

Les autres mortiers M₂, M₃, M₄ et M₅ ont enregistré des valeurs intermédiaires.

D'après la figure III.9, on remarque que la réduction de l'absorption due à l'incorporation des ajouts minéraux augmente à l'âge de 90 jours.

Pour le taux de 30% de pouzzolane on voit bien l'efficacité de cet ajout, car on note une diminution de l'absorption capillaire de 22 % à 28 jours.

Pour toutes les combinaisons on remarque une diminution de l'absorption avec le temps ; cette réduction d'absorption à long terme (90 jours) est probablement due d'une part, à la réaction d'hydratation qui conduit à la formation de produits d'hydratation et d'autre part par le développement de la réaction pouzzolanique des ajouts minéraux au cours du temps.

Ces résultats sont en accord avec ceux de Ghrici et al.(2007) qui ont comparé l'absorption des mortiers à 30% de pouzzolane + 15% de fillers calcaires et à 20% pouzzolane + 10% fillers calcaires à 28 jours pour un rapport E/L égale à 0,6. Ils ont remarqué que le mortier à base de 15% de fillers calcaires donne la valeur maximale d'absorption. La combinaison (20% PN-10% FC) donne une valeur intermédiaire et le mortier à base de 30% pouzzolane donne la valeur minimale de sportivité [Ghrici et al., 2007].

L'incorporation de 30% de pouzzolane naturelle et 10% de calcaire réduit la sportivité de 31% pour un rapport E/L égale à 0,6. Plusieurs recherches ont montré l'efficacité des ajouts minéraux sur l'absorptivité des bétons et mortiers.

De leur côté, Tsivillis et al.(2002) ont trouvé une diminution de 5% de l'absorptivité d'un béton contenant 15% de calcaire par rapport au béton de contrôle avec un E/L égale à 0.7 [Tsivillis et al., 2002].

Les pores dans la pâte de ciment durcie et les interfaces entre les granulats et la pâte de ciment sont remplis par ces ajouts minéraux, les pores capillaires sont par conséquent réduits par formation des gels de C-S-H, d'où une réduction de l'absorption des mortiers.

III.3.5. Porosité accessible à l'eau (saturation totale).

La porosité totale, dont les valeurs sont données dans le figure III.10, définit la propriété d'un matériau de contenir des vides interstitiels (pores) interconnectés ou non. Il est bien clair que la porosité du mortier de référence M0 est plus grande comparée à celles des mortiers avec additions minérales, ce qui montre le rôle important de ces dernières pour combler les vides intergranulaires.

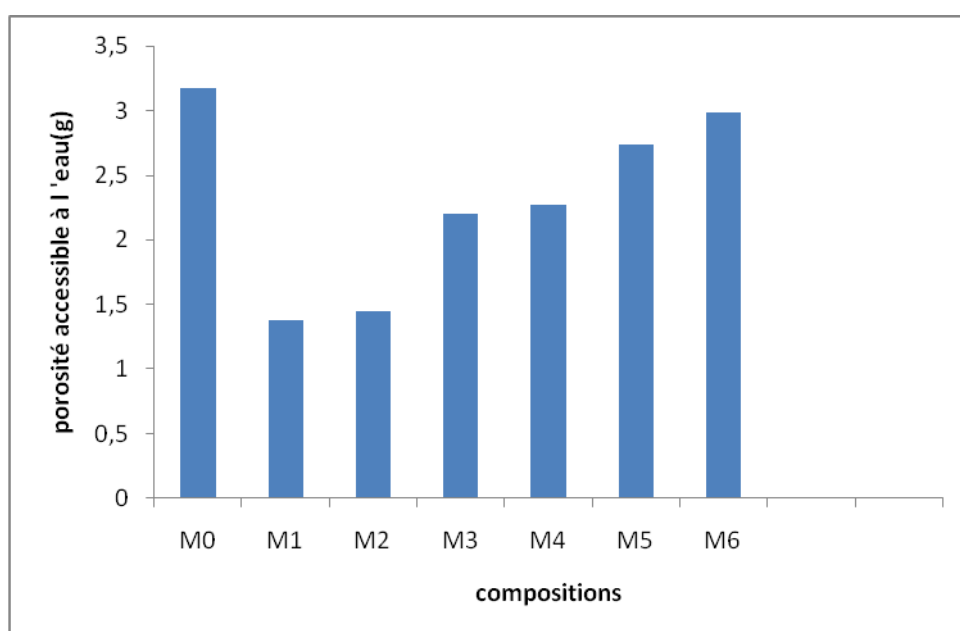


Figure III.10. Porosité accessible à l'eau pour chaque composition à 360 jours

En effet, l'augmentation de la porosité est due au fait que les pores dans la pâte de ciment durcie ainsi que les interfaces entre les granulats et la pâte de ciment sont remplis par ces ajouts minéraux et à la réaction pouzzolanique qui continue son effet en formant des silicates de calcium hydratés (C-S-H) supplémentaires qui améliorent l'interface pâte-granat et diminuent la porosité.

III.4 Etude des mortiers conservés dans les milieux agressifs

Afin d'apprécier la durabilité de ces mortiers contenant différentes proportions de FC et PN vis-à-vis de quelques agressions chimiques, une série d'essais de caractérisation physicomécanique a

été menée après avoir conservé les échantillons étudiés dans différents environnements supposés chimiquement agressifs.

III.4.1 Variation de masse

Les masses des éprouvettes étudiées pour chaque composition ont été suivies jusqu'au 360^{ème} jour (après 28j) afin de voir les variations qui peuvent en avoir lieu.

III.4.2 Comparaison entre les trois solutions

Comme il est montré dans la figure III.11, la variation de masse en fonction du temps d'immersion du mortier conservé dans les trois solutions (Chaux, NaCl et HCl) prend l'évolution suivante :

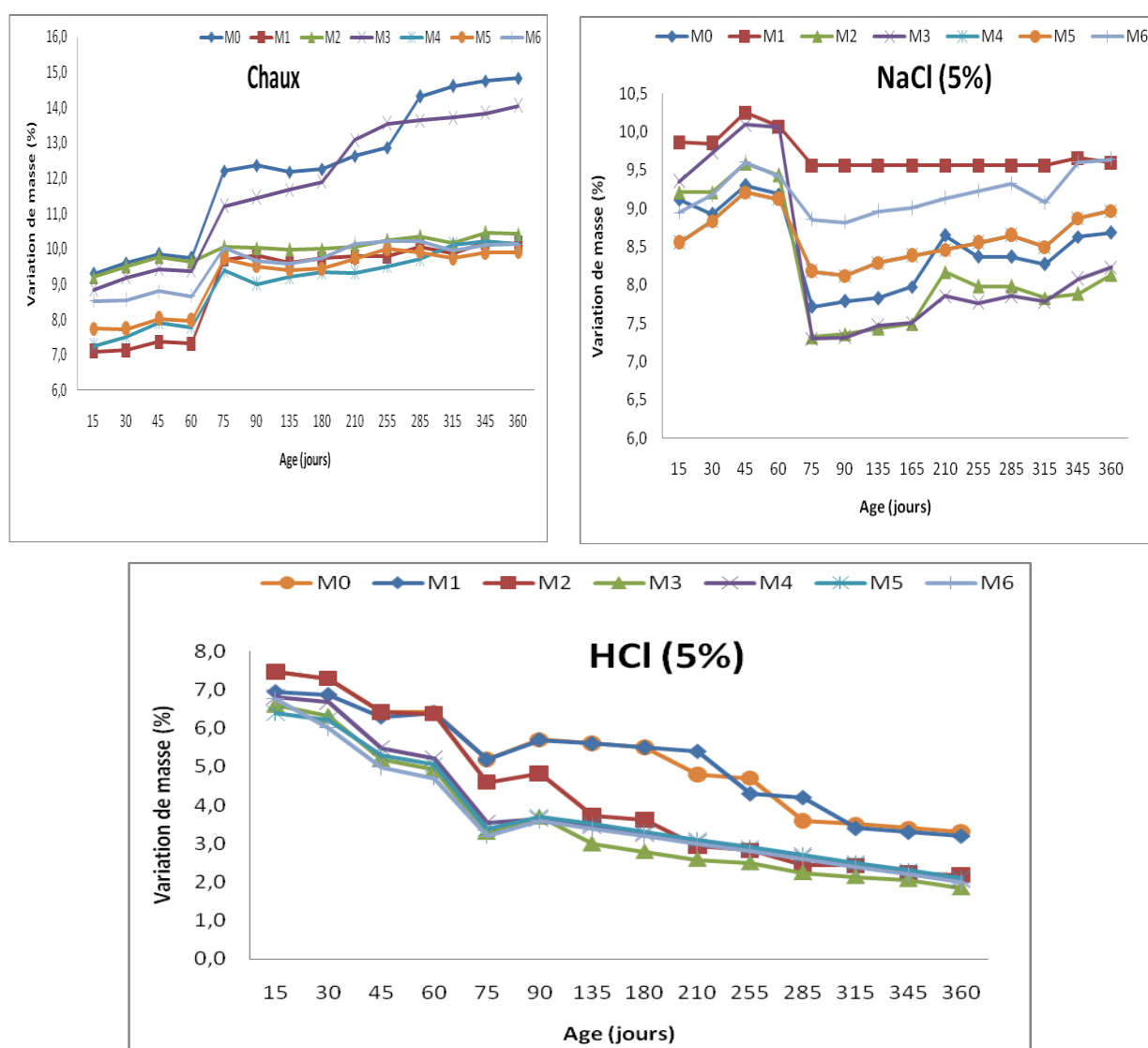


Figure III.11. Variation de la masse des éprouvettes en fonction de la période d'immersion dans une trois solution (Chaux ,Nacl 5% et Hcl 5%)

D'après les courbes de la figure III-11 qui présente l'évolution de la variation de masse en fonction du temps, soit un gain ou une perte de masse en fonction du temps, nous remarquons:

- ✓ la solution de NaCl on enregistre un petit gain allant jusqu'à 45 jours ; après 45 jours, nous constatons une diminution du poids pour la solution de NaCl. Pour la solution de HCl, la perte de masse est significative par rapport aux autres milieux.
- ✓ Une perte de masse très importante pour le mortier M_3 immergé dans la solution HCl par rapport au mortier de référence (milieu de chaux).
- ✓ La même perte de masse est enregistrée pour les mortiers M_2 , M_3 , M_4 , M_5 et M_6 immergés dans la solution HCl.
- ✓ Une petite perte de masse pour les mortiers M_0 et M_1 par rapport aux mortiers M_2 , M_3 , M_4 , M_5 et M_6 immergés dans la solution HCl, tandis que les mortiers M_0 et M_3 ont un gain de la masse.
- ✓ Les mortiers M_0 et M_1 sont plus résistants dans les milieux agressifs par rapport aux mortiers M_2 , M_3 , M_4 , M_5 et M_6 .

Dans la solution de chaux, le gain de masse enregistré pour le mortier de référence est dû à la continuation de l'hydratation des grains de ciment qui n'ont pas encore été hydratés. Cette propriété est garantie par la présence de Ca^{+2} dans la solution de conservation qui est nécessaire à la continuation des réactions d'hydratation du ciment. L'eau saturée en chaux est en fait un milieu alcalin riche en calcium [Bouglada, 2008], donc pas de risque de phénomène de lixiviation qui pourra causer la perte en masse. La continuation de l'hydratation du ciment génère de nouveaux produits (gel de C-S-H, Portlandite, monosulfo-aluminates, etc.) qui précipitent dans les vides capillaires. La formation de nouveaux produits hydratés logés dans les pores du composite, augmentent en réalité la compacité (minimisent la porosité) et par conséquent la pâte devient plus dense, ce qui a donné les gains en masse enregistrés [Makhloufi et al., 2012].

III.4.3. Résistances mécaniques

III.4.3.1. Résistances à la traction par flexion

Les résultats des résistances à la traction par flexion obtenus sont présentés dans la figure III.12.

Les histogrammes montrés par la figure III.12, mettent en évidence l'effet des additions minérales sur les résistances à la flexion dans des milieux agressifs.

On remarque que le mortier M_0 présente les valeurs les plus faibles des résistances à la flexion par rapport aux autres types de mortiers, quelques soient le type et le taux des ajouts et le milieu de conservation. Le mortier M_6 présente la faible résistance à 3, 6 et 12 mois avec respectivement les valeurs de 3.42 MPa, 3.16 MPa et 1.94 MPa dans la solution de HCl par rapport aux mortiers contenant les ajouts (additions minérales) .

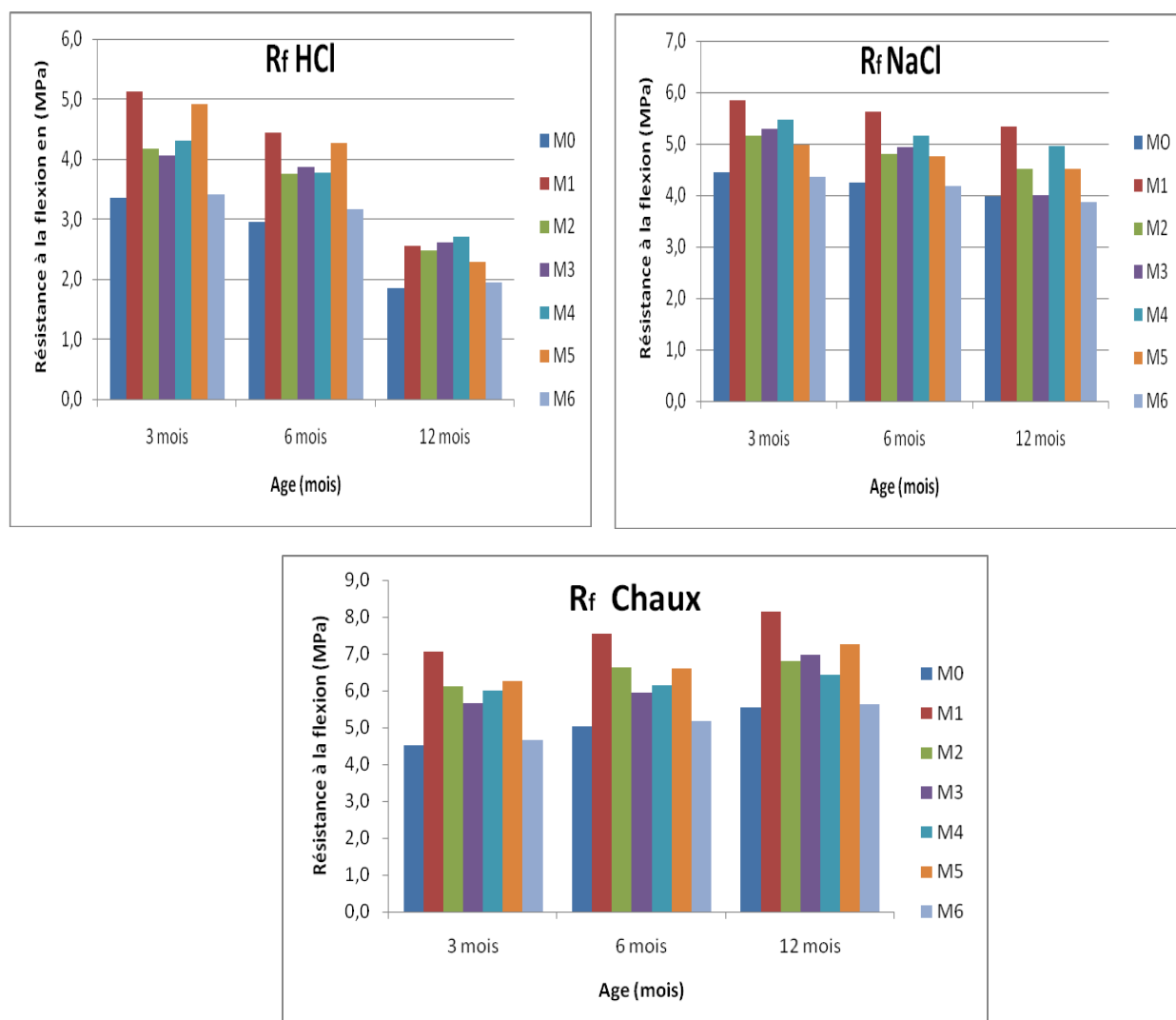


Figure III.12. Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge pour les différents mortiers et différents milieux

La valeur maximale de la résistance à la flexion est obtenue pour le mortier M_1 immergé dans la solution de la chaux. Cette valeur est plus grande que celle des mortiers immergés dans les autres milieux NaCl et HCl.

Le mortier M_6 présente la plus faible résistance pour les milieux de chaux et NaCl. La chute de la résistance en flexion dans la solution de HCl est plus grande que celle du NaCl.

Le mortier M_1 présente la meilleure résistance au cours du temps dans le milieu d'HCl et la chute de résistance est plus petite comparée aux autres mortiers.

III.4.3.2. Résistances à la compression

Les résultats des résistances à la compression obtenus sont illustrés dans la figure 13.

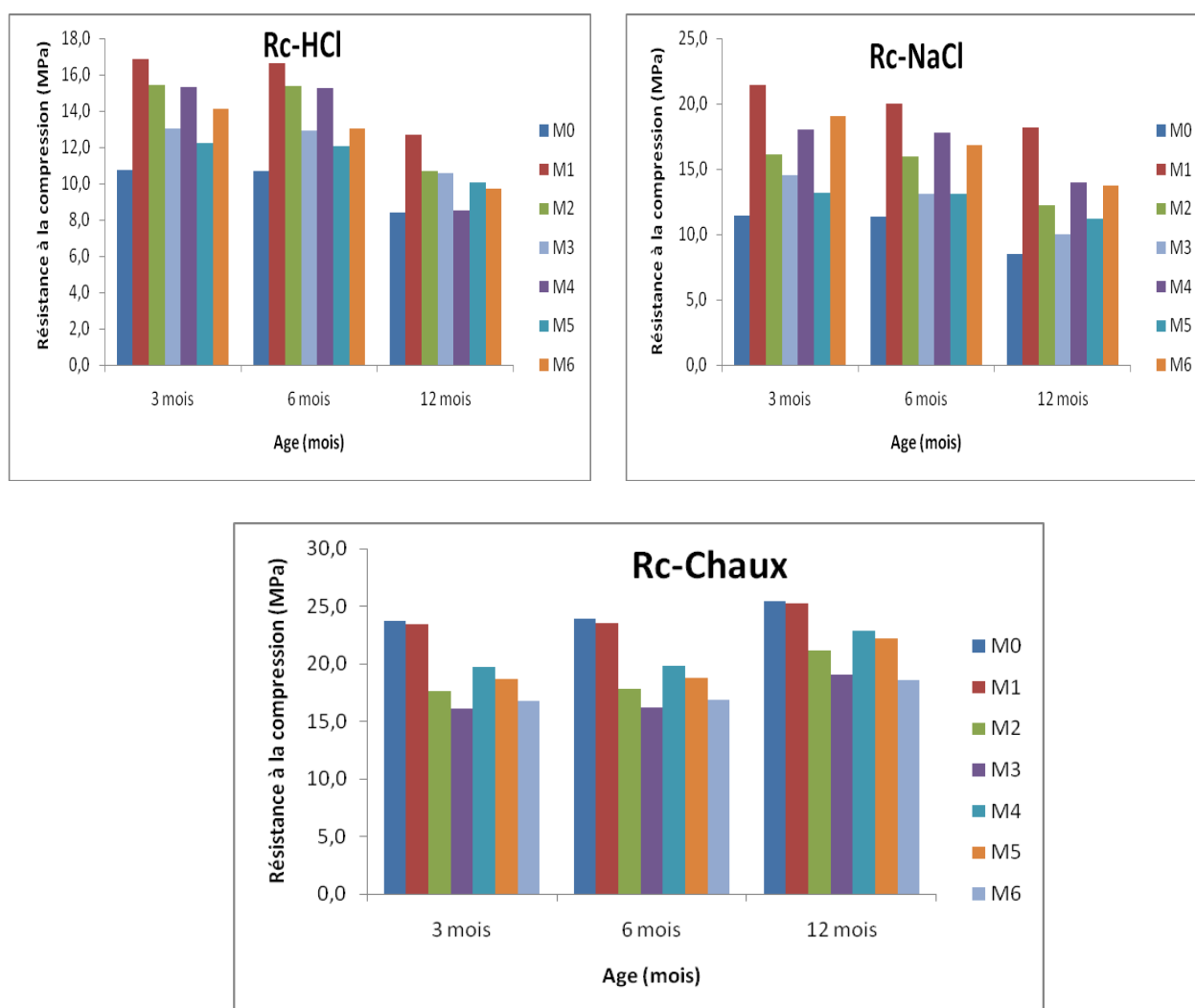


Figure III.13. Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution des additions pour les différents mortiers et différents milieux

La figure 13 présente l'effet du taux de substitution de la pouzzolane naturelle et du filler calcaire sur la résistance à la compression des mortiers à différentes échéances. D'après cette figure, on remarque que les résistances à la compression des mortiers dans les deux milieux agressifs restent toujours inférieures à celle du mortier de contrôle dans la solution de chaux et cela pour tous les âges. L'augmentation du taux de pouzzolane a un effet positif sur la résistance à la compression, à long terme ; la réaction pouzzolanique continue son effet en formant des C-S-H supplémentaires qui améliorent l'interface pâte-granulat et diminuent la porosité capillaire du mortier. La réaction pouzzolanique continue avec le temps, donnant par la suite des résistances comparables et parfois élevées par rapport à celles du mortier de référence en particulier à l'âge de 360 jours.

Dans les milieux de HCl et NaCl, on constate également une chute de résistance plus importante dans le cas des mortiers M₀, M₂, M₃, M₄, M₅ et M₆, en comparaison avec celle du mortier M₁.

D'autre part, on peut conclure que l'activité pouzzolanique augmente avec l'âge et ne peut être efficace qu'à partir du 28^{ème} jour. Ceci montre que l'activité de la pouzzolane est très lente. Cet effet est dû au fait qu'à long terme, la réaction pouzzolanique continue son effet en formant un deuxième C-S-H supplémentaire. On remarque aussi que l'activité pouzzolanique augmente avec l'augmentation du taux de l'ajout pouzzolanique.

Dans leurs travaux Boualleg et al (2011). ont aussi constaté que les résistances mécaniques du ciment pouzzolanique présentent une meilleure résistance dans les milieux agressifs.

Pour un mortier contenant 30% de pouzzolane, S. Mansour (2010) a enregistré une réduction de résistance à la compression à l'âge 90 jours de 15% par rapport au mortier de contrôle dans les mêmes conditions [S. Mansour.2010].

III.4.4 Etude de la conductivité thermique

Les caractéristiques thermiques sont mesurées, pour chaque composition, sur deux demi- prisme de dimensions 4 x 4 x 16 cm³ entre lesquels est placée la sonde. Ces derniers sont placés dans une enceinte isolée afin de limiter toute éventualité d'échanges avec le milieu extérieur. L'ensemble « demi prisme (1) – sonde - demi prisme (2) » est soumis à un serrage convenable afin d'éviter tout problème de contact entre la sonde et les deux demi-échantillons. Les essais sont réalisés à des températures ambiantes soit 20 ± 5 °C. Pour chaque composition, l'essai est répété trois fois afin de prendre la moyenne de trois mesures.

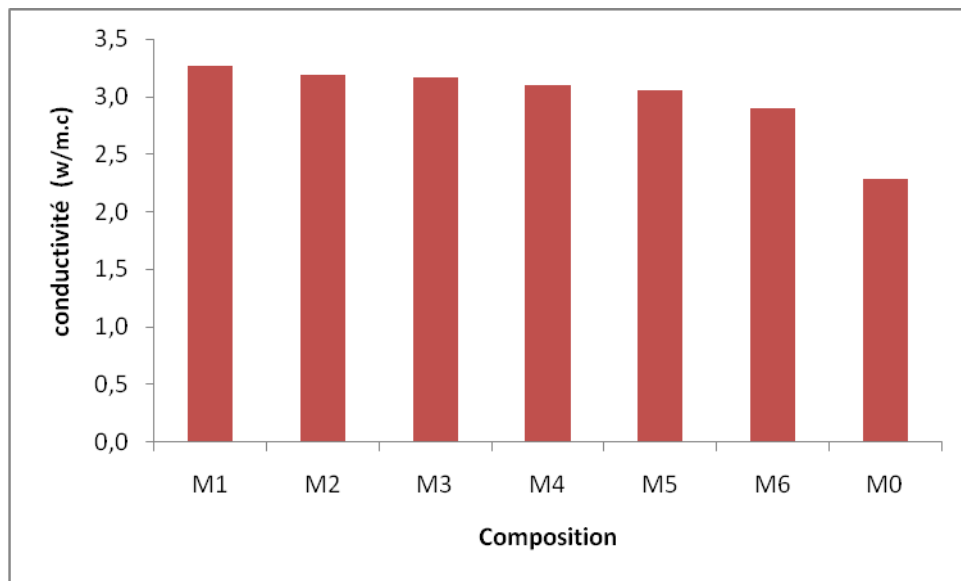


Figure III.14. Evolution de la conductivité thermique pour chaque composition à (360jours)

La figure III.14 présente, en fait, les conductivités thermiques pour toutes les compositions étudiées.

D'après cette figure, nous pouvons observer que la conductivité thermique varie dans le même sens que le pourcentage d'ajout de pouzzolane dans les mortiers. La diminution de l'ajout de pouzzolane est bénéfique pour diminuer la conductivité thermique, ce qui a été déjà confirmé par la diminution de la porosité. Il est tout à fait normal que la composition M_0 , qui est la plus poreuse à cause de l'absence d'ajouts, présente la plus faible conductivité.

Dans ces travaux, Mohamed Touhami (2003), comme beaucoup d'autres chercheurs, a montré que la conductivité thermique diminue avec la diminution de la masse volumique du mortier [Touhami, 2003] ; une corrélation entre la masse volumique et la conductivité thermique allant dans ce sens a été trouvée. On a donc toujours montré que la diminution de la masse volumique est bénéfique pour diminuer la conductivité thermique.

III.5 Conclusion

Au cours de cette campagne expérimentale, nous avons étudié l'effet de deux types d'ajouts minéraux (les fillers calcaires et la pouzzolane naturelle) sur l'évolution du retrait, les résistances à la traction par flexion et compression, et l'absorption capillaire des mortiers à base de sables calcaire et dunaire. Sept compositions de mortiers ont été confectionnées avec des liants binaires et ternaires, en combinant à des proportions variables la teneur des fillers calcaires de la région de Laghouat et de pouzzolane naturelle de la région de Beni-Saf. L'ajout des additions minérales est réalisé par substitution partielle du ciment portland CPA CEMI. Les résultats obtenus nous ont permis de conclure que :

- La maniabilité des mélanges étudiés semble être similaire, car les temps d'écoulement enregistrés sont très proches les uns des autres et ne présentent qu'une faible variation.
- Au jeune âge, tous les mortiers présentent une nette augmentation de retrait ; après 28 jours, la variation est presque similaire et tend vers la stabilisation.
Le mortier avec fillers calcaires donne une valeur minimale de retrait, par contre le mortier avec pouzzolane naturelle donne une valeur maximale de retrait.
- Une augmentation importante de masse a été enregistrée pour tous les mortiers immergés dans la solution de chaux.
- Une perte de masse a été remarquée dans le cas des mortiers immergés dans les solutions de NaCl et HCl.
- Une perte de masse très importante a été observée dans le cas des mortiers immergés dans la solution HCl en comparaison avec ceux du milieu de référence (milieu de la chaux).
- La perte de masse des mortiers immergés dans la solution NaCl est plus petite comparée à celle de la solution HCl.
- Au jeune âge (3 et 7 jours), la résistance à la compression des mortiers contenant des fillers calcaires est supérieure à celle des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle. Cependant, à 28 jours, les mortiers contenant une teneur élevée en pouzzolane ont développé une résistance à la compression supérieure à celle des mortiers confectionnés à partir de taux élevée de calcaires.

-
- La chute de résistance à la flexion dans le cas du milieu acide est plus grande par rapport à celle du milieu de chlorure.
 - La valeur maximale de la résistance à la flexion a été enregistrée dans le cas du mortier M1 immergé dans la solution de chaux et elle est plus grande par rapport aux celles des mortiers immergés dans les autres milieux NaCl et HCl.
 - L'augmentation du dosage de la pouzzolane semble avoir un effet positif sur la résistance à la compression à long terme.
 - Bien que sa diminution a un effet relativement négatif sur la résistance mécanique, la diminution de l'ajout de pouzzolane est bénéfique pour diminuer la conductivité thermique.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT	
RESUME EN ARABE	
RESUME EN ANGLAIS	
RESUME EN FRANÇAIS	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2 LE CIMENT.....	3
I.2.1 HISTORIQUE.....	3
I.2.2 DEFINITION.....	3
I.2.3 ETAPES DE FABRICATION.....	4
I.2.3.1 EXTRACTION ET LA PREPARATION DES MATIERES PREMIERES	4
I.2.3.2 SECHAGE ET BROyage.....	4
I.2.3.3 CUISSON.....	5
I.2.3.4 BROyage DU CLINKER	5
I.2.3.5 EXPEDITIONS.....	5
I.2.4 CONSTITUANTS DU CIMENT	6
I.2.4.1 LE CLINKER	6
I.2.4.2 LE GYPSE (CaSO_4).....	7
I.2.4.3 AJOUTS MINERAUX	8
I.2.5 HYDRATATION DU CIMENT.....	8
I.2.5.1 INTRODUCTION.....	8
I.2.5.2 HYDRATATION DES COMPOSANTS DU CIMENT PORTLAND.....	9
I.2.5.2.1 HYDRATATION DU SILICATE TRICALCIQUE C_3S	9
I.2.5.2.2 HYDRATATION DU SILICATE BI CALCIQUE C_2S	10
I.2.5.2.3 HYDRATATION DE L'ALUMINATE TRICALCIQUE C_3A	10
I.2.5.2.4 HYDRATATION DE L'ALUMINO-FERRITE TETRACALCIQUE C_4AF	11
I.2.5.2.5 CONCLUSION.....	12
I.3 AJOUTS MINERAUX.....	12
I.3.1 GENERALITES.....	12
I.3.2 CLASSIFICATION DES AJOUTS MINERAUX	13

I.3.2.1	PRINCIPAUX AJOUTS MINERAUX INERTES	13
I.3.2.1.1	FILLERS CALCAIRES	13
I.3.2.1.2	POUSSIÈRE	14
I.3.2.2	AJOUTS MINERAUX ACTIFS.....	14
I.3.2.2.1	POUZZOLANE	14
I.3.3	INTERET D'UTILISATION DES AJOUTS MINERAUX DANS LE GENIE CIVIL	16
I.3.3.1	INTERET DU POINT DE VUE ECONOMIQUE	16
I.3.3.2	INTERET DU POINT DE VUE TECHNIQUE.....	16
I.3.3.3	UTILISATION DES AJOUTS EN ALGERIE.....	17
I.3.4.	HYDRATATION DES CEMENTS POZZOLANQUES	17
I.4.	SABLE.....	18
I.4.1.	INTRODUCTION.....	18
I.4.2.	SABLE DE DUNE.....	18
I.4.1	INTRODUCTION	18
I.4.2	SABLE CALCAIRE	19
I.4.3	FORMATIONS GEOLOGIQUES EN CALCAIRE DE LA REGION DE LAGHOUAT	20
I.4.4	INFLUENCE DES SABLES CALCAIRES SUR LES BETONS ORDINAIRES.....	22
I.5	PROPRIETES THERMIQUES.....	23
I.5.1	INTRODUCTION	23
I.5.2	CARACTERISATION D'UN MILIEU POREUX.....	25
I.5.2. 1	POROSITE TOTALE	25
I.5.2. 2	POROSITE OUVERTE.....	26
I.5.2. 3	POROSITE FERMEE	26
I.5.3	TRANSFERTS THERMIQUES DANS LES MATERIAUX POREUX	26
I.5.3.1	TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION	27
I.5.3.2	TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION.....	28
I.6	DURABILITE DU BETON.....	29
I.6.1	INTRODUCTION.....	29
I.6.2	CAUSES DE DESORDRES DANS LES CONSTRUCTIONS	30
I.6.3	PRINCIPALES CAUSES DE DETERIORATIONS	30
I.6.4	FACTEURS DE DURABILITE	30
I.6.4.1	INFLUENCE DES PROPRIETES DES MATERIAUX	31
I.6.4.2	INFLUENCE DU RAPPORT E/C	31
I.6.4.3	MISE EN ŒUVRE DU MATERIAU	31
I.6.4.4	EFFETS DU CLIMAT CHAUD SUR LA DURABILITE DU BETON ET MORTIER.....	32
I.6.4.5	PERMEABILITE	32
I.6.4.6	COMPACTE ET POROSITE	32
I.6.4.7	PHENOMENE DE CARBONATATION.....	33
I.6.4.8	CYCLES GEL –DEGEL	33
I.6.4.9	ACTION DES SOLUTIONS AGRESSIVES	34
I. 7	CONCLUSION.....	35

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET ESSAIS REALISES

II.1 INTRODUCTION	36
II.2 CIMENT.....	36
II.2.1 MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE	36
II.2.2 MASSE VOLUMIQUE APPARENTE.....	37
II.2.3 FINESSE DU CIMENT	37
II.2.4 PRISE ET CONSISTANCE DU CIMENT.....	38
II.2.4.1 ESSAI DE CONSISTANCE	38
II.2.4.2 ESSAI DE PRISE	39
CIMENT A PRISE RAPIDE	39
II.2.5 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DU CIMENT	40
II.3. POZZOLANE	41
II. 4 SABLE	41
II.4.1 ANALYSE GRANULOMETRIQUE	41
II.4.2 MODULE DE FINESSE.....	42
II.4.3 MASSE VOLUMIQUE APPARENTE	43
II.4.4 MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE.....	43
II.4.5 EQUIVALENT DE SABLE (E_s).....	44
II.4.6 COMPACTE (C)	44
II.4.7 POROSITE (P)	45
II.5 EAU DE GACHAGE.....	46
II.6 AJOUTS MINERAUX	47
II.6.1 POZZOLANE NATURELLE	47
II.6.2 FILLERS CALCAIRES.....	49
II.6.2.1 ANALYSE MINERALOGIQUE.....	50
II.6.2.2 RESULTATS OBTENUS.....	51
II.7 ETUDE DU MORTIER	51
II.7.1 FORMULATION	51
II.7.2 MALAXAGE ET MODE DE CONSERVATION	53
II.7.3 MANIABILITE ET CONFECTION D'EPROUVETTES.....	54
II.7.4 ETUDE DU RETRAIT	55
II.7.5 RESISTANCES MECANIQUES	56
II.7.4 .1 ESSAIS DE FLEXION	56
II.7.4 .2 ESSAIS DE COMPRESSION	57
II.7.5. MESURE DE POIDS.....	58
II.7.6 MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE PAR LA METHODE DU FIL CHAUD :	59
II.7.6.1 PRINCIPE DE LA METHODE.....	59
II.7.6.2 MODELISATION DU FIL CHAUD.....	61

II.7.6.3 ESTIMATION SIMPLIFIEE AUX TEMPS LONGS	62
II.7.7 ESSAIS DE DURABILITE	63
II.7.7.1 ABSORPTION CAPILLAIRE	63
II.7.7.2 MILIEUX DE CONSERVATION.....	66

CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSES

III.1 INTRODUCTION.....	69
III.2 COMPOSITIONS ET PARAMETRES ETUDIES DE L’EFFET DES ADDITIONS MINERALES.....	69
III.2.1 EFFET DES DIFFERENTS POURCENTAGES DE PN ET FC SUR LA MANIABILITE	70
III.3 ETUDE DU MORTIERS CONSERVES A L’AIRE LIBRE.....	72
III.3.1 VARIATION DE MASSE	72
III.3.2 RESISTANCE MECANIQUE	73
III.3.2.1 RESISTANCES A LA TRACTION PAR FLEXION	73
III.3.2.2 RESISTANCES A LA COMPRESSION	76
III.3.3 VARIATIONS DIMENSIONNELLE	79
III.3.4.ABSORPTION CAPILLAIRE DES MORTIERS.....	82
III.3.5. POROSITE ACCESSIBLE A L’EAU (SATURATION TOTALE).	87
III.4 ETUDE DU MORTIERS CONSERVES DANS LES MILIEUX AGRESSIFS	87
III.4.1 VARIATION DE MASSE	88
III.4.2 COMPARAISON ENTRE LES TROIS SOLUTIONS.....	88
III.4.3. RESISTANCES MECANQUES.....	90
III.4.3.1. RESISTANCES A LA TRACTION PAR FLEXION	90
III.4.3.2. RESISTANCES A LA COMPRESSION	91
III.4.4 ETUDE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUES.....	92
III.5 CONCLUSION.....	94
CONCLUSION GENERAL	96
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES.....	99

CONCLUSIONS GENERALES

Ce travail avait pour but de montrer l'influence des ajouts minéraux, pour développer des liants à base des ressources naturelles et industrielle afin de mettre au point des mortiers susceptibles de répondre aux besoins socio-économiques et de contribuer à la protection de l'environnement dans notre pays, en particulier, dans les régions où il existe des gisements qui méritent d'être exploités.

Cette étude est axée principalement sur l'effet de la pouzzolane et des fillers calcaires sur le comportement physico-mécanique, thermique et la durabilité des mortiers à base de sables calcaire et dunaire.

Nous pensons avoir atteint quelques objectifs, puisque cette étude fait varier plusieurs paramètres qui ont permis de mettre le point sur l'idée de développer des nouveaux liants.

La recherche bibliographique a montré que l'incorporation des ajouts cimentaires est un domaine exploré et les résultats obtenus sont satisfaisantes.

Nous avons abordé dans la première partie un état de connaissance sur les mortiers calcaires et les mortiers dunaire. Cela nous a permis de mettre en évidence les multitudes d'applications des ajouts minéraux.

Dans la seconde partie, nous avons présenté la caractérisation des matériaux qui devaient être utilisés dans les mortiers confectionnés ainsi que les essais expérimentaux employés.

Dans la troisième partie, nous avons présenté les résultats et les interprétations afin d'apprécier le comportement des différents mortiers.

Les résultats obtenus ont montré que :

- Les mortiers contenant des taux élevés en pouzzolane naturelle présentent une consistance élevée par rapport à ceux contenant des fillers calcaires.

-
- Le retrait du mortier avec 30% de pouzzolane naturelle est plus important que celui qui contient 30% de fillers calcaires. Par contre, les autres combinaisons donnent des valeurs intermédiaires.
 - L'incorporation de la pouzzolane naturelle et les fillers calcaires dans les mortiers améliore la porosité à l'état durci des mortiers et par conséquent les propriétés mécaniques.
 - L'effet des additions sur la résistance à la flexion des mortiers, à différents âges, montre que le mortier avec un taux de 30% fillers calcaires présente la plus faible résistance. Par contre, le mortier avec un taux élevé en pouzzolane présente les meilleures résistances.
 - La valeur maximale de la résistance à la compression est obtenue pour un dosage de 18% de pouzzolane naturelle et un pourcentage de 12% de fillers calcaires conservée à l'aire libre.
 - la résistance à la flexion obtenue pour un mortier dosé à de 30% de pouzzolane naturelle et 0% de fillers calcaires immergé dans la solution de la chaux, est plus grande par rapport aux mortiers immergés dans les autre milieux NaCl et HCl.
 - la perte de masse est très importante pour les mortiers immergés dans la solution HCl par rapport au milieu de référence (milieu de la chaux).
 - Les pores dans la pâte de ciment durcie et les interfaces entre les granulats et la pâte de ciment sont remplis par ces ajouts minéraux.
 - la conductivité thermique diminue avec la diminution de la masse volumique du mortier, quant même on peut déduire l'existence une corrélation entre de la masse volumique et la baisse de la conductivité thermique.
 - L'étude de l'absorption que nous avons présentée révèle l'influence positive de l'addition pouzzolane naturelle. Les mortiers confectionnés avec des taux élevés en fillers calcaires présentent un coefficient d'absorption supérieur à celui des mortiers contenant des teneurs élevées en pouzzolanes.

Enfin, nous espérons que ce travail présente une contribution à la valorisation des matériaux locaux et ouvre d'autres axes de recherches sur l'étude des mortiers

calcaires et dunaires avec additions minérales.

Notre étude a été axée sur l'influence de la pouzzolane naturelle et les fillers calcaires sur les comportements des mortiers. D'autres types d'additions minérales peuvent être également envisagés pour le développement de nouveaux mortiers calcaires.

Perspectives et recommandations :

A la lumière des conclusions rapportées précédemment, nous recommandons quelques perspectives et axes de recherches suivantes :

- L'influence d'autres types d'ajouts minéraux disponibles en Algérie sur la résistance mécanique et la durabilité des mortiers et bétons.
- Etude de la faisabilité économique de l'utilisation des ciments ternaires dans l'industrie du ciment.
- Contribution des ajouts minéraux aux attaques chimiques (acides et sulfuriques) des ciments ternaires.
- Etude des effets des ajouts minéraux sur le comportement rhéologique des mortiers et bétons.
- L'effet des paramètres tels que : cure – rapport E/C – adjuvants - sur la durabilité des mortiers et bétons.
- L'influence des ajouts minéraux sur le comportement rhéologique des mortiers et bétons dans les milieux chimiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALI AICHOUBA,A., “Effets des pouzzolanes naturelles sur les propriétés d’un ciment à base calcaire » thèse de magister, IGCM ORAN - 2005.

Arroudj K, NadjibOudjitM.influence du sable de dune finement broyé sur l’hydratation des ciments. 2^{ème} colloque maghrébin en génie civil, Biskra, Algérie le 10bet 11décembre 2002, pp/119-127

Alimen .H Sable quaternaires du Sahara Nord occidental. Service de la carte Géologique de l’Algérie, Alger, 1957, p. 207

ARNOULD granulats de béton léger, paris 1986

Ayed, K . KAID , N. ABIDELAH, A. KHELAFI, H. KERDA, D."SICZS_2010" Symposium International sur la Construction en Zone Sismique Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), 26 – 27 octobre 2010.

Abdelhakim Hinana et Issam Saiti : étude multiparamétrique d’un béton cellulaire à base de sable de dune, ciment et ajouts minéraux Thèse d’ingénieur 2010.

Bracene .R Frizon de Lamotte D. The origin of intraplate deformation in the Atlas system of western and central Algeria: from Jurassic rifting to Cenozoic–Quaternary inversion. *Tectonophysics*, Vol. 357, pp.207– 226, 2002.

BENI-REMOUR B.C., « Matériaux pouzzolainique: étude physico-chimique et mécanique des mortiers et bétons contenant de la pouzzolane », mémoire de fin d’étude ingéniorat - IGCM ORAN- 1993.

Bertrand, R., Coquillat .G et Giordano.R valorisation de l’emploi des granulats calcaires dans les bétons hydrauliques, Industriel minéral Mines et carrières, vol.75 septembre 93 pp 147 – 150.

Belaidi, A. S. E. Caractérisation, propriétés mécaniques et durabilité des mortiers de réparation ; thèse de magister en génie civil, Université de Blida- encadré par: Dr. Kenai.S 2003.

Bedard. C,M. Bergeron,The effect of steam curing on high-early stength Portland cement

containing carbonate addition; American Society For Testing and Materials, Philadelphia, 1990.

Benyahia. A Séminaire International sur la Gestion et le Traitement des Déchets Spéciaux Pour une Meilleure Santé Publique GEDES' 2013, le samedi 26 octobre 2013.

Boualla .N, Kerrouzi.I et Soufari.Ab « influence de l'ajout pouzzolanique sur les caractéristiques physico-chimiques des ciments au jeune âge. Science Lib Editions Mersenne publié le 18-10-2012

Bellifa Evolution de la porometrie des pates autoplaçantes (thèse magister 2012) Université tlemcen

Baron – JP. Olivier et J.C.Weiss : « Les ciments courants » - « Les bétons, bases et don pour leur formulation » - Edition Eyrolles – 806p-1997.

Benkaddour.M, Kazi Aoual.F et Semcha.A « durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et pouzzolane artificielle » Revue Nature et Technologie Juin 2009.

BOUALLEG .S, BENCHEIKH. M CLASTRES.P, Effets des milieux agressifs sur les propriétés des matrices cimentaires INVACO2 : Séminaire International, INNOVATION & VALORISATION EN GENIE CIVIL & MATERIAUX DE CONSTRUCTIONN° : 4P-079, 23-25 mars 2011, rabat, Maroc.

Benosman A. S., Mouli M., Taïbi H., Belbachir M., Senhadji Y., Bahloul I., Houivet D.,(2009) « L'influence de l'ajout polymère sur la résistance des mortiers vis-a-vis d'une attaque chimique d'acide chlorhydrique », SBEIDCO – 1stInternational Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran (Algeria), pp 383-390.

GHRICI Mohamed, Abdelatif BENAÏSS Effets de la pouzzolane naturelle de beni-saf sur les propriétés d'un ciment a base de calcaire. Colloque CMEDIMAT 2005, 06 et 07 Décembre 200.

GHOMARI.F. Dr., Science des matériaux de construction, Université Aboubaker Belkaid, Faculté des Sciences département génie civil, (2006).

Guillon, E. « Durabilité des matériaux cimentaires –Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles», thèse de doctorat, ENS Cachan/ CNRS/ Université Paris 6, France-2004

Guemmadi, Z.Toumi, B, H.Houari, Comportement du béton au climat chaud, influence de la température sur la résistance du béton au jeune âge; Séminaire national du Génie Civil, SNGC Sidi bel Abbès 15/16 mai 2001.

Ghrici M, Kenai S, Said-Mansour M. Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. CementConcrete Composites 2007;29:542–9.

Gagné, Richard. « Cours de durabilité et Réparation des bétons » - Chapitre 2- Université de Sherbrooke – p32 - Canada 2002.

Itim.A, Ezziane .K, et Kadri.El « étude des déformations de retrait d'un mortier contenant différentes additions minérales » SICZS_2010 université Hassiba Benbouali de Chlef 26-27 octobre 2010. Laboratoire des matériaux et durabilité des constructions université de Constantine.

Kiran Pokkuluri « Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range» - Master thesis – Virginia University – 210p - October 1998.

Kaid, M. Cyr, H. Khelafi, N. Goufi « Caractéristiques mécaniques de bétons contenant une pouzzolane naturelle face aux attaques a l'eau de mer et aux sulfates structurelle » SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Aléria) - October 12-14, 2009.

Kerbouche.A, Mouli.M, Senhadji.Y et Benosmane.S « influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers » SBEIDCO. ENSET Oran octobre 12-14, 2009.

Kaid, N. Cyr, M. Khelafi, H. Goufi, N. « Caractéristiques mécaniques de bétons contenant une pouzzolane naturelle face aux attaques a l'eau de mer et aux sulfates structurelle »

SBEIDCO – 1st International Conférence on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.

Mehta, P.K. « Studies on blended Portland cements containing santorin earth », Cement and Concrete Research, Vol.11, pp. 507-518- 1981.

Lanchon " Cours de laboratoire " Desforges Edition 1978.

Makhloufi, Z. «Etude du béton calcaire du Turonien de Laghouat», Thèse de magister C.U .Laghouat, 2001.

Messaoudene Ibrahim1. Influence des fillers de calcite sur le comportement des mortiers au jeune âge. XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

Mansour, M. S. Abadlia, M.T Bekkour, K. Effet de la pouzzolane sur le comportement rhéologique des pâtes cimentaires Revue de Mécanique Appliquée et Théorique Vol. 2, 3. 255-263 (2010).

Neville. A. Propriétés des bétons, Sherbrooke-Laval. édition Eyrolles , septembre 2000
pénétration des ions chlorurent des mortiers avec pouzzolane et fine calcaire.

Pliskin L. « La fabrication du ciment » - Edition Eyrolles – 217p- Paris1993.

Ramezanian. A. K. « Engineering properties and morphology of pouzzolanic cement concrete», PhD Thesis, University of Leeds, 310 pages-April 1987.

Regourd, M. Hornain, H. « Applications de la microscopie électronique à balayage», Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87- 1975.

Shi and R.L. Day: “Pouzzolanic reaction in the presence of chemical activators”. Part 2- Reaction Products and Mechanism – Cement and Concrete Research –Vol30– pp 607- 617- 2000.

SERSALE, R. “Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes» thème VI- 17ème Congrè International de la chimie des ciments - Volume 1- Partis 1980.

Venuat M – La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.

Y. Older, « Hydration, setting and hardening of Portland cement », dans Lea’s -Chemistry of Cement and Concrete, chap.6, Arnold, 4th éd- 1998.

[NFP18-555] Norme française, « granulats-mesure de masse volumique de sable », AFNOR. Paris 1990.

[NFP 18-598] Norme française, « granulats- équivalent de sable », AFNOR.

[NF P 18-560] Norme française, « granulat –Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR. Paris 1990.

[NFP 18-452] Norme française, «béton –essai d’affaissement »,AFNOR. Paris 1981 .

[NF P 18-433] Norme française, « Essais pour béton durci, partie 5 résistance à la flexion sur l’éprouvette », AFNOR (2001).

[NF P 18-406] Norme française, « Béton :Essais de compression », AFNOR (1981).

[NF P 18-310-5] Norme française, « Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Méthodes d'essai - Partie 5 : détermination de l'absorption capillaire », AFNOR (2006).