

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : Technologie

DEPARTEMENT : Génie Civil



DOMAINE : Science et Technologie

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX

Présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique
Par :

➤ **MANSOUR Achraf**

➤ **SAADAOUI ali**

LE THEME

Comportement des Mortiers à Base de
Déchets d'Aluminium et Méta Kaolin

Devant le jury composé de :

Pr. Rahmouni Zin el abidin	Université de M'sila	Encadreur
Dr. Tabbal Nadia	Université de M'sila	Co-Encadreur
Pr. Bibi Mekki	Université de M'sila	Président
Dr. Maza Mekki	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019 /2020



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

قال رسول الله صلى الله عليه وسلم (من لم يشكر الناس لم يشكرني)

« Louange à ALLAH Qui nous a guidées à ceci. Nous n'aurions pas été guidées, si ALLAH ne nous avait pas guidées »

[Sourate 7. Al Araf verset 43]

Avant tout je tiens à remercier ALLAH tout puissant qui nous a offert la volonté, le courage et la vigueur pour réaliser ce mémoire

Je voudrai tout d'abord adresser toute ma profonde gratitude à mon encadreur de recherche Mr "RAHMOUNI Zin El Abidine " et le Co-encadreur "TABBAL Nadia" qui a bien voulu m'encadrer,

Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à tous ceux qui m'ont apporté leur aide de près ou de loin dans l'élaboration de ce modeste travail.

Mes remerciements vont également à tous mes enseignants qui ont contribué à notre formation, ceux qui nous ont fait aimer la science et le savoir, du primaire à l'université.

Dédicace

MANSOUR Achraf

Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont donnée la vie

Qui m'ont appris mes premiers mots mes chères parents.

A l'âme de mon ami et cher frère Khaled Zid el-Kheir, que Dieu ait pitié de lui, qui nous a quittés très tôt dans ce monde.

Pour le professeur RAHMOUNI Zine El Abidine et le docteur Tebbal Nadia

Je dédie également ce travail à ma femme, ma compagne qui m'a toujours encouragée.

A mes frères houssam et chihab , A ma seul seule sœur

Et surtout à mon petit neveu : Mohamed

A toutes mes amies et ma grande famille

À mon ami Saadaoui ali, qui a participé avec moi à ce travail

SAADAOUI Ali

Je dédie ce modeste travail à ma chère mère,

à mon cher père

Pour le professeur RAHMOUNI Zine El Abidine

Pour Docteur Tebbal Nadia

À mon ami Mansour Achraf, qui a participé avec moi à ce travail

Pour ma famille

Pour mes amis

Pour toutes mes connaissances

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicas	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	
الملخص	
Abstract	
Introduction générale	01
Chapitre I : Etude bibliographique	
I.1 Introduction :	03
I.2 Mortier :	03
I.3 Composition du mortier :	03
I.3.1 Le liant :	03
I.3.2 Le sable :	04
I.3.3 L'eau de gâchage :	04
I.3.4 Les adjuvants :	04
I.4 Les différents types de mortiers :	04
I.4.1 Les mortiers de ciment :	04
I.4.2 Les mortiers de chaux :	05
I.4.3 Les mortiers bâtards :	05
I.4.4 Les mortiers fabriqués sur chantier :	05
I.4.5 Le mortier industriel :	05
I.5 Classification des mortiers :	05
I.6 Caractéristiques principales des mortiers :	06
I.7 La pate de ciment :	06
I.8 Clinker :	07

I.9 Déchet d'aluminium	08
I.10 Le méta kaolin :	09
I.10.1 Définition du méta kaolin	10
I.10.2 Définition de kaolin	10
I.10.3 Méthodes d'obtention du méta kaolin :	11
I.10.4 Traitement thermique du kaolin :	11
I.11 Influence du MK sur la maniabilité du mortier:	12
I.12 Influence du MK sur l'ouvrabilité du béton:	13
I.13 Conclusion :	13
Chapitre II Activation chimique	
II.1 Introduction	15
II.2 L'activation chimique :	18
II.2.1 Principe :	18
II.2.2 Type des activant :	19
II.3 Méthode d'activation du ciment avec ajouts minéraux	20
II.4 Différentes méthodes d'activation	21
II.4.1 Activation mécanique :	21
II.4.2 Activation thermique :	22
II.4.3 Activation chimique :	22
II.5 Comparaison entre les différents types d'activation :	22
II.6 Activation chimique des addition dans une matrice cimentaire	23
II.6.1 Avant propos :	23
II.7 Effet de l'activation chimique sur la cinétique d'hydratation aux jeunes âge	24
II.7.1 Calorimétrie :	24
II.7.2 Temps de prise :	25
II.8 Effet de l'activation chimique sur le développement de résistances a la compression	27
II.9 Hydrates développés et microstructure	31
II.10 L'activation chimique de méta kaolin :	32
II.11 Réaction pouzzolanique du métakaolin dans un milieu cimentaire	32
II.12 Effet de la présence du métakaolindans la matrice cimentaire:	34

II.12.1 La chaleur d'hydratation	34
Chapitre III Caractéristique des matériaux utilisés	
III.1 Introduction:	36
III.2 Matériaux utiliser :	36
III.2.1 Ciment :	36
III.2.2 Sable:	37
III.2.3 Méta kaolin	37
III.2.4 Déchets d'aluminium	37
III.2.5 L'eau de gâchage	38
III.3 Les caractéristique des matériaux	39
III.3.1 Analyse granulométrique	39
III.3.1.1 Objectif	39
III.3.1.2 Principe :	39
III.3.1.3 Mode opératoire :	39
III.3.2 La masse volumique :	43
III.3.2.1 Objectif :	43
III.3.2.2 Principe	43
III.3.2.3 La masse volumique absolue :	43
III.3.2.4 La masse volumique apparent :	47
III.3.3 La porosité	49
III.3.4 Equivalent de sable:	50
III.3.4.1 But de l'essai :	50
III.3.4.2 Principe de l'essai :	50
III.3.4.3 Equivalent de sable visuel (E.S.V)	51
III.3.4.4 Equivalent de sable piston (E.S.P) :	51
III.4 Comportement mécanique du mortier :	52
III.4.1 La résistance à la compression :	53
III.4.2 La résistance à la flexion :	55
III.5 Conclusion	56
Conclusion générale :	58
Références bibliographiques:	60

LISTE DES FIGURES

Chapitre I Etude bibliographique

Figure I. 1 Le clinker	07
Figure I. 2 Poudre de méta kaolin	10
Figure I. 3 Roche de kaolin	10
Figure I. 4 Courbe de transformation du kaolin en méta kaolin	12
Figure I. 5 Graphe de l'influence de la teneur en MK sur la demande en super plastifiant des mortiers	12
Figure I. 6 Graphe de l'influence de la teneur en MK sur la demande en super plastifiant pour les bétons	13

Chapitre II Activation chimique

Figure II. 1 Courbe de l'effet du pH sur la dissolution d'une pouzzolane [Shi et al., 2000]	19
Figure II. 2 Les différentes méthode d'activation selon Shin [Shin, 2001]	21
Figure II. 3 Courbe Flux de chaleur relié à l'activation chimique avec différentes concentrations en NaOH du métakaolin avec la chaux [Alonso et Palomo, 2001]	24
Figure II. 4 Les courbes de chaleur d'hydratation d'une cendre volante activée dans une matrice cimentaire [Pacewska et al., 2008].	25
Figure II. 5 Courbe de l'effet du dosage de NaOH sur le temps de prise d'un mélange contenant 50% ciment et 50% laitier [Jiang 1997 cité par Shi et al., 2006].	27
Figure II. 6 . Courbe de l'effet d'activants sur la résistance de métakaolin avec chaux [De Silva et Glasser, 1992	28
Figure II. 7 Courbe de la résistances à la compression sur mortier (ciment au laitier/sable = 0,33 – eau/ciment=0,48) en fonction de la nature de l'activant [Marciano et Battagin,. 1997	30
Figure II. 8 Courbe de Développement de la résistance à la compression de mortiers (E/C=0,5) incorporant ciment, cendre volante et activant [Qian et al., 2001]	30

Chapitre III Caractéristique des matériaux utilisés

Figure III. 1 Ciment de CRS	36
Figure III. 2 Ciment de clinker	36
Figure III. 3 Sable de boussaada	37
Figure III. 4 Poudre de méta kaolin	37
Figure III. 5 Valorisation des déchets d'aluminium	38
Figure III. 6 L'eau de robinet de la région de M'sila	38
Figure III. 7 Les tamis normalisé	40
Figure III. 8 La courbe l'analyse granulométrique de sable du dune de bousaada	41
Figure III. 9 La courbe d'analyse granulométrique d'aluminium	42
Figure III. 10 Balance et des éprouvettes graduée pour l'essai de la masse volumique absolue	43
Figure III. 11 Schéma d'essai de la masse volumique d'aluminium.	44
Figure III. 12 Schéma d'essai de la masse volumique de sable	44
Figure III. 13 Schéma pour déterminer la masse volumique apparent	46
Figure III. 14 Courbe de la porosité de mixte sable et aluminium	48
Figure III. 15 Appareillage de l'essai de l'équivalent de sable	50
Figure III. 16 L'essai d'équivalent de sable	50
Figure III.17: Des éprouvettes 4x4x16 de pate de ciment et mortier ciment+aluminium	51
Figure III.18: La Courbe de la résistance à la compression des déférents mortiers et pates	53
Figure III.19: La Courbe de la résistance à la flexion des déférents mortiers et pates	54

LISTE DES TABLEAU

Chapitre I Etude bibliographique

Tableau I. 1 Désignation des alliages d'aluminium cooxyés	08
Tableau I. 2 Désignation des alliages d'aluminium de fonderie	09

Chapitre II Activation chimique

Tableau II. 1 Temps de prise d'un mélange (métakaolin+chaux) avec différents activants [Jiang. 1997, cité par Shi et al., 2006].	26
Tableau II. 2 Effet d'activants sur la résistance de métakaolin avec chaux [De Silva et Glasser,1992]	28
Tableau II. 3 Résumé des hydrates identifiés par DRX et ATD durant l'hydratation du système MK / chaux avec différents activants (eau/solide =0,8) [De Silva et Glasser, 1992, rapporté par [Shi et al.,2006]	31

Chapitre III Caractéristique des matériaux utilisés

Tableau III. 1 Classement de sable	40
Tableau III. 2 Les résultats de l'analyse granulométrique	41
Tableau III. 3 Les résultats de l'analyse granulométrique d'aluminium	42
Tableau III. 4 Les résultats de la masse volumique absolue de sable et l'aluminium et le mixte SD+AL	44
Tableau III. 5 Les résultats de la masse volumique absolue de sable et l'aluminium et le mixte SD+AL	46
Tableau III. 6 Les résultats obtenir de l'essai de la porosité de sable et l'aluminium et le mixte SD+AL	48
Tableau III. 7 Les résultats d'équivalent de sable de boussaada	51
Tableau III. 8: La composition des déférents mortiers et pates	51
Tableau III. 9: La résistance à la compression des déférents mortiers et pates	52
Tableau III.10: La résistance à la flexion des déférents mortiers et pates	53

RÉSUMÉ

Cette étude a pour objectif la valorisation de la poudre de kaolin calciné et les déchets d'aluminium comme ajout dans les matériaux de construction à matrice cimentaire.

Le but principal de cette étude est de formuler et d'analyser la performance des mortiers à base de déchets d'aluminium et méta kaolin.

Dans ce sens, nous avons étudié une série d'essais, en variant le taux d'ajout d'aluminium et le méta kaolin. Une comparaison des résultats avec un mortier témoin sans ajout est établie.

Les résultats observés ont montré que le taux de substitutions du ciment par du méta kaolin et les déchets d'aluminium augmente la résistance à la compression et à la flexion au jeune âge.

Mots clés : Valorisation, Déchet d'aluminium, Mortier, Résistance mécanique, Méta kaolin, activation chimique.

ملخص:

الهدف من هذه الدراسة هو استعادة مسحوق الكاولين المكلس ونفايات الألمنيوم كمادة مضافة في مواد البناء القائمة على الأسمنت.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو صياغة وتحليل أداء الملاط المصنوعة من خرده الألمونيوم والميتاكاولين.

بهذا المعنى، قمنا بدراسة سلسلة من الاختبارات، متغيرة معدل إضافة الألمنيوم والميتاكاولين. تم إجراء مقارنة بين النتائج مع تعليق تحكم بدون إضافة.

أظهرت النتائج أن معدل استبدال الأسمنت بالميتاكاولين وخرده الألمنيوم يزيد من قوة الانضغاط والانحناء في سن مبكرة.

الكلمات المفتاحية: تثمين. بقايا الألمنيوم. ملاط. مقاومة ميكانيكية. ميتاكاولين. تفاعل كيميائي.

ABSTRACT

The objective of this study is to recover calcined kaolin powder and aluminum waste as an additive in cement-based building materials.

The main objective of this study is to formulate and analyze the performance of sludge made from scrap aluminum and methacoline.

In this sense, we studied a series of tests, varying the rate of addition of aluminum and meta-kaolin. A comparison of the results was made with a control suspension without addition.

The results observed have shown that the rate of substitution of cement by methacoline and aluminum scrap increases the compressive and bending strength at an early age.

Key words: Valorization, Aluminum waste, Mortar, Mechanical resistance, Methacoline, chemical activation.



Introduction générale



Introduction générale : _____

Introduction générale :

Les additions cimentaires font actuellement partie des développements les plus récente dans la production du béton, car l'utilisation des additions apporte une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton .D'autre part, leur utilisation a pour objectif de réduire la consommation de ciment, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Le méta kaolin est un substitut efficace capable de réduire le contenu de ciment pour l'obtention de bétons équivalents, elle est un produit connu depuis plusieurs années et fabriqué un peu partout à travers le monde : France, Canada, Etats-Unis, Royaume-Uni, Brésil, Chine, etc. Il résulte de la calcination de l'argile, la kaolinite, à des températures comprises entre 600°C et 850°C, suivant la nature du matériau initial.

Les déchets industriels ont trouvé leurs places comme additifs aux matériaux cimentières dans la fabrication des bétons et des mortiers de ciment.

Le but principal de cette étude est de formuler et d'analyser la performance des mortiers à base de déchets d'aluminium et méta kaolin.

Le présent travail est subdivisé en trois (3) chapitres, répartis comme suit :

- **Le chapitre I :** Une étude bibliographique retrace les propriétés de mortiers, les déchets d'aluminium et méta kaolin et la pâte de ciment et clinker, .
- **Le chapitre II :** Activation chimique en générale et l'activation chimique de méta kaolin.
- **Le chapitre III :** Dans ce chapitre on présente les caractéristiques des matériaux utilisés avec les essais de chaque matériaux, et la méthodologie suivie pour réaliser ce travail.

Enfin, une conclusion générale qui clôture ce mémoire en synthétisant les principaux résultats obtenus dans notre travail.



Chapitre I :
Etude bibliographique



I.1. Introduction

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Les compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant, adjuvants et ajouts, dosage en eau.

Cette partie bibliographique retrace les propriétés de mortiers, les déchets d'aluminium et méta kaolin et la pâte de ciment et clinker.

I.2.Mortier

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, se diffèrent selon les réalisations et d'adjuvant. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure.[9]

I.3. Composition du mortier

Le mortier est un des matériaux de construction, qui contient du ciment, de l'eau, du sable, des adjuvants et éventuellement des additions. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure [1].

Les mortiers sont constitués par des mélanges de :

- Liant (ciment ou chaux).
- Eau.
- Sable.
- Adjuvants.

I.3.1. Le liant.

On utilise généralement des liants hydrauliques qui peuvent être le ciment, cette dernière est une matière pulvérulente à base de silicate et d'aluminate, et de la chaux obtenue par la cuisson.1

Généralement, on peut utiliser [1] :

- Les ciments normalisés (gris ou blanc) .
- Les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt,...) .

- Les liants à maçonner .
- Les chaux hydrauliques naturelles .
- Les chaux éteintes.

I.3.2. Le sable

Les sables naturels et artificiels sont employés dans le domaine de la construction pour la fabrication de mortiers et de béton. Ils vont augmenter l'ouvrabilité du mortier ou du béton en le rendant plus dense.

Toutefois, si les sables ronds sont plus malléables, les sables angulaires ont la particularité de rendre le béton plus résistant.

Les sables utilisés pour la fabrication du béton doivent répondre à la norme NFEN 12620. [2]

I.3.3. L'eau de gâchage

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment et facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau de gâchage doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis).

Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NA-442.

Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale.[1]

I.3.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons et mortiers. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment).

Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants, les super plastifiants (haut réducteurs d'eau), les entraîneurs d'air, les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs) et les hydrofuges.[5]

I.4. Les différents types de mortiers

I.4.1. Les mortiers de ciment

Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1/3 et le rapport

Chapitre I: ————— Etude bibliographique

de l'eau sur ciment est environ 1/2. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables. En revanche, il est davantage sujet au retrait.[3]

I.4.2 Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment. Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment.[6]

I.4.3 Les mortiers bâtards

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux. Généralement, On utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée. Les chaux apportent leur plasticité, les ciments apportent la résistance mécanique et un durcissement plus rapide.[3]

I.4.4 Les mortiers fabriqués sur chantier

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne granulométrie.[3]

I.4.5 Le mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.[7]

I.5 Classification des mortiers

La classification des mortiers est comme suite[8] :

Selon leur domaine d'utilisation : Généralement les mortiers varient selon leur domaine d'application, et ce dernier est très vaste et leurs domaines permettent de citer les catégories suivantes :

- Mortier de pose.
- Mortier de joints.
- Mortier pour les crépis.
- Mortier pour le sol.
- Pierres artificielles.

- Support pour les peintures murales.
- Mortier d'injection.
- Mortier de réparation pour pierres.

Selon la nature du liant : On peut classer les mortiers selon la nature du liant en :

- Mortier de ciment portland.
- Mortier de chaux.
- Mortiers bâtards.
- Mortier à base de ciment de maçonnerie.

I.6 Caractéristiques principales des mortiers

Les caractéristiques principales des mortiers sont [5]:

- L'ouvrabilité ;
- La prise ;
- Les résistances mécaniques ;
- Les retraites et gonflements, etc.

I.7 La pâte de ciment

La pâte de ciment est composée principalement de ciment (C) et d'eau (E). Soit E et C les concentrations (en masse) d'eau et de ciment pour un volume unité de pâte. Dès que l'on mélange le ciment avec l'eau, l'hydratation va commencer et les propriétés de la pâte sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée, la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais après un certain temps les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange se raidit, on dit qu'il fait prise, et le matériau commence alors à s'apparenter plus à un solide qu'à un fluide.

La pâte de ciment joue un rôle très important pour solidariser les squelettes granulaires du béton. Elle est un des facteurs influençant la qualité, le prix et les propriétés mécaniques du béton. En général, la pâte pure de ciment est pratiquement peu utilisée et même pour déterminer la classe de la résistance des ciments, on mesure à travers des mortiers. Bien souvent, un ou plusieurs adjuvants sont également associés au ciment pour influencer sur les qualités de la pâte. En outre, les divers ajouts jouent un grand rôle pour modifier les propriétés selon leurs domaines d'emploi. Ce type de pâtes s'appelle aussi les coulis.[12]

I.8. Clinker

Le clinker est un constituant du ciment, qui résulte de la cuisson d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire (qui apporte le calcium) et de 20 % d'aluminosilicates (notamment des argiles qui apportent le silicium, l'aluminium et le fer). La « farine » ou le « cru » est formée du mélange de poudre de calcaire et d'argile. Cette cuisson, la **clinkérisation**, se fait à une température d'environ 1 450 °C qui explique la forte consommation énergétique de ce processus.[10]



Figure I.1: Le clinker[10]

La composition des clinkers :gris est représentée par quatre grandes phases cristallines caractéristiques de la chimie du ciment. Elles sont en moyenne les suivantes :

- Ca_3SiO_5 : silicate tricalcique ($\text{SiO}_2 - 3 \text{CaO}$) : 50 à 65 % (alite) ;
- Ca_2SiO_4 : silicate bicalcique ($\text{SiO}_2 - 2 \text{CaO}$) : 15 à 20 % (bélite) ;
- $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$: aluminat tricalcique ($\text{Al}_2\text{O}_3 - 3 \text{CaO}$) : 5 à 15 % (aluminat) ;
- $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$: Ferro-aluminat tétra calcique ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - 4 \text{CaO}$) : 5 à 10 % (ferrite).

Ces quatre phases cristallines sont souvent repérées C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF en notation cimentière ; « C » représentant ici la molécule de chaux (et non carbone dans ce cas), soit CaO combiné à : S, A et F, les trois autres oxydes respectivement de silicium (SiO_2), alumine (Al_2O_3) et de fer (Fe_2O_3).

La composition minéralogique du clinker obtenu après cuisson des matières crues est fonction de la composition du mélange, de la température, du combustible utilisé, du temps de cuisson et des conditions de refroidissement (trempe à l'air).10

I.9. Déchets d'aluminium:

Comme L'aluminium et ses alliages occupent une place considérable non seulement dans la construction de fenêtres, de vitrines, de portes, de revêtements de façades, c'est-à-dire pour des objets à caractère décoratif. On les emploie également de plus en plus pour des éléments de coffrage, des constructions de toits, des canaux pour câbles, etc., donc pour un usage fonctionnel.[11].

Les alliages d'aluminium sont subdivisés en groupes sur base de leurs propriétés telles que traitement thermique et mécanique et éléments d'alliage principaux ; il existe deux grandes familles d'alliage d'aluminium[11] :

- **Alliage d'aluminiums corroyés** :sont des alliages à base d'aluminium destinés pour la majorité à être transformés par des techniques de forge (laminage, filage, matriçage, forge, etc.).- **Alliage d'aluminium de fonderie** :Sont des alliages dont le constituant principal est l'aluminium, destinés à être transformés par des techniques de fonderie.

Ils sont souvent nommés « alliages légers » du fait de leur masse volumique nettement inférieure à celles d'autres métaux utilisés dans l'industrie.

Tableau I. 1 : Désignation des alliages d'aluminium corroyés[11]

Séries d'alliages	Eléments d'alliages principaux
1XXX	99 % d'aluminium minimum
2XXX	Cuivre
3XXX	Manganèse
4XXX	Silicium
5XXX	Magnésium
6XXX	Magnésium et silicium
7XXX	Zinc
8XXX	Autres éléments

Chapitre I: ————— Etude bibliographique

Tableau I. 2: Désignation des alliages d'aluminium de fonderie[11]

Séries d'alliages	Eléments d'alliages principaux
1XX.X	99 % d'aluminium minimum
2XX.X	Cuivre
3XX.X	Silicium + cuivre et /Manganèse
4XX.X	Silicium
5XX.X	Magnésium
6XX.X	N'existe pas
7XX.X	Zinc
8XX.X	étain
9XX.X	Autres éléments

Le déchet d'aluminium est très intéressant du point de vue de son recyclage et de sa valorisation. Les différentes origines des déchets d'aluminium sont [11] :

a-Déchets neufs facile: chutes de fabrication, composition bien connue facilement recyclable.

b-Déchets neufs complexe: chutes de production et de transformation avec traitements de préparation et d'affinage plus complexes.

c-Déchets usagés : objets divers (véhicules automobiles, déchets de démolitions, emballages de produits, boîtes-boissons. Il existe actuellement plus de 400 alliages d'aluminium (alliages corroyés) et plus de 200 alliages de fonderie.

I-10 Le Méta kaolin:

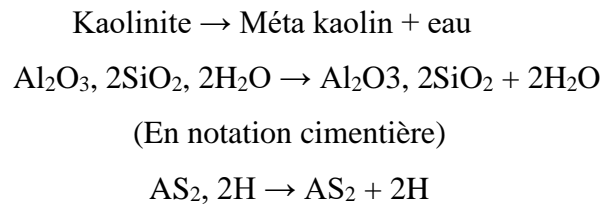
Le méta kaolin est une pouzzolane de synthèse, issue du traitement de la kaolinite, argile assez courante sur la surface du globe.

e méta kaolin appartient à la famille des ultrafines, particules minérales de dimension inférieure 10µm, utilisé dans les bétons pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité. Le méta kaolin (MK) est obtenu par la calcination de la kaolinite à une température entre 500°C et 800°C.

Industriellement il existe essentiellement deux modes de calcination, une calcination lente (cinq heures environ dans des unités de production) et une calcination flash (très rapide en comparaison avec la calcination lente).[14]

Chapitre I: ————— Etude bibliographique

À une température élevée, la kaolinite perd son eau par des hydroxylation selon l'équation suivante [16].[17].[18] :



I.10.1 Définition du méta kaolin

Le méta kaolin est considéré comme un matériau pouzzolanique , c'est-à-dire qu'il réagit en présence de la chaux pour former des silicates de calcium hydratés et des silico-aluminates de calcium hydratés.[18]



Figure I.2 : Poudre de méta kaolin.[18]

I.10.2 Définition de kaolin:

Le terme kaolin a été utilisé, pour longtemps, pour désigner l'argile chinoise extraite du village « Kauling ». Actuellement, le terme kaolin désigne les minéraux ayant une composition en kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) supérieure à 50%.[19] Ils peuvent être différents selon les conditions géologiques de leur formation, leurs compositions minéralogiques moyennes et leurs propriétés physiques et chimiques.[20]



Figure I.3 : Roche de kaolin[13]

I.10.3 Méthodes d'obtention du méta kaolin :

➤La méthode traditionnelle :

Calcination en lit fixe ou le plus souvent en four rotatif. L'argile est introduite sous forme de boulets et calcinée pendant 5 heures à 750 °C.

Les boulets de kaolin vont se transformer en boulets de méta kaolin par perte de l'eau structurelle. Ces boulets sont ensuite broyés. Cette méthode entraîne beaucoup d'usure et de consommation d'énergie.[15]

➤La méthode Flash :

L'argile kaolinique est broyée et les fines particules sont calcinées en quelques secondes. Cette méthode, associée au recyclage de l'énergie de calcination, utilise environ 40% de l'énergie consommée dans la méthode traditionnelle.[15]

I.10.4 Traitement thermique du kaolin :

Les méta kaolins sont obtenus par calcination d'argile kaolinique (silicate d'alumine hydraté) à des températures comprises entre 600 et 900°C. La température de calcination dépend du degré de pureté en kaolin (autrement dénommé kaolinite) de l'argile kaolinique utilisée.[21][22]

La calcination entraîne la des hydroxylation et une destruction de la structure cristalline initiale de la kaolinite (kaolinite calcinée).La durée de traitement thermique utilisée est de cinq heures. Durant cette cuisson, il y a formation de méta kaolin (Figure I.4) et dégagement de molécules d'eau sous forme gazeuse selon la réaction suivante[21][22]:

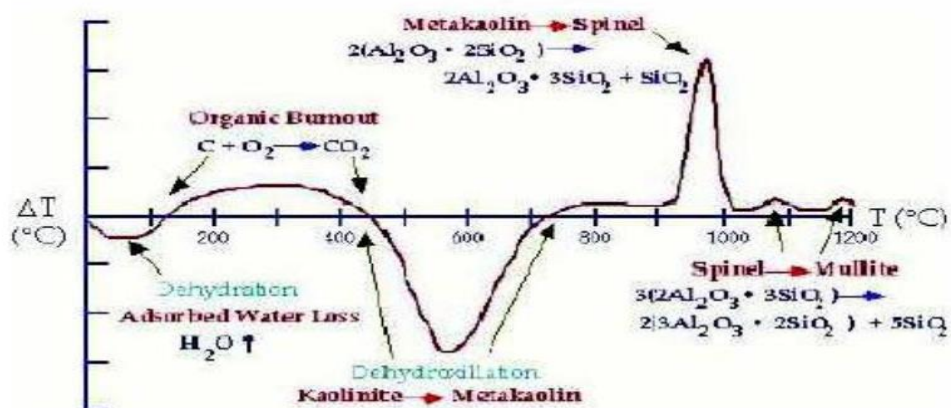


Figure I.4 : Courbe de transformation du kaolin en méta kaolin[21][22].

I.11 Influence du MK sur la maniabilité du mortier:

Les différentes compositions de mortiers à base de MK, testées. La figure montre l'influence du MK sur la demande en super plastifiant pour un étalement constant et pour différents pourcentages de MK. On remarque que le dosage en super plastifiant augmente avec l'augmentation de la teneur en MK. Ceci est dû probablement à la plus grande finesse du liant, car le MK utilisé dans cette étude est plus fin que le ciment.[23][24]

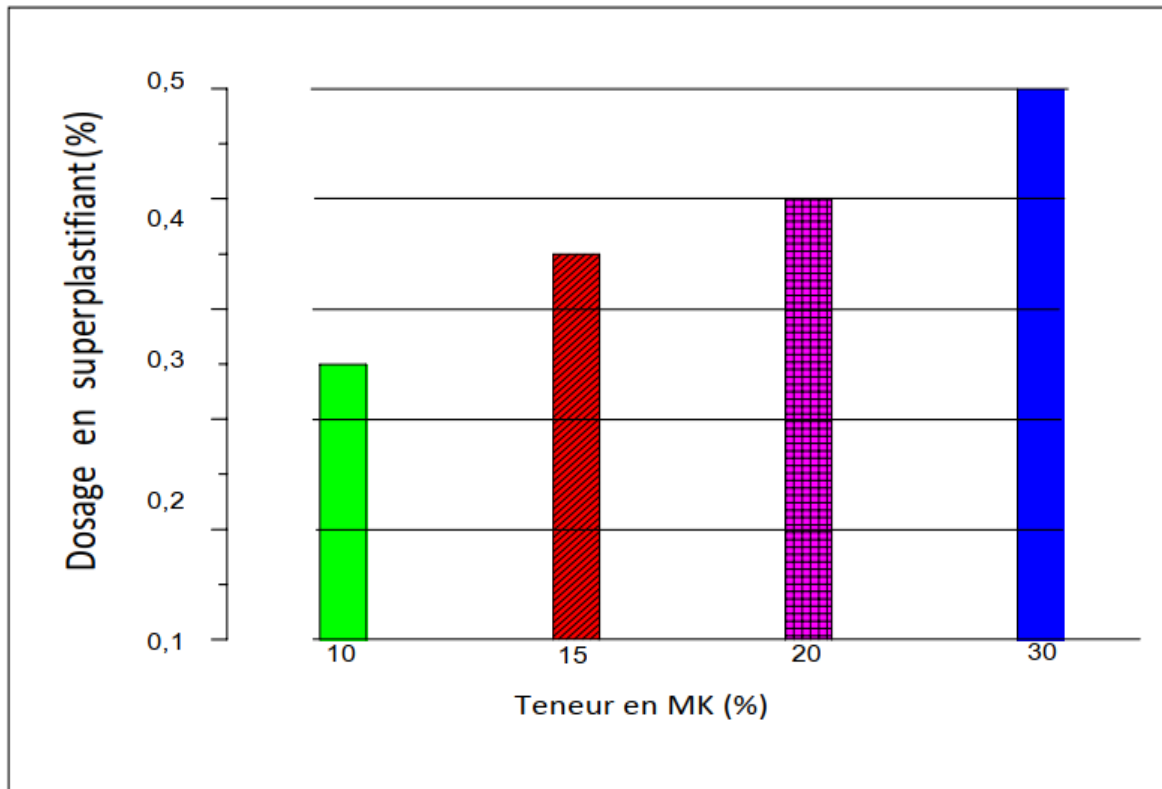


Figure I.5 : Graphe de l'influence de la teneur en MK sur la demande en super plastifiant des mortiers [23][24]

I.12 Influence du MK sur l'ouvrabilité du béton:

Les différentes compositions de bétons à base de MK testées dans le travail. La figure 15 montre que le dosage en super plastifiant augmente avec l'augmentation de la teneur en MK, phénomène similaire à celui observé pour les mortiers.

Cette plus importante consommation de SP s'explique par la plus grande proportion d'éléments fins présents dans le liant (méta kaolin) et dans le sable de béton (le sable utilisé dans le mortier est normalisé dépourvu de particules fines).[23][24]

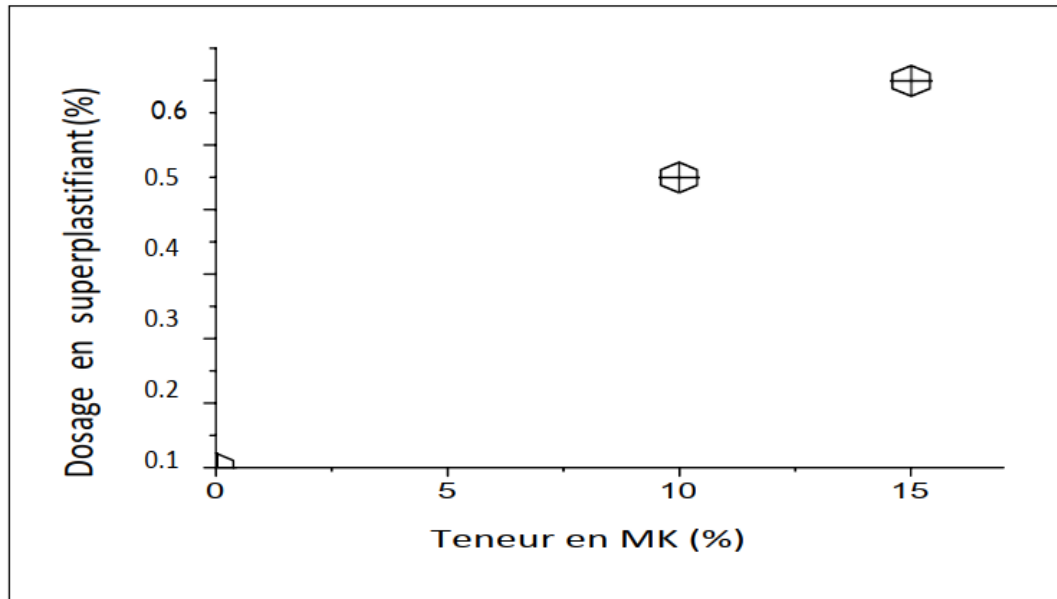


Figure I.6 : Graphe de l'influence de la teneur en MK sur la demande en super plastifiant pour les bétons [23][24]

I.13 Conclusion :

Ce chapitre présente une étude bibliographique sur les mortiers, les déchets d'aluminiums, méta kaolin, le clinker.



Chapitre II :
Activation chimique



II.1 Introduction :

Le tri et le traitement des déchets ont longtemps été pris en charge par les populations elles-mêmes. Les résidus d'artisanats étaient récupérés (métaux refondus, vieux chiffons et puis papiers pour la pâte à papier, etc.), le reste n'était qu'organique (c'est-à-dire composé de matière naturelle et rapidement biodégradable) et venait en campagne compléter les engrais ou la nourriture des animaux, tandis qu'en ville les caniveaux ou autres terrains vagues récoltaient des détritiques peu polluants.

La première révolution industrielle a transformé les villes qui sont devenues des sources énormes de matières premières, ce qui a entraîné l'apparition de deux métiers spécifiques : le vidangeur qui récupère l'urine et les excréments dans les fosses d'aisance et les revend comme engrais aux paysans, ainsi que les boues de rues qui permettent l'essor du maraîchage ; le chiffonnier qui, par le recyclage des déchets, participe à l'essor de l'industrialisation[13].

Alors que ces deux métiers disparaissent peu à peu au XX^e siècle (l'industrie utilisant de plus en plus les matières plastiques et l'agriculture les engrais issus de la carbochimie), le système des décharges se généralise. Il consistait à stocker dans un lieu, généralement loin des habitations, des déchets plus importants et non biodégradables à court terme (vieux mobilier, métaux, gravats, etc.). Dans l'antiquité, des décharges, ou dépotoirs, existaient déjà (ce qui permet aujourd'hui aux archéologues de retrouver poteries, bijoux, etc.). Mais le système des décharges est devenu au fil des siècles le moyen de se débarrasser de plus en plus des déchets, sans préoccupation pour l'environnement (odeurs, émissions de gaz comme le méthane et l'hydrogène sulfuré, risque d'incendie, pollution des terres). La France a connu une décharge dans quasiment chaque commune, recouverte par la suite et souvent volontairement oubliée ; l'une des dernières grandes décharges est celle de Marseille [13].

À partir des années 1960, l'incinération s'est développée en raison d'une offre nouvelle de matériel pouvant brûler des quantités importantes de déchets, et en réponse à la difficulté croissante de trouver des sites de décharge. L'incinération a de nombreuses conséquences environnementales qui, longtemps, n'ont pas été prises en compte, et elle génère comme les décharges des oppositions fréquentes³. L'idée que les déchets sont une ressource à exploiter, plus que des rebuts dont il faut se débarrasser se développe (économie circulaire, lutte contre le gaspillage). Il est possible par exemple d'en extraire des matières premières (cas des mâchefers, résidus de l'incinération des ordures ménagères réutilisés en

Chapitre I: ————— Etude bibliographique

technique routière) et les recycler, de composter ou méthaniser certains déchets, ou d'en brûler pour produire de l'électricité et alimenter un réseau de chaleur. Ainsi, depuis quelques années, des alternatives aux décharges et à l'incinération voient le jour, mais sont encore peu mises en place : tri mécano-biologique, pyrolyse, gazéification, etc. Dans le même temps, associations et pouvoirs publics tentent de réduire à la source la production de déchets qui est en augmentation croissante depuis l'après-guerre. La réduction des déchets est considérée par beaucoup comme l'un des meilleurs traitements existants [13].

Activité à risque et réglementée

La gestion des déchets (collecte + traitement) est une activité à risques où les salariés sont potentiellement exposés à des risques chimiques, biologiques, physiques, organisationnels et routiers. Par exemple, certains salariés sont exposés à des matières à risques ou à des bio aérosols pouvant être allergènes ou contenir des pathogènes ou particules indésirables. Les personnes exposées aux fumées d'incinération et il existe des maladies professionnelles « dues au tri des déchets ».

Ainsi en France selon l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS), le taux de fréquence d'accident avec arrêt de travail est de 44 (avec un taux de gravité de 1,88) pour l'ensemble du secteur (collecte + traitement) alors qu'il n'est que de 25 (avec un taux de gravité de 1,06) pour l'ensemble des activités affiliées au RGSS (Régime général de la sécurité sociale).

En raison de ces risques, les installations de traitement de déchets sont généralement classées, encadrées par une réglementation spécifique et contrôlées par l'État (ex. : régime des ICPE (installation classée pour la protection de l'environnement, qui désigne toute installation industrielle ou agricole susceptible de créer des risques ou provoquer des pollutions ou nuisances pour la sécurité et la santé des riverains) en France impliquant autorisation, enregistrement ou déclaration).

Principes de gestion des déchets

Plusieurs principes guident la gestion des déchets, dont l'usage varie selon les pays ou les régions.

La hiérarchie des stratégies et des usages

Règle des trois R :

- Réduire
- Réutiliser
- Recycler

Cette hiérarchie des stratégies a évolué depuis les années 1990 mais le concept sous-jacent demeure la pierre angulaire de la plupart des stratégies de gestion des déchets : réutiliser au maximum en générant le minimum de rebuts.

En 2010, Tim Laseter, Anton Ovchinnikov et Gal Raz, professeurs à la Darden School of Business de l'université de Virginie, aux États-Unis, ont proposé d'ajouter un « quatrième R » : « Re-penser » dans leur étude publiée dans la revue *Strategy+business*, « Reduce, Reuse, Recycle... or Rethink ». Ils insistent sur les faiblesses du système actuel et proposent qu'un regard totalement différent soit porté sur les déchets afin de progresser dans la pensée d'un système parfaitement efficace.

Certaines solutions « repensées » sont contre-intuitives ; ainsi dans l'industrie textile pour réduire la quantité de papier gaspillée pour les patrons, il a été conseillé de les découper dans de plus grandes feuilles pour valoriser les chutes en y découpant les petites pièces du patron. Ainsi, il y a une réduction du résidu global. Ce type de solution vaut pour d'autres secteurs.

La réduction à la source nécessite des efforts pour réduire les déchets toxiques et d'autres résidus en modifiant les processus de fabrication, les apports de matières premières et la composition des produits (éco conception, éco design). Parfois le principe de « prévention de la pollution » indique en fait la mise en œuvre d'une politique de réduction à la source. En complément, l'incitation à la réutilisation et au recyclage diminuent le flux de déchets ultimes. Dans le monde, diverses villes et collectivités ont mis en place des taxes dont le montant est fonction des quantités d'ordures déposées (Paye ce que tu jettes : *Pay As You Throw* - PAYT, aux États-Unis) qui se sont révélées efficaces pour réduire le volume des déchets urbains.

L'efficacité des politiques de réduction à la source se mesure à l'importance de la réduction de la production de déchets. Une autre approche, plus controversée, est de

Chapitre I: ————— Etude bibliographique

considérer la réduction de l'utilisation de substances toxiques. On s'intéresse ici à réduire l'utilisation de substances toxiques, alors même que la tendance est plutôt à la hausse. Cette approche, dans laquelle c'est le principe de précaution qui est mis en avant, rencontre une vive opposition des industries chimiques. Elles accusent cette démarche de stigmatiser les produits chimiques. Certains États américains, comme le Massachusetts, le New Jersey et l'Oregon ont mis en place des politiques de réduction des déchets toxiques.

II.2 L'activation chimique :

L'activation chimique consiste à incorporer des produits spécifiques dans le mélange cimentaire à l'état frais afin de favoriser la dissolution de l'addition minérale, généralement le liant hydraulique (C.P.J. ciment portland composé) est activé par différentes solutions alcalines, telles que. L'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'hydroxyde de potassium (KOH) à différents pourcentages en faisant varier la molarité de la solution basique .

Les activant chimiques (accélérateurs de prise et de durcissement) utilisés sont des produits solubles dans l'eau. Ils agissent chimiquement en modifiant les vitesses de dissolution des constituants anhydres et en accélérant l'hydratation des grains de ciment. La prise est alors plus rapide et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important. Ce sont surtout :

- * Des alcalis (soude. NaOH, potasse. KOH) pour la prise ;
- * Des chlorures de calcium (CaCl_2) pour le durcissement.

Ils sont utilisés à raison de 1 à 2% du poids de ciment. En général, les accélérateurs sont employés pour les bétonnages par temps froid ou lorsqu'un durcissement rapide est souhaité. La prise du ciment est généralement lente, l'ajout des activant chimiques et le broyage plus poussé du ciment présentent des solutions à ce phénomène.

II.2.1 Principe :

La littérature fait état de travaux traitant de l'activation chimique des additions minérales (laitiers de haut fourneau, cendres volantes notamment). Elles indiquent que l'augmentation de la réactivité de ces matériaux passe par 3 étapes [25], [26] :

1. La dissolution des espèces solubles dans la phase alcaline,

Chapitre I: ————— Etude bibliographique

2. Une réorganisation et une diffusion des ions dissous avec la formation de petites structures coagulées,

3. La croissance et la condensation de ces structures pour former les produits hydratés.

L'incorporation d'alcalins contribue à augmenter le pH de la solution interstitielle. D'après l'étape 1, il est donc compréhensible qu'une activation alcaline puisse accentuer la dissolution des phases siliceuses dans les laitiers (système Si-Ca), siliceuses et alumineuses dans les cendres volantes et les méta kaolins (système Si-Al) puisque cette dissolution est largement accentuée avec l'augmentation du pH au-dessus de 12,5 [27] (Figure II- 1).

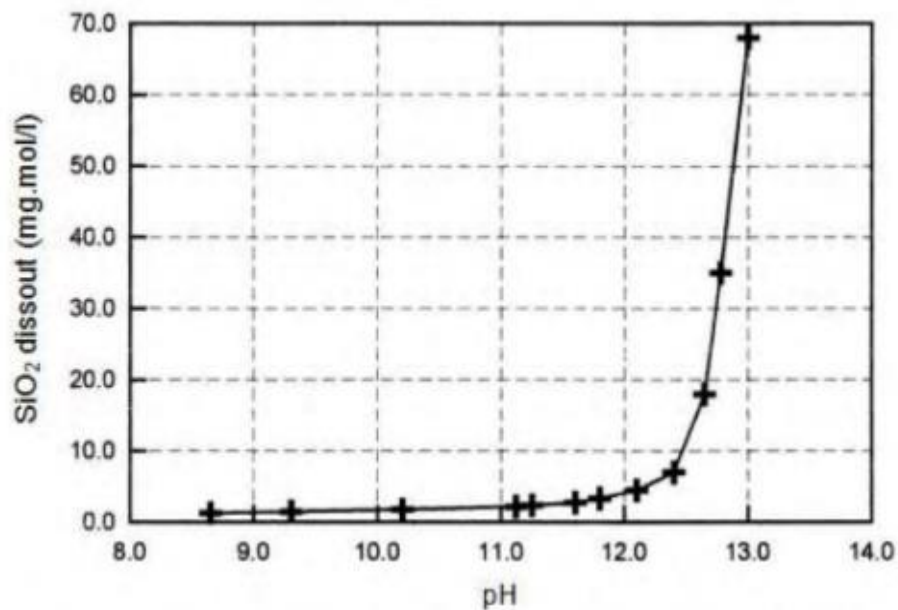


Figure II.1: Courbe de l'effet du pH sur la dissolution d'une pouzzolane [28]

Des études ont montré l'efficacité d'activateurs alcalins sur l'accentuation de la pouzzolanité des laitiers et des cendres et l'amélioration de la résistance au jeune âge de la matrice cimentaire résultante [29], [30].

II.2.2 Type des activant :

L'activation alcaline a été abondamment étudiée. Les activant alcalins se déclinent principalement en six groupes, où M est un alcalin [30]:

1. Les alcalis caustiques MOH.
2. Les sels d'acides faibles non silicatés, M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF, etc
3. Les silicates, $M_2O.NSiO_2$.

4. Les aluminates, $M_2O \cdot nAl_2O_3$.

5. Les aluminosilicates, $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6) SiO_2$.

6. Les sels d'acides forts non silicatés M_2SO_4 .

D'après [28], les propriétés des activants qui contiennent du sodium et du potassium sont très similaires, mais contrairement aux produits à base de potassium, les activant NaOH, Na_2CO_3 , $Na_2O \cdot nSiO_2$ et Na_2SO_4 ,... sont les plus largement disponibles et commercialisés.

Les activant ne sont pas de simples catalyseurs permettant le déroulement des réactions mais également des réactifs entrant dans les réactions de la formation des hydrates [31]. Leur rôle est triple:

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

II.3 Méthodes d'activation du ciment avec ajouts minéraux :

Le ciment avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout (C.P.A-C.E.M I). Ce type de ciment (CPJ-CEM II) présente un temps de prise un peu plus long que le ciment ordinaire (CPA-CEM I), surtout dans le cas de bétonnage par temps froid.

Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral (C.P.J-C.E.M II), nécessite l'emploi d'un bon activant, chimique (utilisation des solutions alcalines qui modifient la prise et le durcissement), mécanique (broyage poussée du liant hydraulique) ou thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température). En général, les différents types d'activation peuvent être classés en trois catégories [32] ; [30] (Figure II- 2):

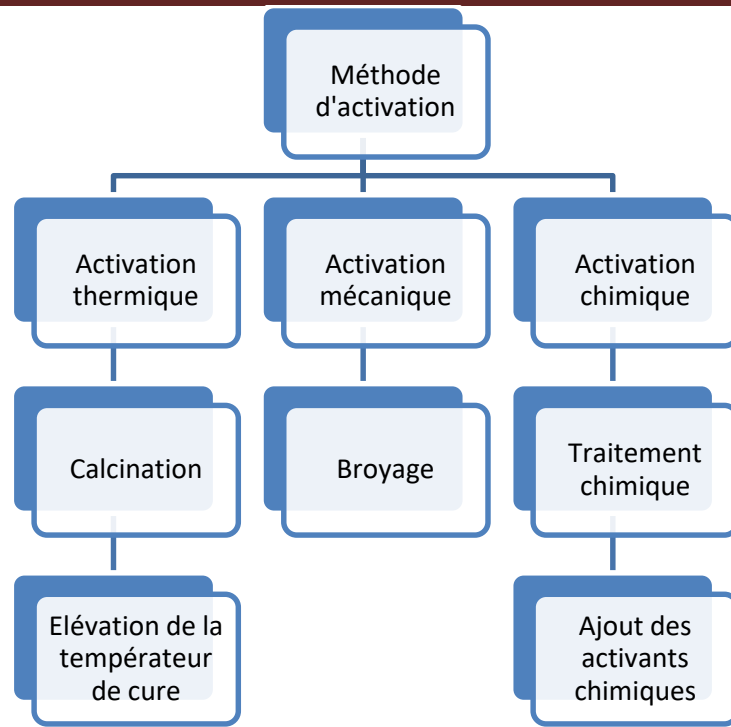


Figure II. 2 : Les différentes méthodes d'activation selon Shi [32].

II.4 Différentes méthodes d'activation :

II.4.1 Activation mécanique :

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

En général, le broyage est plus facile quand le clinker possède.

- plus de C_3S ,
- moins de C_3A ,
- le plus possible de petits cristaux.

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

II.4.2 Activation thermique :

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

II.4.3 Activation chimique :

L'activation chimique consiste à incorporer des produits spécifiques dans le mélange cimentaire à l'état frais afin de favoriser la dissolution de l'addition minérale, généralement le liant hydraulique (C.P.J. ciment portland composé) est activé par différentes solutions alcalines, telles que. L'hydroxyde de sodium (NaOH) et L'hydroxyde de potassium (KOH) à différents pourcentages en faisant varier la molarité de la solution basique.

Les activateurs chimiques (accélérateurs de prise et de durcissement) utilisés sont des produits solubles dans l'eau. Ils agissent chimiquement en modifiant les vitesses de dissolution des constituants anhydres et en accélérant l'hydratation des grains de ciment. La prise est alors plus rapide et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important. Ce sont surtout.

* des alcalis (soude. NaOH, potasse. KOH) pour la prise.

* des chlorures de calcium (CaCl₂) pour le durcissement.

Ils sont utilisés à raison de 1 à 2% du poids de ciment. En général, les accélérateurs sont employés pour les bétonnages par temps froid ou lorsqu'un durcissement rapide est souhaité. La prise du ciment est généralement lente, l'ajout des activateurs chimiques et le broyage plus poussé du ciment présentent des solutions à ce phénomène.

II.5 Comparaison entre les différents types d'activation

Une comparaison entre les différentes méthodes d'activation des pouzzolanes indique que l'activation chimique a des avantages, un faible coût énergétique notamment. En effet, une série d'études montre que l'ajout d'un activateur peut augmenter la réactivité des pouzzolanes [33] en tant que processus de production simple des matériaux cimentaires, par

Chapitre I: ————— Etude bibliographique

rapport aux activations mécanique et thermique qui ont besoin d'équipements supplémentaires, consomment beaucoup d'énergie et augmentent ainsi les couts. Les activant chimiques peuvent être ajoutés au cours du broyage de la pouzzolane ou du ciment, ou ajoutés pendant le malaxage dans l'eau de gâchage ou mélanges directement avec le liant [30]. Ainsi, l'activation chimique n'a pas besoin de changement significatif sur la ligne de production, et elle peut être facilement acceptée par l'industrie du ciment et du béton [32]. De plus, l'activation thermique n'est pas possible pour tous les types de bétons. Elle est utilisée en préfabrication, ou les moyens d'étuvage existent déjà. Pour les bétons prêts à l'emploi, l'activation mécanique est adaptée.

En termes de résistances, Qian et al [34] ont trouvé que l'addition de l'activant sulfate de sodium Na_2SO_4 augmente davantage la résistance d'un mortier (chaux + cendre volante) que l'activation mécanique de la cendre volante seule.

II.6 Activation chimique des additions dans une matrice cimentaire

II.6.1 Avant-propos

Avant d'aborder l'activation chimique des additions pouzzolaniques incorporées dans une matrice cimentaire, il est à noter des études, le plus souvent anciennes, qui présentent des résultats concernant l'action des activants alcalins sur le ciment Portland. Par exemple, [35] rapportent qu'au-delà de 0,1% en masse de ciment, les carbonates de calcium, de sodium et de lithium réduisent le temps de prise et augmentent la résistance à la compression à 28 jours. La réduction associée de la porosité peut être due à la précipitation de carbonate de calcium [36]. Les nitrates de calcium et nitrites de calcium sont également considérés comme des activants du ciment (réduction du temps de prise et augmentation de la résistance à la compression aussi bien aux jeunes âges qu'à 28 jours) [37]. [38] rapportent que l'action du nitrate de calcium est celle d'un accélérateur de prise seulement, mais, lorsque celui-ci est couplé à des agents de mouture tels que les alcanolamines, l'accélération du durcissement est réelle.

Ces résultats montrent bien que si l'on veut améliorer la réactivité d'une addition minérale, le produit incorporé sera susceptible d'activer également le ciment. De plus, à notre connaissance, il n'existe pas de travaux sur l'activation chimique du méta kaolin dans une matrice cimentaire contenant du ciment, et pourtant l'industrie du béton est particulièrement intéressée pour substituer une part du ciment par du méta kaolin.

Chapitre I: ————— Etude bibliographique

En revanche, il existe un grand nombre d'études sur l'activation chimique du méta kaolin en présence de chaux. D'après les travaux de Buchwald et al [26], la similarité des réactions entre un système pouzzolane/ciment et un système pouzzolane/chaux, fait qu'il est nécessaire de parler des études méta kaolin/chaux.

II.7 Effet de l'activation chimique sur la cinétique d'hydratation aux jeunes âges

II.7.1 Calorimétrie

De Silva et Glasser, 1992 [39] montrent que le flux de chaleur est plus prononcé et qu'il se produit beaucoup plus tôt dans les systèmes MK/chaux activés (sulfate de calcium ou soude dans une moindre mesure) que dans le même système non activé. Ils attribuent les pics à la formation d'hydrates du type C-A-H et C-S-H dans le cas d'hydroxyde de sodium), à la formation d'ettringite avant les phases C-A-H et C-S-H dans le cas du sulfate de calcium.

Il est également à noter que la quantité d'activant a un effet sur la cinétique de l'hydratation. [40] rapportent que les pics de chaleur sont fortement intensifiés jusqu'à un certain dosage et qu'au-delà, les différences ne sont pas significatives, avec même un effet retardé de l'activant (Figure II- 3). Ils montrent aussi que, pour une quantité donnée d'activant, la quantité de chaleur dégagée est plus importante lorsque le rapport MK/chaux augmente.

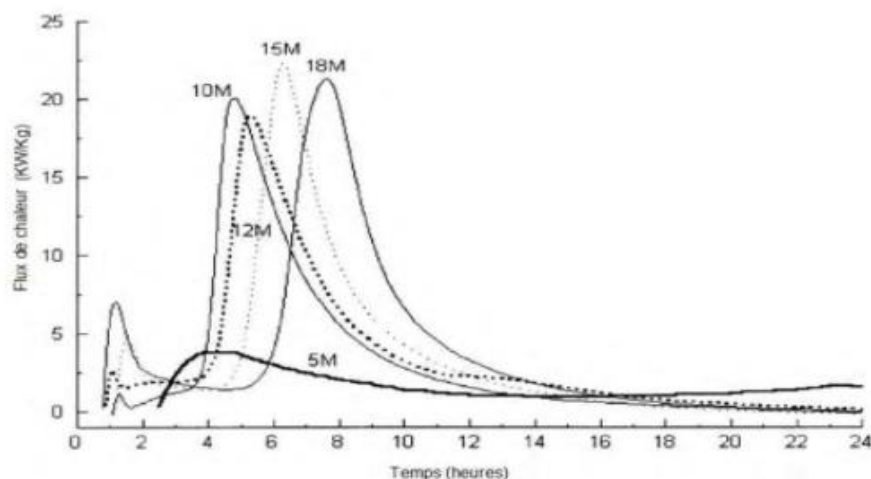


Figure II. 3: Courbe Flux de chaleur relié à l'activation chimique avec différentes concentrations en NaOH du méta kaolin avec la chaux [40].

Chapitre I: ————— Etude bibliographique

L'activité marquée en présence d'activant (soude, sulfate de calcium) est également observée dans des pâtes ciment Portland (70%) /cendre volante (30%) [41] (Figure II- 4). Ces auteurs considèrent que les deux activateurs cités raccourcissent la période d'induction mais que la soude est la plus active après la période d'induction.

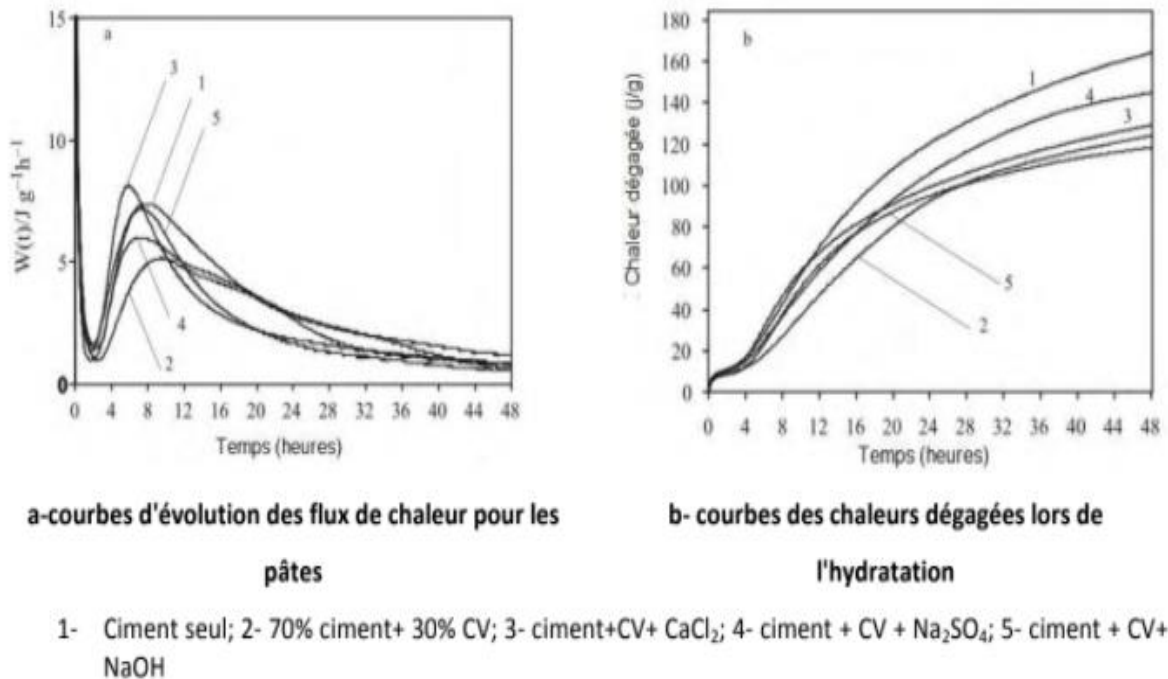


Figure II. 4 : Les courbes de chaleur d'hydratation d'une cendre volante activée dans une matrice cimentaire [41].

plus marquée (intensité de pic) et plus précoce est observée sur des combinaisons clinker/laitier [42] activées par du sulfate de calcium. Ils concluent à une activation des deux phases.

Quelles que soient la nature de l'addition minérale, son association avec un clinker ou de la chaux, les résultats de la littérature montrent une accélération de la cinétique de l'hydratation qui est à nuancer en fonction de la nature de l'activant et de son dosage. Cette accélération est plutôt à regarder comme une accélération de la prise.

II.7.2 Temps de prise

Dans le système MK/chaux, [43] montre que la soude et le carbonate de sodium entraînent plus rapidement la période de prise et raccourcissent cette dernière significativement, par comparaison au sulfate de sodium (Tableau II. 1).

Chapitre I: ————— Etude bibliographique

Tableau II. 1: Temps de prise d'un mélange (méta kaolin+chaux) avec différents activants [43].

Composition	temps de début de prise (h:min)	temps de fin de prise (h:min)
50% Métakaolin + 50% Ca(OH) ₂ + 5% gypse	02:45	04:30
50% Métakaolin + 50% Ca(OH) ₂ + 5% NaOH	01:32	02:15
50% Métakaolin + 50% Ca(OH) ₂ + 5% Na ₂ SO ₄	03:50	08:20
50% Métakaolin + 50% Ca(OH) ₂ + 5% Na ₂ CO ₃	01:20	02:10

Dans un système pouzzolane naturelle-chaux, le sulfate de calcium accélère très peu la prise en comparant avec le mélange de référence [44].

L'accélération de la prise est observée dans des mortiers de laitier (mortier contenant du laitier) lorsqu'ils incorporent de la soude ou du carbonate de sodium, par comparaison avec le mortier de ciment seul [45]. Le même auteur montre des augmentations significatives de la consistance des mélanges frais lorsque du silicate de soude est utilisé et dans ce cas, l'accélération de la prise est la plus importante ; il attribue le changement de rhéologie à la présence des anions SiO₃²⁻ introduits en solution et qui viennent s'ajouter aux silicates du laitier. Une perte d'ouvrabilité a été observée, de manière moins marquée, avec l'incorporation de soude pour activer un laitier [46].

Une accélération de la prise est pareillement constatée sur des combinaisons clinker/laitieren présence de sulfate de calcium [42]. Ces auteurs montrent que l'augmentation de la quantité de l'activant peut accentuer l'apparition précoce de la prise.

Cela est confirmé par [43] avec la soude (Figure II-5).

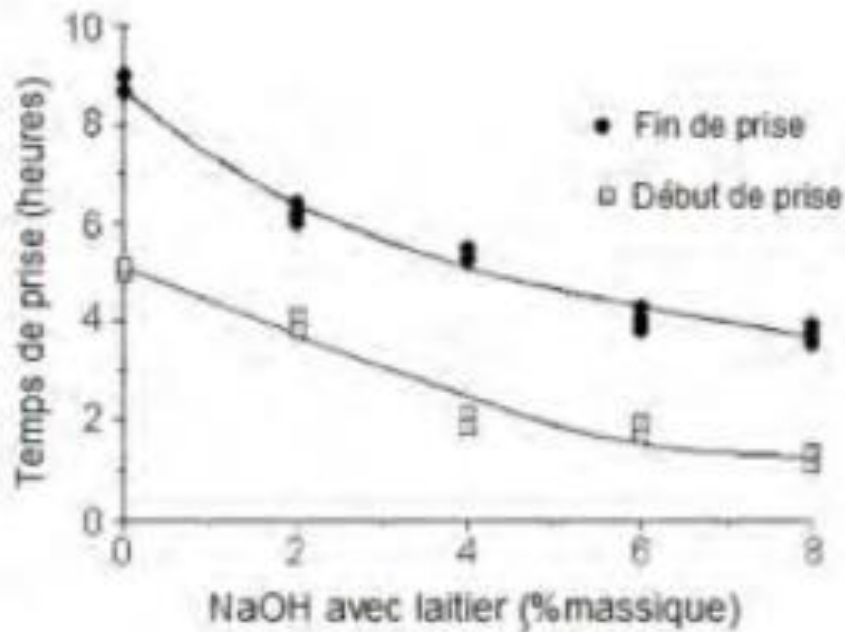


Figure II. 5: Courbe de l'effet du dosage de NaOH sur le temps de prise d'un mélange contenant 50% ciment et 50% laitier [43].

Quels que soient les contextes expérimentaux, l'accélération de la prise est confirmée par la mesure des temps de début de prise lorsqu'un activant est incorporé. Selon la nature de l'activant, le raccourcissement de la période de prise n'est pas toujours visible. Des problèmes d'ouvrabilité des mélanges peuvent apparaître, et peuvent être attribués à la nature de l'anion accompagnant l'alcalin.

II.8 Effet de l'activation chimique sur le développement des résistances à la compression

De Silva et Glasser [39] rapportent que le système MK/chaux activé avec de la soude ou du sulfate de calcium présente par rapport au mélange non activé, des résistances plus élevées jusqu'à 28 jours et plus faibles à 90 jours et à 180 jours. Les mélanges activés présentent néanmoins une augmentation de résistance jusqu'à 180 jours (Figure II- 6).

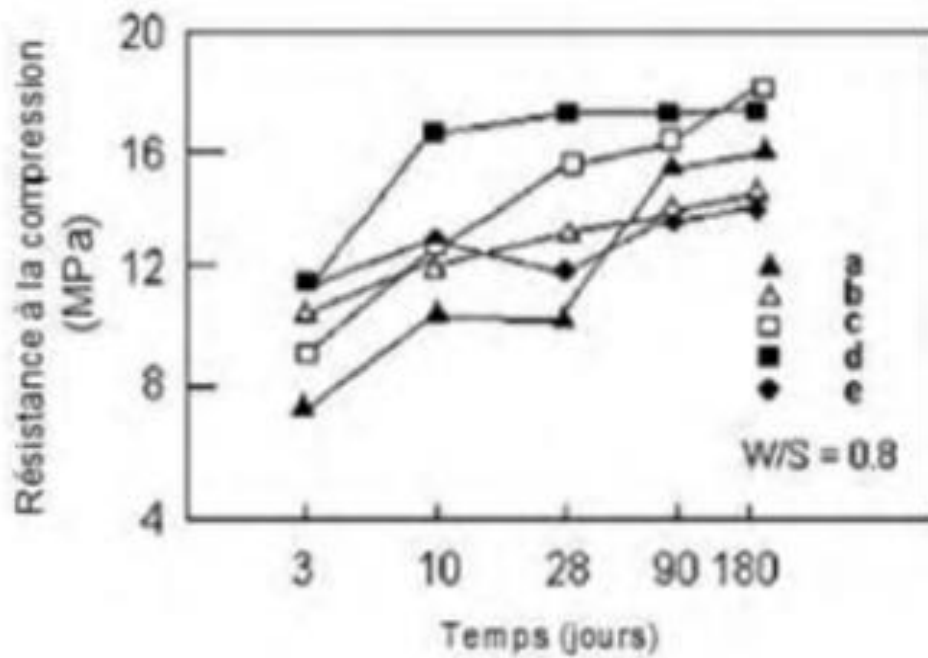


Figure II. 6: Courbe de l'effet d'activants sur la résistance de méta kaolin avec chaux [39]

Tableau II. 2 : Effet d'activants sur la résistance de méta kaolin avec chaux [39]

notation	rapport massique (Métakaolin/Ca(OH) ₂)	source du sulfate	rapport molaire (SO ₃ /AL ₂ O ₃)	Rapport massique (E/L)	Aqueux
A	1	N/A	N/A	0.8	H ₂ O
B	1	N/A	N/A	0.8	0,5M NaOH
C	1	B-anhydrite	0.1	0.8	H ₂ O
D	1	B-anhydrite	0.1	0.8	0,5M NaOH
E	1	Na ₂ SO ₄	0.1	0.8	H ₂ O

Ces résultats sont confirmés par Jiang [43] à l'échéance de 28 jours : la soude et le sulfate de calcium augmentent la résistance, en particulier NaOH. Le même auteur montre que le carbonate de calcium n'a pas d'effet sur la résistance à 28 jours. Shi et Day [47][48] montrent aussi une augmentation des résistances à tous les âges dès lors que le système pouzzolane (80%) / chaux (20%) est activé avec 4% de sulfate de sodium.

L'évolution des résistances dépend de la variété des natures des composants du système activé addition minérale / clinker. Par exemple, Marciano et Bettagin [42] montrent

Chapitre I: ————— Etude bibliographique

que, sur mortier incorporant des ciments au laitier avec activant, les performances sont systématiquement plus élevées à un jour, plus faibles dès 7 jours, par rapport aux performances du mélange de référence (Figure I- 18). Il apparaît que les sulfates alcalins sont les activateurs les plus efficaces, à savoir qu'ils permettent les meilleures résistances à 1 jour, et qu'ils limitent la baisse ou conservent le niveau de résistance à 28 jours. Au contraire, Shi et al [28] rapportent une amélioration des résistances lorsque 4% de sulfate de sodium sont ajoutés à un mélange contenant 50% de laitier et 50% de clinker.

De même, Qian et al [34] montrent que l'utilisation du sulfate de sodium permet une augmentation des résistances du mortier incorporant le système cendre volante alumineuse/ciment (type CEM I) à toutes les échéances testées (3 jours à 28 jours, cf. Figure I- 19), par comparaison au même mortier non activé. Cette augmentation des résistances à moyen terme est confirmée par Polettini et Pomi [49] avec l'emploi de sulfate de potassium, pour des teneurs en cendre volante (issue de l'incinération d'ordure ménagère) jusqu'à 60%.

Par rapport au mélange non activé, l'augmentation des résistances est toujours observée aux jeunes âges, quel que soit le système étudié (MK/chaux, laitier/ciment, cendre volante/ciment) et quel que soit l'activateur alcalin utilisé. Ce fait est totalement relié à une cinétique accélérée de l'hydratation, mise en évidence dans la section précédente. Il apparaît que les sulfates alcalins donnent les meilleurs résultats. En revanche, à plus long terme, la littérature est partagée et met en évidence des résistances soit toujours plus élevées, soit plus basses que celles mesurées sur le mélange non activé. Même si la variété des combinaisons, inhérente à la nature des produits, peut expliquer cette divergence, les résultats obtenus (notamment les baisses de résistance), ne sont pas expliqués sous l'angle des mécanismes physico-chimiques.

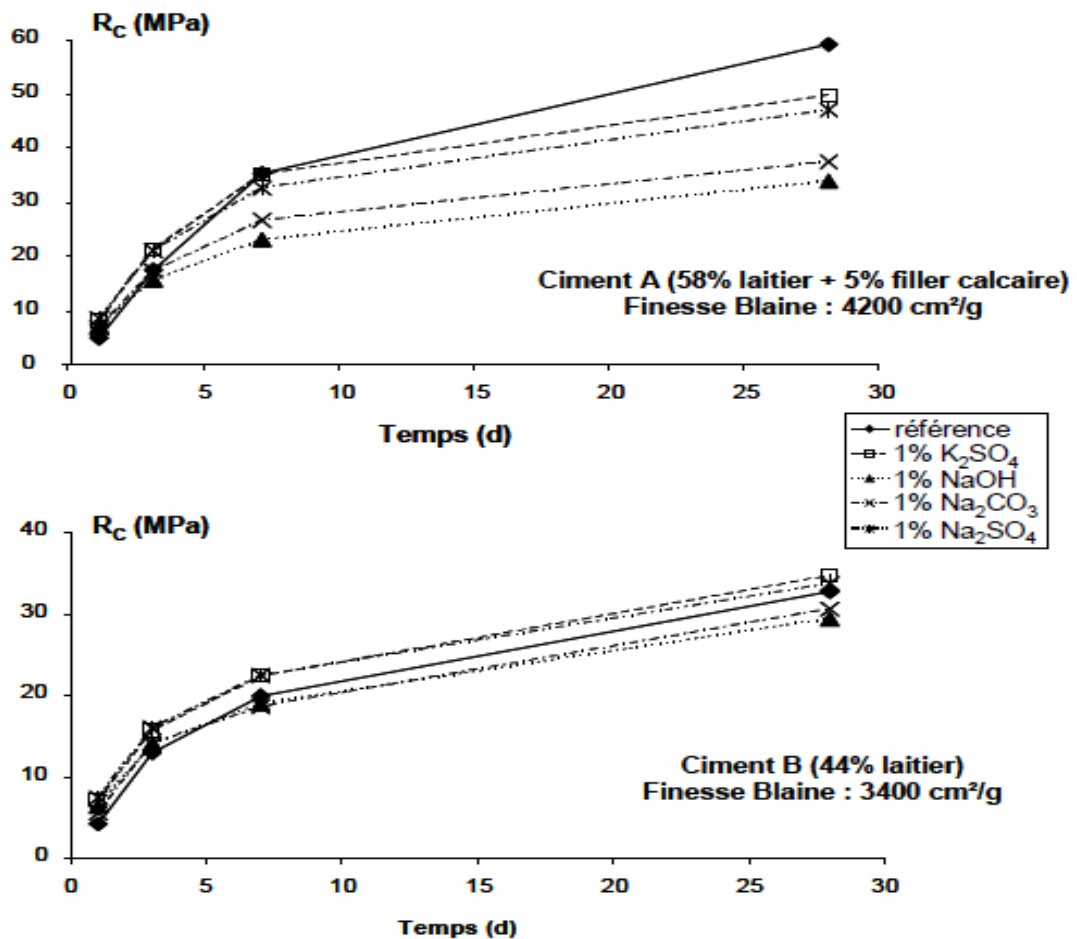


Figure II. 7: Courbe de la résistances à la compression sur mortier (ciment au laitier/sable = 0,33 – eau/ciment=0,48) en fonction de la nature de l’activant [42]

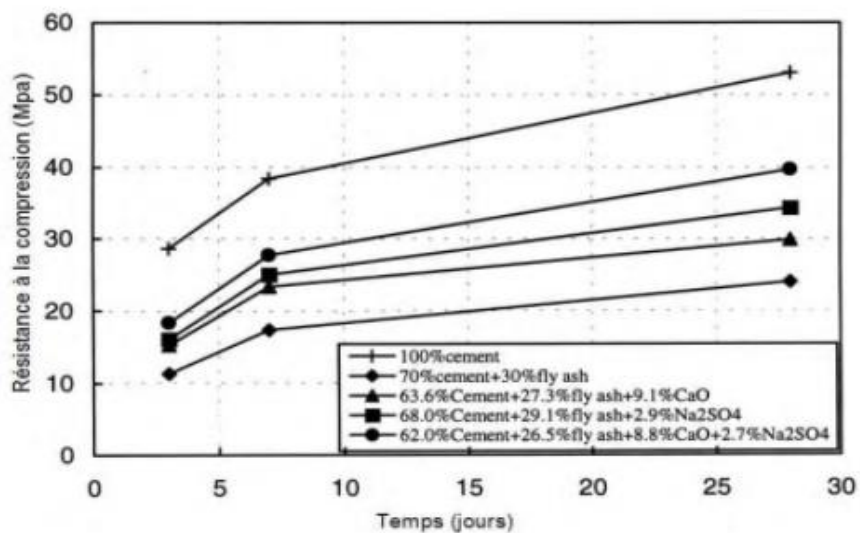


Figure II. 8: Courbe de Développement de la résistance à la compression de mortiers (E/C=0,5) incorporant ciment, cendre volante et activant [34]

II.9 Hydrates développés et microstructure:

Le laitier de haut-fourneau est constitué de phases vitreuses alors que le méta kaolin est composé de phases amorphes. Il n'est donc pas étonnant de trouver des hydrates formés très différents dans les matrices activées contenant soit du laitier, soit du méta kaolin [50].

Le mécanisme d'activation du méta kaolin en présence de chaux est rapporté par [39]. La réaction pouzzolanique est facilitée par les alcalins de l'activant qui permettent la dissolution initiale, principalement des espèces alumineuses ; s'ensuit la précipitation des hydrates. [39] rapportent que dans les systèmes activés MK/chaux, les hydrates présents à 1 jour sont C_4AH_{13} , C-S-H, et C_2ASH_8 . Les hydrogénéats sont visibles après 3 jours d'hydratation. Au fur et à mesure que l'hydratation se poursuit, les phases C_4AH_{13} géhlénite hydratée disparaissent. Il apparaît que si la soude est utilisée, le processus présenté est fortement accéléré.

Le Tableau II- 3 récapitule les hydrates identifiés dans le système activé MK/chaux. Il est à noter que lorsque le sulfate alcalin est utilisé, l'apport de sulfate ne fait plus apparaître d'ettringite à 1 jour mais des mono-sulfates. Les sulfates sont probablement sorbés pour une partie dans les C-S-H, et retenus pour une autre partie dans la solution solide C_4AH_{13} . Ce dernier hydrate est d'ailleurs présent à l'état de traces dans les systèmes activés par des sulfates alcalins, notamment à long terme [39][28].

Tableau II. 3: Résumé des hydrates identifiés par DRX et ATD durant l'hydratation du système MK / chaux avec différents activants (eau/solide =0,8) [39][28].

Composition	produits d'hydratation détectés à différents âge			
	1j	28j	90j	180j
50% Métakaolin + 50% Ca(OH) ₂	CH, C_4AH_{13} , C-S-H	C_2ASH_8 , C_3AH_6 , C_4AH_{13} , C-S-H	C_2ASH_8 , C_3AH_6 , C_4AH_{13} , C-S-H	C_2ASH_8 , C_4AH_{13} , C-S- H
50% Métakaolin + 50% Ca(OH) ₂ + NaOH	CH, C_2ASH_8 , C_4AH_{13} , C-S- H	C_2ASH_8 , C_3AH_6 , C_4 A H_{13} , C-S-H	C_2ASH_8 , C_3AH_6 , C_4AH_{13} , C-S-H	C_3AH_6 , C-S-H
50% Métakaolin + 50%	CH, Afm, C_4AH_{13} , C-S-	C_2ASH_8 , C_3AH_6 , C_4AH_{13} , C-S-H	C_2ASH_8 , C_3AH_6 , C-S-H	C_2ASH_8 , C_3AH_6 , C-S-H

Chapitre I: ————— Etude bibliographique

Ca(OH) ₂ + Na ₂ SO ₄	H			
50% Métakaolin + 50% Ca(OH) ₂ + NaOH Anhydrite	CH, Afm, C ₄ AH ₁₃ , C-S- H	C ₂ ASH ₈ , C ₃ AH ₆ , C ₄ AH ₁₃ , C-S-H	C ₂ ASH ₈ , C ₃ AH ₆ , C-S-H	C ₂ ASH ₈ , C ₃ AH ₆ , C-S-H

Des observations morphologiques au microscope électronique à balayage confirment que la nature de l'activant a un effet important sur la microstructure des systèmes MK/chaux. Notamment, la soude, en présence de sulfates, provoque une structure sans particularités, très massive aussi bien aux jeunes âges qu'à plus long terme [39].

Ces mêmes auteurs ont remarqué que l'activation alcaline augmente considérablement la consommation de la portlandite durant les 14 premiers jours d'hydratation mais que la portlandite existe encore à l'échéance de 28 jours.

II.10 L'activation chimique de Meta kaolin

L'activation chimique consiste à incorporer des produits spécifiques dans le mélange cimentaire à l'état frais afin de favoriser la dissolution de l'addition minérale. Dans le cas d'une addition pouzzolanique telle que le méta kaolin, il s'agit de la rendre la plus réactive possible pour que l'hydroxyde de calcium, formé lors de l'hydratation du ciment, soit le plus rapidement consommé. Les silicates / silico-aluminates de calcium produits contribueront alors au gain de résistance au jeune âge.

II.11 Réaction pouzzolanique du méta kaolin dans un milieu cimentaire

La réaction pouzzolanique consiste à produire des silicates de calcium hydratés à partir de la silice réactive de l'addition (essentiellement dans un état amorphe) en consommant des cristaux de chaux formés par l'hydratation des composés principaux du clinker (C₃S et C₂S) [51], [52].

Une phase liquide est nécessaire pour assurer le transport des ions. Elle dépend de la dissolution de la silice par attaque d'ions hydroxydes.

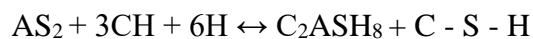
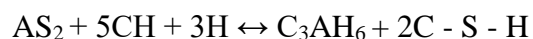
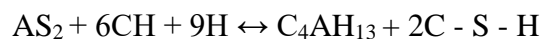
Chapitre I: ————— Etude bibliographique

La réaction dépend du niveau de la réactivité du méta kaolin (MK) qui, lui, dépend du procès de calcination [53], du traitement post-calcination (broyage, dés agglomération, tamisage...) et de la pureté du kaolin [54].

Différents auteurs [55], [56] ont décrit la réaction pouzzolanique en quatre étapes :

- Dissolution par réaction hydroxylique de la pouzzolane en milieu basique. Cette dissolution est assurée par les ions hydroxyles provenant de la dissolution des phases anhydres du ciment ou d'une solution d'hydroxyde de calcium. Elle conduit à la formation d'anions, {Al (OH)⁴⁻ et H₂SiO₄²⁻}, en solution.
- Sursaturation de la solution en ions aluminates, silicates et calcium.
- Germination et précipitation d'hydrates tels que C-S-H, C₂ASH₈, ...
- Croissance des hydrates.

Une écriture des réactions pouzzolaniques des méta kaolins a été proposée par Murat [58], De Silva et al. [57] (méta kaolin =AS₂) :



La réaction pouzzolanique du méta kaolin forme des C-S-H ainsi que les produits cristallins, qui incluent les hydrates d'aluminate de calcium et les hydrates d'alumino-silicate (C₂ASH₈, C₄AH₁₃ et C₃AH₆).

Les produits cristallins dépendent principalement de la température de la réaction et du rapport AS₂/CH [58], [59], [60]. Les ions Ca²⁺ et OH⁻ proviennent de la dissolution des phases anhydres du ciment et plus particulièrement, du silicate tricalcique C₃S (composé majoritaire du ciment). La présence des ions hydroxyles dans la solution interstitielle augmente le pH du système en permettant la dissolution du méta kaolin. Ce dernier, après dissolution, réagit avec les ions Ca²⁺ et OH⁻ pour former des gels silico-calciques hydratés C-S-H, supplémentaires à ceux formés lors de l'hydratation du ciment, au détriment de la précipitation de la portlandite CH. Ainsi, le taux de portlandite présent dans la pâte de ciment durci est réduit [61].

Chapitre I: ————— Etude bibliographique

La portlandite est rapidement consommée dans les pâtes contenant jusqu'à 30% du méta kaolin [62]; la microstructure est alors riche en C-S-H et Stratlingite (C_2ASH_8), la présence de ce dernier dépend du rapport AS_2/CH .

II.12 Effet de la présence du méta kaolin dans la matrice cimentaire

II.12.1 La chaleur d'hydratation

Selon Wu et Young [63], l'effet accélérateur est dû à la finesse du méta kaolin (surface spécifique importante), celle-ci constituant un grand nombre de sites de nucléation favorables au développement des hydrates lors de l'hydratation du ciment.

L'augmentation de la vitesse de réaction d'hydratation de la pâte « ciment plus méta kaolin » s'accompagne d'une augmentation de la chaleur dégagée [64], [65]. Les auteurs cités ont constaté que pour un taux d'incorporation de 10 % en méta kaolin, le pic de chaleur dégagée est à son maximum dans les deux premiers jours. Il en est de même pour le même taux en fumée de silice [66]. Au-delà de ce taux de substitution, le dégagement de chaleur est limité par l'effet de dilution.

Conclusion :

Ce chapitre présente une étude sur l'activation chimique en générale et l'activation chimique du méta kaolin et cimentaires.



Chapitre III :

Caractéristiques des matériaux utilisés



Chapitre III: ————— Caractéristiques des matériaux utilisés

III.1 Introduction :

Les matériaux utilisés dans cette étude, ont un rôle très important dans la détermination des propriétés des mortiers à l'état frais et durci. Donc, Dans ce chapitre on présente les caractéristiques des matériaux utilisés avec les essais de chaque matériaux , et la méthodologie suivie pour réaliser ce travail.

III.2 Matériaux utiliser

III.2.1. Ciment

On a utilise de type de ciment : ciment de CRS et clinker.



Figure III. 1 : ciment de CRS.



Figure III. 2 : ciment de clinker.

Chapitre III: ————— Caractéristiques des matériaux utilisés

III.2.2 Sable

On a utilisé le sable de dune de boussaada.



Figure III. 3 : Sable de boussaada.

III.2.3 Méta kaolin :

Le méta kaolin est une pouzzolane de synthèse, issue du traitement de la kaolinite, argile assez courante sur la surface du globe.



Figure III. 4 : Poudre de Méta kaolin.

III.2.4. Déchets d'aluminium :

Nous avons collecté les résidus d'aluminium dans les ateliers de fabrication d'aluminium, puis filtré les restes expérimentaux.



Figure III. 5 : Valorisation des déchets d'aluminium.

III.2.5. L'eau de gâchage :

On a utilisé l'eau de robinet de la région de M'sila.

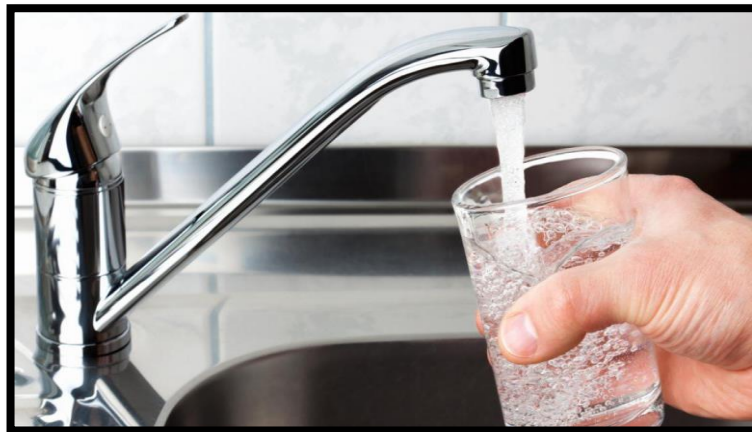


Figure III. 6 : L'eau de robinet de la région de M'sila

Chapitre III: ————— Caractéristiques des matériaux utilisés

III.3. Les caractéristiques des matériaux

III.3.1. Analyse granulométrique

III.3.1.1. Objectif

L'analyse granulométrique permet de détecter et miner la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm, à l'exclusion des filets. A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

III.3.1.2. Principe

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

III.3.1.3. Mode opératoire

- Prélever (2 kg) de matériau (sable sec).
- Peser chaque tamis à vide à 1 g près, soit m_i la masse du tamis.
- Constituer une colonne de tamis propres et secs dont l'ouverture des mailles est respectivement de haut en bas : **5-2,5-1,25-0,63-0,315** et éventuellement **0,08mm**. La colonne est coiffée par un fond pour recueillir les éléments passant au dernier tamis et un couvercle pour éviter la dispersion des poussières. On commence par peser les tamis ainsi que le fond.
- Verser le matériau (sable sec) sur la colonne et la fixer soigneusement sur la machine tamiseuse, vibré pendant **30(S)**. Arrêter la machine, puis séparer avec soin les différents tamis.
- Peser chaque tamis séparément. Soit M_i la masse du tamis (**1**) + le sable. La différence entre M_i et m_i (tamis de plus grandes mailles) correspond au refus partiel R_1 du tamis i .
- Reprendre l'opération pour le tamis immédiatement inférieur.

Chapitre III: ——— Caractéristiques des matériaux utilisés

- Ajouter le refus obtenu sur le sixième tamis à R, soit R2 la masse du refus cumuler du tamis 2 ($R_2 = R_1 + \text{Refus partiel sur tamis}$).

Poursuivre l'opération avec le reste des tamis pour obtenir les masses des différent refus cumulés R3, R4, Le tamisât cumulé est donné par la relation suivante :

$$T = 100 - RC \text{ Où : } (T: \text{Tamisât en \% , } RC: \text{Refus cumulés en \%})$$

Appareillage



Figure III. 7 : les tamis

Matériaux : Sable de dune et le déchets d'aluminium .

Module de finesse : Le module de finesse (M_f) est une facture très importante qui nous de juger la qualité du sable, il est donné par la relation suivant : $M_f = \sum R_i / 100$

Quantité de sable	Module de finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2.0
Très fin	11.0 à 1.5

Tableau III. 1 : Classement de sable.

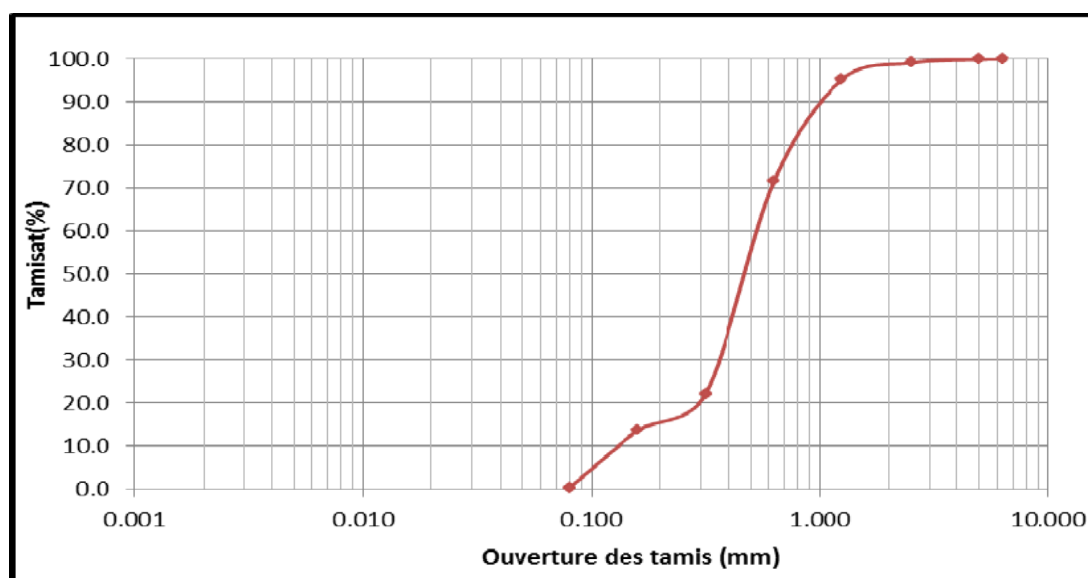
Chapitre III: ——— Caractéristiques des matériaux utilisés

Sable :

Tableau III. 2 : les résultats de l'analyse granulométrique selon la norme NF EN 933-1

Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2.5	59	59	2.95	97.05
1.25	54.1	113.1	5.655	94.345
0.63	78.9	192	9.6	90.4
0.315	551.8	743.8	37.19	62.81
0.16	1074.2	1818	90.9	9.1
0.08	168.2	1986.8	99.34	0.66
Fond	8.2	1995	99.75	0.25
<i>Module de finesse du sable</i>	$M_f = 3.45$			

Observation : $M_f = 3.45 > 2.5$ alors le sable est gros



Chapitre III: ——— Caractéristiques des matériaux utilisés

Figure III. 8: La courbe l'analyse granulométrique de sable du dune de boussaada la norme NF EN 933-1

Déchets d'aluminium :

Tableau III. 3 : les résultats de l'analyse granulométrique d'aluminium selon la norme NF EN 933-1

<i>Tamis ouverture (mm)</i>	<i>Masse des ref cumulés R</i>	<i>refus cumulés (g)</i>	<i>Pourcentage refus cumulés (%)</i>	<i>Pourcentage tamisât cumulés (%)</i>
5	0	0	0.00	100
2.5	5.00	5.00	1.052	98.948
1.25	208.3	213.3	44.90	55.10
0.63	132.50	345.8	72.80	27.20
0.315	101	446.8	94.06	5.94
0.16	16	462.8	97.43	2.57
0.08	8.5	471.3	99.22	0.78
Fond	3.6	474.9	99.97	0.03
<i>Module de finesse du sable</i>	$M_f = 5.09$			

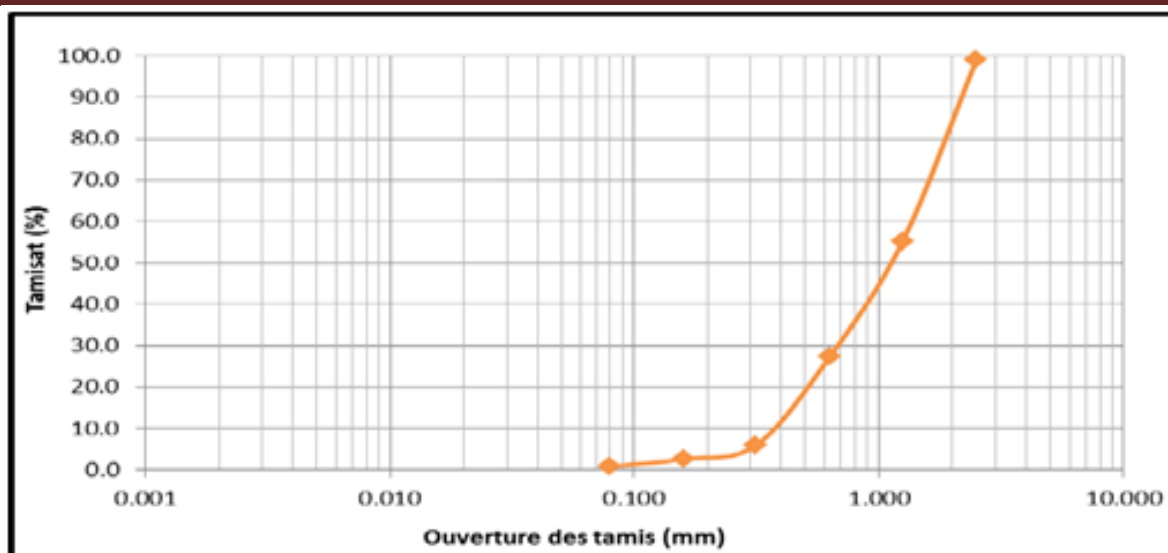


Figure III. 9 : La courbe d'analyse granulométrique d'aluminium selon la norme NF EN 933-1

III.3.2 La masse volumique

III.3.2.1 Objectifs

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité volume de ce corps comme on distingue le volume absolu et le apparent, il faut distinguer de même .

III.3.2.2 Principe

Il consiste à déterminer la masse volumique du matériau, sa densité à l'état naturelle « en présence des pores », avec la quelle on peut calculer la porosité, et la compacité du matériau.

Matériaux :

Sable de dune (SD) et aluminium (AL) et le mixte sable de dune et aluminium (SD + AL). -

III.3.2.3. La masse volumique absolue NF P18- 555

C'est la masse de l'unité de volume absolue du corps, c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps, sans tenir compte du volume des vides. il est donné par la relation suivant :

$$P_{abs} = M/V$$

Chapitre III: ——— Caractéristiques des matériaux utilisés

Appareillage : Pour déterminer la masse volumique absolue on a utilisé le matériel suivant :



Figure III. 10 : Balance et des éprouvettes graduée pour l'essai de la masse volumique absolue.

Schéma d'essai :

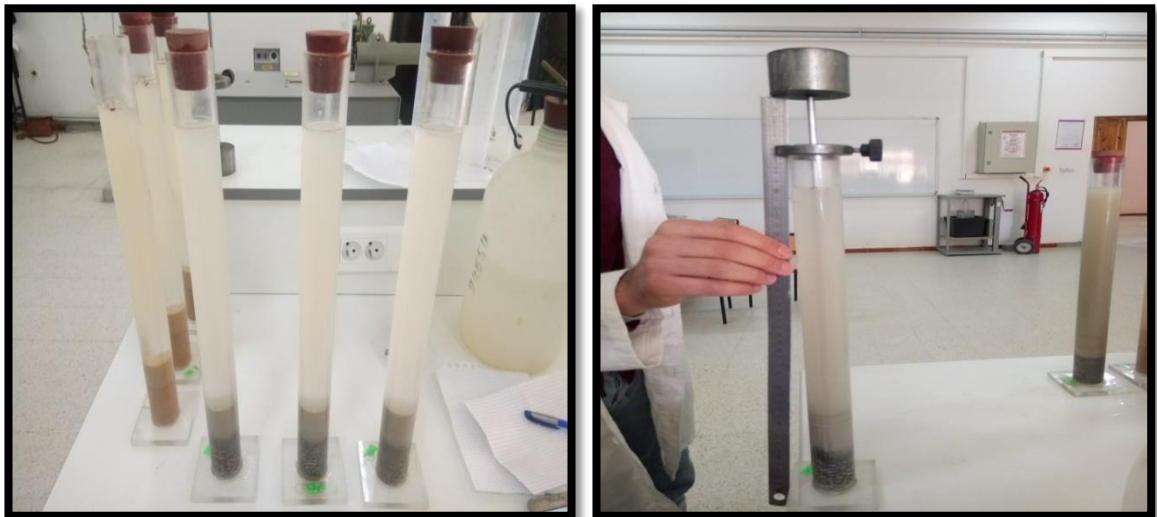


Figure III. 11 : Schéma d'essai de la masse volumique absolue d'aluminium.



Figure III. 12 : Schéma d'essai de la masse volumique absolue de sable.

Tableau III. 4 : Les résultats de la masse volumique absolue de sable et l'aluminium et le mixte SD+AL NF P18- 555.

Type	Nbr d'essai	V2 (ml)	V1 (ml)	M (g)	<i>Pabs</i> (g/ml)	<i>Pabs</i> (g/ml) Moyen
Sable de dune (SD)	1	120	144	60	2.5	2.53
SD	2	120	144	60	2.5	
SD	3	120	143	60	2.6	
Aluminium (AL)	1	170	197	60	2.22	2.11
AL	2	170	199	60	2.06	
AL	3	170	199	60	2.06	
90%(SD)+10%(AL)	1	120	142	60	2.72	2.72
90%(SD)+10%(AL)	2	120	142	60	2.72	
90%(SD)+10%(AL)	3	120	142	60	2.72	
80%(SD)+20%(AL)	1	120	149	60	2.06	2.08

Chapitre III: ————— Caractéristiques des matériaux utilisés

80%(SD)+20 %(AL)	2	120	148	60	2.14	
80%(SD)+20 %(AL)	3	120	149	60	2.06	
70%(SD)+30 %(AL)	1	120	149	60	2.06	2.06
70%(SD)+30 %(AL)	2	120	149	60	2.06	
70%(SD)+30 %(AL)	3	120	149	60	2.06	
60%(SD)+40 %(AL)	1	120	149	60	2.06	2.06
60%(SD)+40 %(AL)	2	120	149	60	2.06	
60%(SD)+40 %(AL)	3	120	149	60	2.06	
50%(SD)+50 %(AL)	1	120	148	60	2.14	2.08
50%(SD)+50 %(AL)	2	120	149	60	2.06	
50%(SD)+50 %(AL)	3	120	149	60	2.06	
40%(SD)+60 %(AL)	1	120	145	60	2.4	2.28
40%(SD)+60 %(AL)	2	120	146	60	2.3	
40%(SD)+60 %(AL)	3	120	148	60	2.14	
30%(SD)+70 %(AL)	1	120	148	60	2.14	2.19
30%(SD)+70 %(AL)	2	120	147	60	2.22	

Chapitre III: ———— Caractéristiques des matériaux utilisés

30%(SD)+70 %(AL)	3	120	147	60	2.22	
20%(SD)+80 %(AL)	1	120	148	60	2.14	2.11
20%(SD)+80 %(AL)	2	120	148	60	2.14	
20%(SD)+80 %(AL)	3	120	149	60	2.06	
10%(SD)+90 %(AL)	1	120	152	60	1.87	1.93
10%(SD)+90 %(AL)	2	120	150	60	2	
10%(SD)+90 %(AL)	3	120	151	60	1.93	

III.3.2.4. La masse volumique apparent NF P 18-554

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire de la Volume constitué par la matière du corps et le vide qu'elle contient. il est donné par la relation suivant :

$$P_{app} = (M_2 - M_1) / V$$

-**Appareillage** : Pour déterminer la masse volumique apparent on a utilisé le matériel suivant :

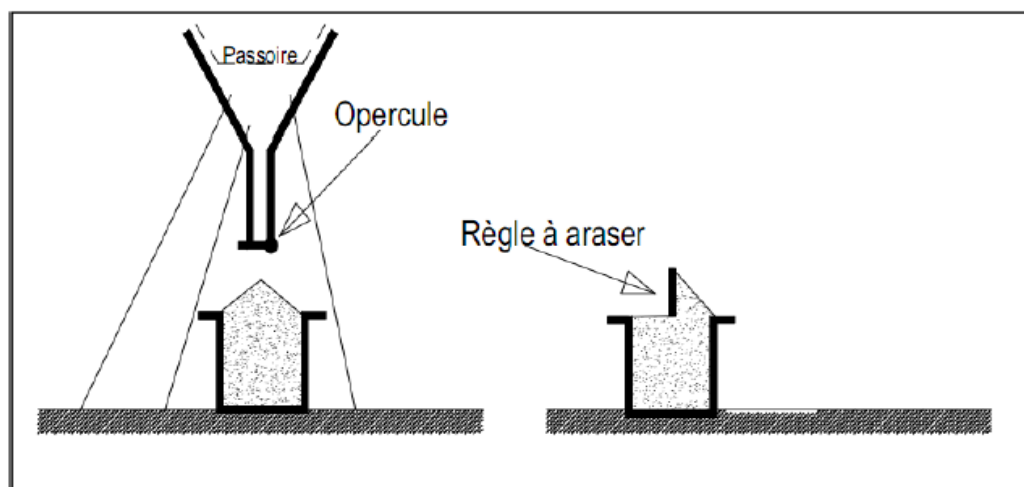


Figure III. 13 : Schéma pour déterminer la masse volumique apparent.

Chapitre III: ————— Caractéristiques des matériaux utilisés

Tableau III. 5 : Les résultats de la masse volumique apparente de sable et l'aluminium et le mixte SD+AL NF P 18-554 .

Type	Nbr d'essai	M2 (g)	M1 (g)	V (ml)	Papp (g/ml)	Papp (g/ml) Moyen
Sable de dune (SD)	1	173.6	3	120	1.421	1.430
SD	2	175.2	3	120	1.435	
SD	3	175.1	3	120	1.434	
Aluminium (AL)	1	45.2	3	120	0.351	0.346
AL	2	44	3	120	0.341	
AL	3	44.8	3	120	0.348	
90%(SD)+10%(AL)	1	149.1	3	120	1.217	1.253
90%(SD)+10%(AL)	2	157	3	120	1.283	
90%(SD)+10%(AL)	3	154.2	3	120	1.260	
80%(SD)+20%(AL)	1	122.9	3	120	0.999	1.0006
80%(SD)+20%(AL)	2	122.6	3	120	0.996	
80%(SD)+20%(AL)	3	123.9	3	120	1.007	
70%(SD)+30%(AL)	1	102.4	3	120	0.828	0.813
70%(SD)+30%(AL)	2	97.2	3	120	0.785	
70%(SD)+30%(AL)	3	102.2	3	120	0.826	
60%(SD)+40%(AL)	1	86.8	3	120	0.698	0.691
60%(SD)+40%(AL)	2	87.4	3	120	0.703	
60%(SD)+40%(AL)	3	83.9	3	120	0.674	
50%(SD)+50%(AL)	1	68.1	3	120	0.542	0.578
50%(SD)+50%(AL)	2	72.2	3	120	0.576	
50%(SD)+50%(AL)	3	77	3	120	0.616	
40%(SD)+60%(AL)	1	64.9	3	120	0.515	0.506
40%(SD)+60%(AL)	2	64	3	120	0.508	
40%(SD)+60%(AL)	3	62.7	3	120	0.497	
30%(SD)+70%(AL)	1	51.8	3	120	0.406	0.427
30%(SD)+70%(AL)	2	56.4	3	120	0.445	

Chapitre III: ————— Caractéristiques des matériaux utilisés

30%(SD)+70%(AL)	3	54.8	3	120	0.431	
20%(SD)+80%(AL)	1	52.9	3	120	0.415	0.409
20%(SD)+80%(AL)	2	53.7	3	120	0.422	
20%(SD)+80%(AL)	3	49.8	3	120	0.390	
10%(SD)+90%(AL)	1	48	3	120	0.375	0.370
10%(SD)+90%(AL)	2	46.5	3	120	0.362	
10%(SD)+90%(AL)	3	47.9	3	120	0.374	

III.3.3 La porosité

La porosité est l'ensemble des vides (pores) d'un matériau solide, ces vides sont remplis par des fluides (liquide ou gaz). C'est une grandeur physique comprise entre 0 et 1 (ou, en pourcentage, entre 0 et 100 %), qui conditionne les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat

Calculer la porosité : La porosité = $(1-(P_{app}/P_{abs})) \times 100$

Tableau III. 6 : Les résultats obtenir de l'essai de la porosité de sable et l'aluminium et le mixte SD+AL.

Type	P_{app} (g/ml)	P_{abs} (g/ml)	P_{app}/P_{abs}	$1-(P_{app}/P_{abs})$	Porosité(%)
Sable de dune (SD)	1.430	2.53	0.56	0.44	44
Aluminium (AL)	0.346	2.11	0.67	0.33	33
90%(SD)+10%(AL)	1.253	2.72	0.46	0.54	54
80%(SD)+20%(AL)	1.0006	2.08	0.48	0.52	52
70%(SD)+30%(AL)	0.813	2.06	0.39	0.61	61
60%(SD)+40%(AL)	0.691	2.06	0.33	0.67	67
50%(SD)+50%(AL)	0.578	2.08	0.27	0.73	73
40%(SD)+60%(AL)	0.506	2.28	0.22	0.78	78
30%(SD)+70%(AL)	0.427	2.19	0.19	0.81	81
20%(SD)+80%(AL)	0.409	2.11	0.19	0.81	81
10%(SD)+90%(AL)	0.370	1.93	0.19	0.81	81

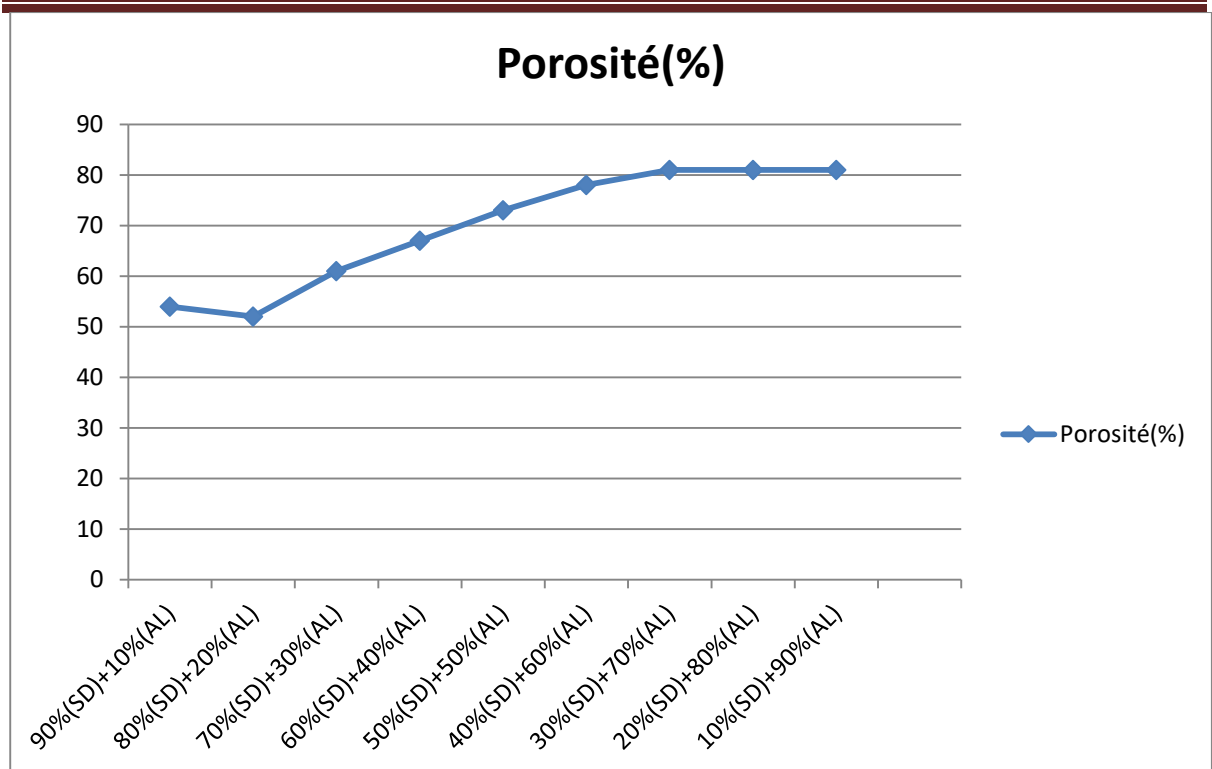


Figure III. 14 : Courbe de la porosité de mixte sable et aluminium.

III.3.4 Equivalent de sable

III.3.4.1 But de l'essai :

Cet essai, est utilisé de manière courante pour évalué la propreté des sable utilisés pour la composition du béton. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable Norme EN 933-8.

III.3.4.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à laver l'échantillon de sable puis déterminer la quantité d'élément fins (argile linons et impuretés) contenues dans cet échantillon, par rapport à la quantité d'élément sableux. C'est le rapport multiple par cent (100) de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur total du flocculat et de la partie sédimentée, nous avons:

- L'équivalent de sable piston : mesure au piston (E.S.P).
- L'équivalent de sable visuel :(E.S.V).
- L'essai est réalisé à 20 °C sur une fraction de sable passant par un tamis de 5mm.

Chapitre III: ————— Caractéristiques des matériaux utilisés

III.3.4.3 Equivalent de sable visuel (E.S.V)

Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau supérieur du flocculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette. Mesure également avec le réglet la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et fond de l'éprouvette. **ESV = (h2/h1)*100**

h1: La hauteur du sable + élément fins

h2 : La hauteur entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et fond de l'éprouvette.

III.3.4.4 Equivalent de sable piston (E.S.P)

Introduire le piston dans l'éprouvette et descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette. Introduire le réglet dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston. Soit $h'2$ la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée. **ESP = (h'2/ h1).100**

Appareillage :



Figure III. 15 : appareillage de l'essai de equivalent de sable

Chapitre III: ——— Caractéristiques des matériaux utilisés

Schéma d'essai



Figure III. 16 : L'essai d'équivalent de sable

Tableau III. 7 : Les résultats d'équivalent du sable de Boussaâda selon la Norme EN 933-8.

Essai	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	E.S.V (%)	E.S.Vmoy	h' ₂ (cm)	E.S.P (%)	E.S.Pmoy
1	11.4	8.6	75.44	75.29	8.5	71.43	71.18
2	11.5	8.7	75.65		8.5	71.77	
3	11.5	8.6	74.78		8.7	70.16	

III. 4 Comportement mécanique du mortier

Dans ce travail nous avons étudié les caractéristiques mécaniques à 7 jours de quatre formulations de mortier à savoir :

Tableau III.8: La composition des différents mortiers et pates.

Formulation	C (g)	S (g)	E (g)	Al (g)	E/C
Sable+ciment CRS	500	1350	300	00	0.6
95% sable+5%	500	1282.5	300	67.5	0.6

Chapitre III: ——— Caractéristiques des matériaux utilisés

aluminium					
Pate 100 % ciment CRS	2000	00	600	00	0.3
Pate 100% clinker	1500	00	450	00	0.3

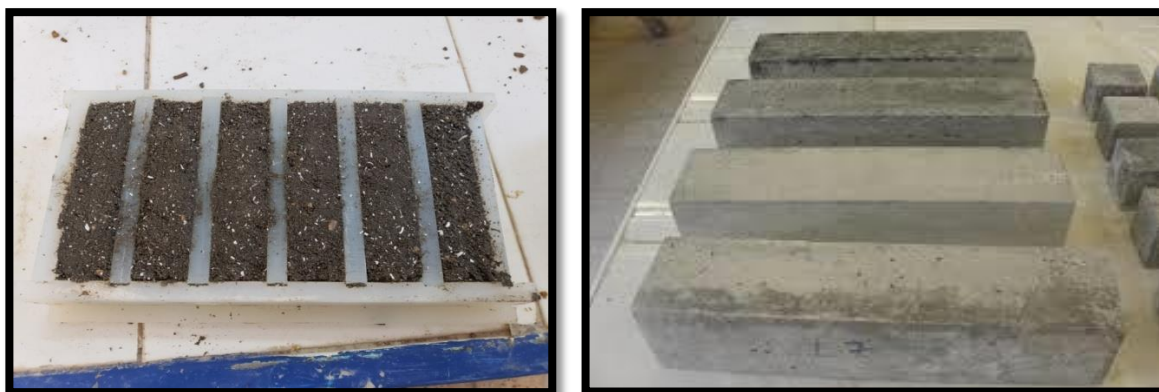


Figure III.17: Des éprouvettes 4x4x16 de pate de ciment et mortier ciment+aluminium.

III.4.1 La résistance à la compression

Tableau III.9: La résistance à la compression des différents mortiers et pates à 7 jours.

La formulation	Nombre des éprouvettes	Type de écrasement	Force (kN)	Contrainte (MPa)	Moyen de contrainte (MPa)
Sable+ciment CRS	1	Compression (1/2) ₁	30.47	19.04	15.78
		Compression (1/2) ₂	20.04	12.52	
	2	Compression (1/2) ₁	23.76	14.84	18.25
		Compression (1/2) ₂	34.66	21.66	
	Moyen (1 et 2)	Compression (1/2) ₁	27.11	16.94	17.01
		Compression (1/2) ₂	27.35	17.09	
95% sable + 5%	1	Compression (1/2) ₁	14.42	9.01	8.74
		Compression (1/2) ₂	13.56	8.47	
	2	Compression (1/2) ₁	13.85	8.65	9.18
		Compression (1/2) ₂	15.54	9.71	

Chapitre III: ————— Caractéristiques des matériaux utilisés

aluminium	Moyen (1 et 2)	Compression (1/2) ₁	14.13	8.83	8.96
		Compression (1/2) ₂	14.55	9.09	
Pate 100 % ciment CRS	1	Compression (1/2) ₁	42.42	26.38	39.3
		Compression (1/2) ₂	83.55	52.22	
	2	Compression (1/2) ₁	78.35	48.96	55.13
		Compression (1/2) ₂	98.22	61.31	
	Moyen (1 et 2)	Compression (1/2) ₁	60.385	37.67	47.22
		Compression (1/2) ₂	90.885	56.765	
Pate 100% clinker	1	Compression (1/2) ₁	65.49	40.86	43.67
		Compression (1/2) ₂	74.37	46.48	
	2	Compression (1/2) ₁	77.35	48.47	91.78
		Compression (1/2) ₂	69.30	43.31	
	Moyen (1 et 2)	Compression (1/2) ₁	71.42	44.66	44.77
		Compression (1/2) ₂	71.83	44.89	

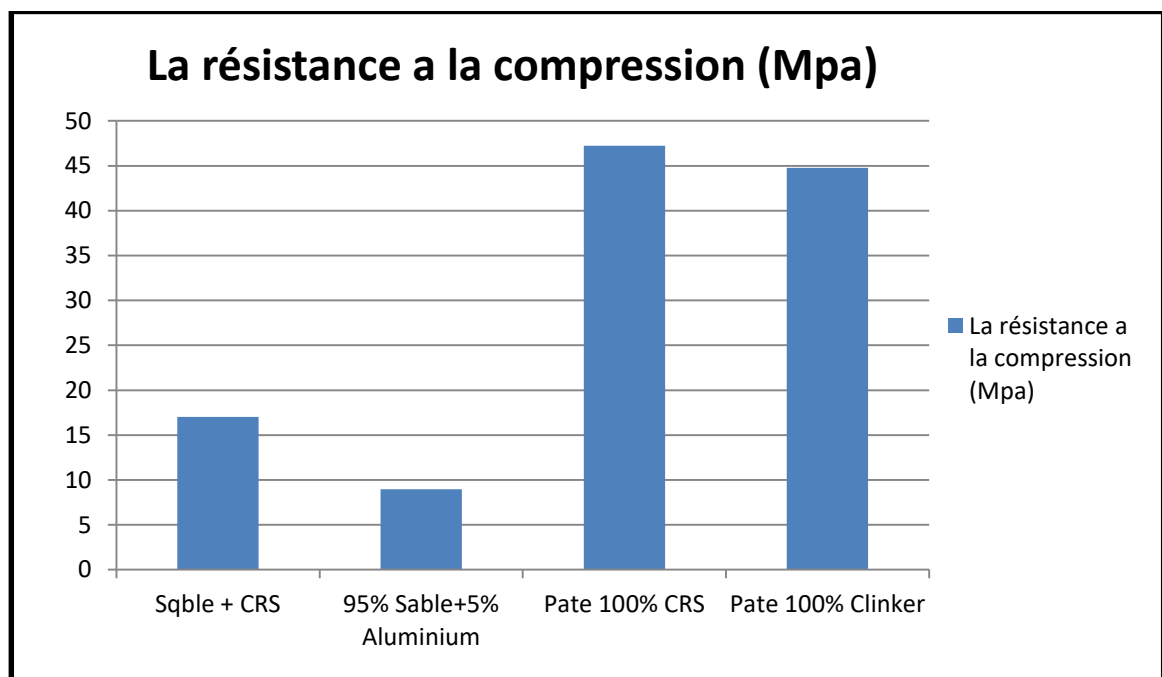


Figure III.18: La Courbe de la résistance à la compression des déférents mortiers et pates à 7 jours.

Chapitre III: ——— Caractéristiques des matériaux utilisés

III.4.2 La résistance à la flexion

Tableau III.10: La résistance à la flexion des différents mortiers et pâtes à 7 jours.

La formulation	Nombre des éprouvettes	Type de écrasement	Force (kN)	Contrainte (MPa)
Sable+ciment CRS	1	Flexion	1.59	3.71
	2		1.68	3.94
	Moyen (1 et 2)		1.63	3.82
95% sable + 5% aluminium	1		0.84	1.99
	2		0.91	2.14
	Moyen (1 et 2)		0.88	2.06
Pate 100 % ciment CRS	1		4.64	10.54
	2		3.61	8.46
	Moyen (1 et 2)		4.04	9.5
Pate 100% clinker	1		3.63	8.50
	2		4.99	11.67
	Moyen (1 et 2)		4.30	10.09

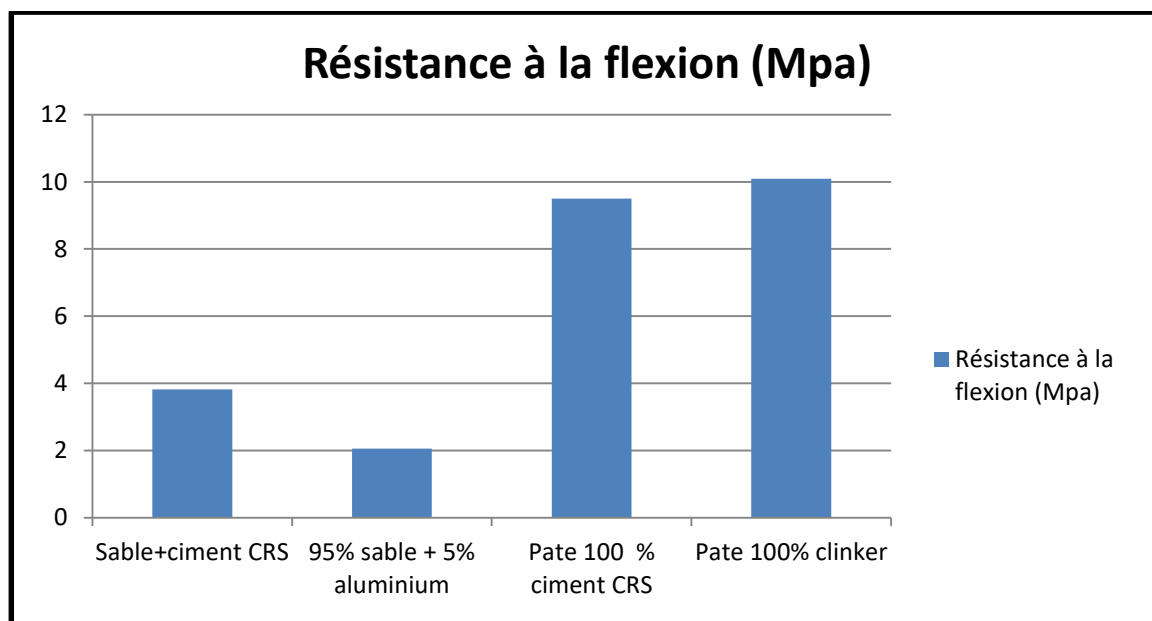


Figure III.19: La Courbe de la résistance à la flexion des différents mortiers et pâtes à 7 jours.

Chapitre III: ————— Caractéristiques des matériaux utilisés

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons réalisé les essais sur les caractéristiques des matériaux utilisées comme le sable et le méta kaolin, en plus nous avons présenté les essais effectués sur le mortier comme l'affaissement, la porosité, l'analyse granulométrique et la consistance et la résistance mécanique. ainsi que le début et la fin de prise.



Conclusion générale



Conclusion générale :

Conclusion générale :

Le travail de thèse s'inscrit dans une double problématique, d'ordre environnemental et économique, à laquelle l'industrie du béton doit s'adapter en substituant au ciment des additions minérales moins polluantes (fumée de silice, cendre volante, laitier, déchets d'aluminium, filler calcaire, métakaolin...).

Le travail traite directement de l'incorporation du métakaolin et l'aluminium dans les matrices cimentaires, en tant qu'addition à haute qualité environnementale, issue d'une ressource naturelle et qui participe au développement durable de tout ou partie d'un ouvrage en béton.

Les résultats obtenus dans ce travail nous amènent aux conclusions suivantes:

Pour le déchets d'aluminium

- ❖ Dans le présent travail on a fait une étude sur la valorisation des déchets d'aluminium dans la formulation des mortiers soumis à des températures élevées. Le sable est substitué par le déchet d'aluminium (0/3) mm à des proportions (0, 2.5, 5, 7.5 et 10% du poids de sable) et comparé par rapport au mortier témoin.
- ❖ La diminution de masse volumique proportionnellement avec l'augmentation de taux de déchets. Alors on peut dire que l'incorporation de déchets d'aluminium joue un rôle d'allègement pour les mortiers ou béton.
- ❖ L'augmentation de pourcentage du déchet incorporé dans la pâte de ciment augmente la quantité d'eau requise pour avoir une consistance normale de mortier.

Pour le Méta kaolin

- ❖ Le métakaolin améliore la performance du béton à travers deux actions : la première est physique attribuée à sa finesse permettant le remplissage des pores alors que la deuxième est chimique due au caractère pouzzolanique du métakaolin
- ❖ Les propriétés des métakaolins dépendent fortement de leur surface spécifique, de la taille des particules et de leurs compositions chimiques et minéralogiques
- ❖ La substitutions de 10 et 15% du ciment par du métakaolin augmente la résistance à la compression et à la traction
- ❖ Le métakaolin améliore les performances mécaniques des mortiers

Ce qui permet de conclure que le métakaolin et l'aluminium est un substitut efficace capable de réduire le contenu de ciment pour l'obtention de mortiers équivalents, économiques et contribuer à réduire le dosage en ciment et ainsi à résoudre les problèmes liés à l'environnement dans la production du ciment.



Références bibliographiques



Références bibliographiques:

Références bibliographiques :

- [1]- William-D Jr Callister, « Science et génie des matériaux », Modulo Edition, 2001.
- [2]- R. dupain, R. Lanchon, J-C. Saint-Arroman « Granulat, sols, ciment et béton » Edition Casteilla, Paris, 2004.
- [3]- L. Baali, Cours de MDC, Licence Université de M'sila.
- [4]- Bétons et mortiers : préparation et mise en oeuvre sur chantier / Cimbéton. - 2e édition . -La Défense : Cimbéton, 1996 . - 1 vol. (32 p.)
- [5]- Arezki Tagni Hamou «Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons, chapitre 8 », Thèse de Doctorat, 2014, Université de Sherbrooke.
- [6]- CIMBETON, les bétons : formulation, fabrication et mise en oeuvre, Tome2, 137p, janvier 2013,
- [7]- GCI712 « Durabilité et réparation du béton », département Génie civil, Université de Sherbrooke-Canada, Avril, 2009.
- [8]- P. Sylver, science des matériaux, université pierre et marie curie 2005, 2006.
- [9]- BOUALI Khaled « Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires », mémoire de magister (spécialité: Génie des Matériaux) Option Physique et Mécanique des matériaux Université M'hamed Bougara-Boumerdes 2013/2014.
- [10]- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Clinker>
- [11]- Fiche d'info d'aluminium: [_p2_classification.pdf](#).
- [12]- <http://forum-btp.blogspot.com/2014/05/la-pate-de-ciment.html>
- [13]- https://fr.wikipedia.org/wiki/Gestion_des_d%C3%A9chets
- [14]- A.KERBOUCHE. « Influence des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des bétons » mémoire de magister .UST Oran 2009.
- [15]- http://www.argeco.fr/le_metakaolin.php, consulté le 24.04.2018
- [16]- T.W.Davies, (Equipment for the study of flash heating of particules suspension). High Temperature Technology. Vol. 3, 1984, p141-147.
- [17]- J.P.Henin, A. Pinoncely, (FCB et la calcination flash). Mines et Carriers Technologies, Vol.6, 1986, p249-252.
- [18]-S.Salvador, (Production de pouzzolanes de synthese par calcination flash de sols argileux : etude des produits et conception d'une installation). These INSA de Toulouse, 1992, 177p.
- [19]- P. Y. Chen, M. L. Lin, Z. Zheng, (On the origin of the name kaolin and kaolin deposits

Références bibliographiques:

- of the Kauling and Dazhou areas), Kiangsi, China, Applied Clay Science, Vol. 12, 1997,p125.
- [20]- H. H. Murray, (Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite : a general overview), Applied Clay Science, Vol. 17, 2000, p207-221.
- [21]- Université de Bechar, FIMAS (Laboratoire Fiabilité des Matériaux et Structures), BP.417, 08000, BECHAR, Algérie 04.05.2018
- [22]- Université USTHB, SGM (Laboratoire des sciences et Génie des Matériaux), BP.32, El Alia Bab Ezouar, 16000, ALGER, Algérie 04.05.2018
- [23]- Université de Saad Dahleb-Blida, Algérie, sdkenai@yahoo.com 03.05.2018
- [24]- L2MGC-Université de Cergy Pontoise - 5 Mail Gay-Lussac, Neuville Sur Oise 95031 Cergy Pontoise Cedex. Elhem.ghorbel@u-cergy.fr 20.03.2018.
- [26]- [Buchwald et al., 2003] Buchwald A., Kaps C., Hohmann M., (2003). "Alkali-activated binders and pozzolan cement binders-compete binder reaction or two sides of the same story".
- [25]- [Granizo et al., 2002] Granizo M.L., Alonso S., Blanco-Varela M., Palomo A., (2002). "Alkaline activation of metakaolin: effect of calcium hydroxide in the products of reaction". Journal of the American Ceramic Society, Vol. 85(1), pp. 225-231.
- [27]- [Shi et Qian. 2000] Shi C., Qian J., (2000). "High performance cementing materials from industrial slags - A review". Resources, Conservation and Recycling, Vol. 29(3), pp. 195-207.
- [28]- [Shi et al., 2006] Shi C., Krivenko P.V., Roy D. M., (2006). "Alkali-Activated Cements and Concretes". Taylor & Francis, London, 376 p.
- [29]- [Shi, 1998] Shi C., (1998). "Pozzolanic reaction and microstructure of chemical activated lime-fly ash pastes". American Concrete Institute Materials Journal, Vol. 95(5), pp.537-545.
- [30]- [Sajedi et Razak, 2011] Sajedi F., Razak H. A.,(2011). "Comparison of different methods for activation of ordinary portland cement-slag mortars". Construction and Building Materials, Vol. 25(1), pp.30-38.
- [31]- [Vornovitch et al., 1976] Vornovitch I. V., DRON R., (1976). "Action des differents activants sur l'hydratation du laitier granule". Bull. Liaison Labo. P. ET Ch -83– Ref. 1810.
- [32]- [Shi, 2001] Shi C., (2001). "An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans". Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 28(5), pp. 778-786.
- [33]- [Shi et Day., 1996] Shi C., Day R. L., (1996). "Selectivity of alkaline activators for the activation of slags". Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 18(1), pp. 8-14.

Références bibliographiques:

- [34]- [Qian et al., 2001] Qian J., Shi C., Wang Z., (2001). "Activation of blended cements containing fly ash". *Cement and Concrete Research*, Vol. 31(8), pp. 1121-1127.
- [35]- [Valenti et Sabatelli, 1980 ; cite par Ramachadran, 1996] Valenti, G. L., Sabatelli, V., (1980). "The Influence of Alkali Carbonates on the Setting and Hardening of Portland and Pozzolanic Cements". *Silic. Ind.*, vol.45, pp.237-242.
- [36]- [Sereda et al., 1980] Sereda P. J., Feldman, R. F., Ramachandran V. S., (1980). "Influence of Admixtures on the Structure and Strength Development". 7th Intern. Cong. Chem. Cement, Part VI, pp. 32-44, Paris.
- [37]- [Rosenberg et al., 1977, cite par Ramachadran, 1996] Rosenberg A. M., Gaidis J. M., Kossivas T. G., Previte R. W., (1977). "A Corrosion Inhibitor Formulated with Calcium Nitrite for Use in Reinforced Concrete". *ASTM STP-629*, pp. 89-99.
- [38]- [Aggoun et al., 2008] Aggoun S., Cheikh-Zouaoui M., Chikh N., Duval R., (2008). "Effect of some admixtures on the setting time and strength evolution of cement pastes at early ages". *Construction and Building Materials*, Vol. 22(2), pp. 106-110.
- [39]- [De silva et Glasser, 1992] De Silva P.S., Glasser F.P., (1992). "pozzolanic activation of metakaolin". *Advanced in Cement Research*, Vol. 4(16), pp. 167-178.
- [40]- [Alonso et Palomo, 2001] Alonso S., Palomo A., (2001). "Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature, activator concentration and solids ratio". *Materials Letters*, Vol. 47(1-2), pp. 55-62.
- [41]- [Pacewska et al., 2008] Pacewska B., Wilinska I., Blonkowski G., (2008). "Investigations of cement early hydration in the presence of chemically activated fly ash: Use of calorimetry and infrared absorption methods". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol.93(3), pp. 769-776.
- [42]- [Marciano et Battagin, 1997] Marciano E., Battagin A.F., (1997). "The influence of alkali activator on the early hydration and performance of Portland blast furnace slag cement". *proceedings of the 10th international congress on the chemistry of cement*, Gothenburg, Sweden, June 2-6, Vol. 3, 3ii103, 4pp.
- [43]- [Jiang, 1997, cite par Shi et al., 2006] Jiang W., (1997). "Alkali-activated Cementitious Materials: Mechanisms, Microstructure and Properties". Thesis, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, US.
- [44]- [Allahverdi et Ghorbani, 2006] Allahverdi A., Ghorbani J., (2006). "Chemical activation and set acceleration of lime-natural pozzolan cement". *Ceramics – Silikaty*, Vol. 50(4): 193-199.

Références bibliographiques:

- [45]- [Zivica, 2006] Zivica V., (2006). "Effectiveness of new silica fumes alkali activator". *Cement and Concrete Composites*, Vol.28(1), pp.21–5.
- [46]- [Jolicoeur et al., 1992, cite par Shi et al., 2006] Jolicoeur C., Simard M. A., Sharman J., Zamojska R., Dupuis M., Spiratos N., Douglas E., Malhotra V. M., (1992). "Chemical activation of blast-furnace slag, An overview and systematic experimental investigation". In Malhotra (ed.) *Advances in Concrete Technology*, Ministry of Supply and Services, Ottawa, Canada, pp. 471–502.
- [47]- [Shi et Day, 1993a, rapporte par Shi, 2001] Shi, C., Day, R. L., (1993a). "Acceleration of strength gain of limenatural pozzolan cements by thermal activation". *Cement and Concrete Research*, Vol. 23(4), pp. 824–832.
- [48]- [Shi et Day, 1993b, rapporte par Shi, 2001] Shi, C., Day, R. L., (1993b). "Chemical activation of blended cement made with lime and natural pozzolans". *Cement and Concrete Research*, Vol. 23(6), pp. 1389–1396.
- [49]- [Polettini et Pomi, 2009] Polettini A., Pomi R., (2009). "Chemical activation in view of mswi bottom ash recycling in cement-based systems". *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 162(2-3), pp.1292- 1299.
- [50]- [Li et Ding, 2003] Li Z., Ding Z. (2003). "Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag". *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp.579 584.
- [51]- [Cabrera et Rojas, 2000] Cabrera J., Rojas M.F., (2000). "Mechanism of hydration of metakaolin-lime-water system". *Cement and Concrete Research*, Vol.31(4), pp.177-182.
- [52]- [Rojas et Cabrera, 2001] Rojas M.F., Cabrera J. (2001). "Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and water blended cement systems at 20°C". *Cement and Concrete Research*, Vol.31(4) pp.519-527.
- [53]- [Lima et Dal Molin, 2005] Lima Souza P.S., Dal Molin D.C.C., (2005). "Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity". *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp.1993-1998.
- [54]- [Andriolo et Sgarboza, 1985] Andriolo F.R., Sgarboza B.C., (1985). *Proceedings of the 7th International Conference of AAR*, Ed. Grattan-Bellow, pp. 66-70.
- [55]- [Prince et al., 2001] Prince W., Castanier G., Gafferi J.L.I,(2001). "Similarity between alkali aggregate reaction and the natural alteration of rocks". *Cement and Concrete Research*, Vol.31 (2), pp.271-276

Références bibliographiques:

- [56]- [Garcia-Diaz, 1995] Garcia-Diaz E., (1995). "Reactivite pouzzolanique des metakaolinites : correlations avec les caracteristiques mineralo-gitologiques des kaolinites". These de Doctorat de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne.
- [57]- [De Silva et Glasser., 1993] De Silva P. S., Glasser F. P., (1993). "Phase relations in the system CaO-Al₂O₃-SiO₂- H₂O relevant to metakaolins-calcium hydroxide hydration". Cement and Concrete Research, Vol. 23, pp.627-639.
- [58]- [Murat, 1983] Murat M., (1983). "Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals: IIIInfluence of mineralogical properties of the raw kaolinite on the reactivity of metakaolonite". Cement and Concrete Research, Vol13(4), pp. 511-518.
- [59]- [Wild et al., 1998] Wild S., Khatib J M., Roose L J., (1998). "Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of Portland cement–metakaolin pastes". Advanced Cement Research, vol.10 (3), pp.109–119.
- [60]- [Kinuthia et al., 2000] Kinuthia J.M., Wild S., Sabir B.B., Bai J., (2000). "Self-compensating autogenous shrinkage in Portland cement-metakaolin fly ash pastes". Advanced Cement Research, Vol. 12 (1), pp. 35-43.
- [61]- [Sha et Pereira, 2001] Sha W., Pereira G.B., (2001). "Differential scanning calorimetry study of ordinary Portland cement paste containing metakaolins and theoretical approach of metakaolins activity". Cement and Concrete Research, Vol. 23, pp.455-461.
- [62]- [San Nicolas, 2011] San Nicolas R., (2011). "Approche performantielle des betons avec metakaolins obtenus par calcination flash". These de Doctorat, Universite de Toulouse.
- [63]- [Wu et Young, 1984] Wu Z., Young J.-F., (1984). "The hydration of tricalcium silicate in the presence of colloidal silica". Journal of Materials Sciences, Vol. 19, pp.3477-3486.
- [64]- [Ambroise et al., 1994] Ambroise J., Maximilien S., Pera J., (1994). "Properties of metakaolin blended cements". Advanced Cement-Based Materials, Vol. 1(4), pp. 161-168.
- [65]- [Zhang et Malhotra, 1995] Zhang M.H., Malhotra V.M., (1995). "Rice-husk ash paste and concrete: Some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste". Cement and Concrete Research, Vol. 26, pp.963-977.
- [66]- [Sanchez de Rojas et Frias, 1996] Sanchez de Rojas M.I., Frias M., (1996). "The Pozzolanic activity of different materials, its influence on the hydration heat in mortars". Cement and Concrete Research, Vol. 26 (2), pp.203-213.