



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



## **Université Amar Thelidji- Laghouat**

**FACULTE: GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE**

**DEPARTEMENT : GENIE CIVIL**

### **MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par : Nakmouche Mohammed Djallal Eddine**

**DOMAINE : Sciences et Technologies**

**FILIERE : Génie Civil**

**OPTION : Matériaux en Génie Civil**

### **Thème**

**Formulation et caractérisation du béton à base de ciment  
d'argile calcinée calcaire**

#### **Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Qualité</b>	<b>Grade</b>
Mr. Belaidi Salah	Président	Pr
Mr. Ahmida Ferhat	Examineur	MAA
Mr. Bouziani Tayeb	Promoteur	Pr
Mr. Ammar Benguite	Co-Promoteur	MAA

**Promotion: Septembre – 2022**

## Remerciement

Je tiens profondément à remercier tout d'abord ALLAH l'unique qui a permis à ce travail de voir la lumière. Je remercie l'ego de sa persévérance et de sa diligence. Je remercie infiniment mes encadreurs pour son attention, ces conseils et cette précieuse aide.

« **Tayeb bouziani, Ammar benguitte** »

Pour avoir bien voulu encadré ce travail et pour tous ses conseils précieux. Je remercie également tous les enseignants du département de génie civil ainsi que ceux du membre du jury **Mr. Belaidi Salah** et **Mr. Ahmida Ferhat** tous les professeurs qui ont participé à mon cursus (scolaires et universitaire).

Pour cette occasion, j'aimerais remercier les personnes qui m'ont fait part de cette expérience et pour tous ses conseils précieux «**Fatiha, Kawthar, Jasmine, Yassine et Belkacem**». En fin, je voudrais exprimer ma reconnaissance à tous mes amis pour leurs soutiens moral et matériel ...

# **Dédicace**

A mes parents,

A mes frères,

A mes amis,

A toute la famille Nakmouche

# صياغة وتوصيف الخرسانة على أساس الأسمنت الطيني المصنوع من الحجر الجيري

## ملخص

في هذه الدراسة، حاولنا تحديد قوة الخرسانة التي تحتوي على الميكاولين ومسحوق الرخام عن طريق الاستبدال الجزئي للأسمنت في الخرسانة، واستبدلنا الميكاولين بدخان السيليكا.

استبدال الاسمنت بهذه الإضافات المعدنية في حدود 10% إلى 50% يعتمد على خصائص المادة و تأثيرها على الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للخرسانة.

و ينظر في العديد من الخصائص, وهي تأثير الإضافات, و تأثير المادة المساعدة و نسبة كتلة الماء إلى الإسمنت ليؤدي الى بناء خرسانة تستند إلى مواد محلية تتسم بالقوة الجيدة و الحد الأدنى من المسامية و المتانة المقبولة.

الخرسانة مصنوعة من ثلاث إضافات معدنية ميكاولين و مسحوق رخامي و دخان السيليكا. نستخدم تركيبات خرسانية مرجعية, (النوع الأول) خرسانة غير مستبدلة و الأخرى (النوع الثاني) مستبدلة بنسبة مئوية تبلغ حوالي 50% (35% ميكاولين, 15% مسحوق رخامي).

بالإضافة إلى ذلك, يتم استبدال النوع الثاني بنسب مئوية من دخان السيليكا في (10, 20, 30, 40 و 50%) ولكن تستبدل من نسبة الميكاولين (النوع الثالث).

تظهر النتائج التجريبية أن هناك علاقة بين استبدال الملخصات بالإضافات المعدنية و ان قابلية العمل تأثرت بالسلوك الميكانيكي. كما لوحظ ان قابلية عمل الخرسانة تنخفض مع نسبة إضافة 10% من دخان السيليكا على عكس السلوك الميكانيكي.

**الكلمات الرئيسية:** إضافة معدنية، خرسانة، ميكاولين، قابلية العمل، مسحوق رخامي، خصائص ميكانيكية.

# Formulation et caractérisation de béton à base de ciment d'argile calcinée calcaire

## Résumé

Dans cette étude, nous avons tenté de déterminer la résistance du béton contenant de métakaolin et poudre de marbre par le remplacement partiel du ciment dans le béton, par ailleurs on substituée le métakaolin avec fumée de silice.

La substitution de ciment par ces additions minérales dans la gamme de 10% à 50%. Cette approche est basée sur les propriétés du matériau et son effet sur les propriétés physico mécanique du béton.

Plusieurs paramètres sont considérés, à savoir: L'effet des additions, l'effet de l'adjuvant et le rapport E/C, pour aboutir à la confection d'un béton à base des matériaux locaux caractérisé par une bonne résistance, une porosité minimale et une durabilité acceptable.

Des bétons formulés avec trois additions minérales le métakaolin, poudre de marbre et fumée de silice. On utilisant des formulations de béton référentiel, (1<sup>er</sup> type) un béton non substituée et l'autre (2<sup>eme</sup> type) substituée avec un pourcentage de l'ordre 50% (35% métakaolin, 15% poudre de marbre).

Par ailleurs, on substituée le 2<sup>eme</sup> type avec des pourcentages de fumée de silice à (10, 20, 30, 40 et 50%), mais a la place de métakaolin (c'est le 3<sup>eme</sup> type).

Les résultats expérimentaux montrent qu'il y a une relation entre la substitution des bétons avec des addition minérales et l'ouvrabilité été influe sur la comportement mécanique.

On observe après les résultats que l'ouvrabilité de béton est diminuée avec des pourcentages de fumée de silice supérieure à 10% contrairement au comportement mécanique.

**Mots-Clés** : addition minérale, béton, métakaolin, ouvrabilité, poudre de marbre, propriétés mécaniques.

## Table des matières

Dédicace.....	i
Remerciement.....	..ii
Résumé.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	viii
Introduction générale .....	2
<b><u>Chapitre I : Généralités sur les bétons</u></b>	
I.1 Introduction.....	6
I.2 Historique.....	6
I.3 Définition d'un béton.....	6
I.4 Composition du béton .....	6
I.4.1 Ciments.....	7
I.4.2 Les granulats .....	8
I.4.3 Adjuvants .....	10
I.4.4 Eau de gâchage .....	11
I.4.5 Les additions .....	11
I.5 Ajouts cimentaires.....	12
I.5.1 Définition des ajouts cimentaires.....	12
I.5.2 Bénéfices de l'utilisation des ajouts cimentaires.....	12
I.5.2.a. Avantages économiques.....	13
I.5.2.b. Avantages écologiques.....	13
I.5.2.c. Avantages techniques .....	14
I.6. Les différents types d'ajouts.....	14
I.6.1 Le méta kaolin.....	14
I.6.2. Laitier des hauts fourneaux.....	15

I.6.3. Cendres volantes.....	15
I.6.4. Additions calcaires.....	15
I.6.5. Fumée de silice.....	16
I.6.6. Pouzzolanes.....	16
I.7. Les différents types du béton.....	17
I.7.1. Béton auto plaçant.....	17
I.7.2. Le béton a haute performance.....	17
I.7.3. Béton ordinaire.....	17
I.7.4. Béton préfabriqué.....	17
I.7.5. Béton de fibre.....	17
I.8. Formulation du béton .....	18
I.8.1 Méthode de Dreux-Gorisse .....	19
I.8.1. a. Données de bas.....	19
I.8.1. b. Dosage en ciment.....	19
I.8.1. c. Dosage en eau .....	19
I.8.1. d. Analyses granulométriques des granulats .....	19
I.8.1. e. Dosage des granulats .....	20
I.8.2 Conclusion .....	21
Conclusions.....	21

## Chapitre II : Matériaux et essais

II.1 Introduction .....	24
II.2 Les matériaux utilisés .....	25
II.2.1 Le sable .....	25
II.2.1.a Le Coefficient d’Absorption d’Eau.....	25
II.2.1.b Module De Finesse.....	25
II.2.1.c Masse Volumique .....	26
II.2.1.d Equivalent de sable .....	27

II.2.1.e Analyse Granulométrique.....	28
II.2.2 Gravier .....	30
II.2.2.a Analyse granulométrique par tamisage.....	31
II.2.2.b Masse volumique.....	33
II.2.2.c Détermination du coefficient d'absorption d'eau.....	34
II.2.3 Le ciment .....	35
II.2.4 Eau de gâchage.....	36
II.2.5 Superplastifiant .....	36
II.2.6 Les addition .....	36
II.3 Formulations des bétons .....	38
II.3.1 La formulation selon la méthode de Dreux-Gorisse.....	38
II.3.2 Composition des différents bétons ordinaires .....	41
II.3.3 Confection Des Éprouvettes .....	43
II.3.4 Moulage et démoulage .....	43
II.4. Présentation des essais expérimentaux .....	44
II.4.1. Essai Sur Béton Frais .....	44
II.4.2. Essais Sur Béton Durci .....	45
CONCLUSION.....	46
<b><u>Chapitre III : Résultats expérimentaux et analyse</u></b>	
III.1. Introduction .....	48
III.2. Résultats et interprétations .....	48
III.2.1. Essai sur béton frais .....	48
III.2.2. A l'état durci .....	50
CONCLUSION.....	53
Conclusion générale.....	56
Références bibliographiques .....	58

## Liste des figures

**Figure I.1** les composant du béton.

**Figure I.2.** Nature chimique des différents types de ciment.

**Figure I.3** mode d'action de superplastifiant.

**Figure I.4** Variation relatives moyennes du dosage en eau E et du nombre de chocs du test.

**Figure II.1** : La masse volumique apparente.

**Figure II.2** : la masse volumique absolue.

**Figure II.3** : Equivalent de sable

**Figure II.4** : Tamiseuse utilisée Insérer

**Figure II.5.** Analyse granulométrique

**Figure II.6** : Gravier utilisée

**Figure II.7.** La courbe granulométrique des graviers (3/8, 8/16).

**Figure II.8** : le ciment utilisé CEM I 42,5

**Figure II.9** superplastifiant MEDAFLOW

**Figure II.10** les kaolins

**Figure II.11** fumée de silice par Teknachem Groupe Hasnaoui (Siltek Powder)

**Figure II.12:** Essai de cône d'ABRAMS

**Figure II.13** Courbe de référence

**Figure II.14** : Bétonnière utilisée

**Figure II.15** : La mise en place du béton

**Figure II.16** : l'essai de mesure de consistance du béton frais

**Figure II.17** : l'essai de compression a l'état durci

**Figure II.18** : l'essai de flexion a l'état durci.

**Figure III.1** : valeurs d'affaissement pour les 07 formulations du béton.

**Figure III.2** : Essai d'affaissement du béton

**Figure III.3** : distribution des particules de dans une éprouvette BMKPM20%

**Figure III.4** : Essai d'écrasement

**Figure III.5** : variation de la résistance a la compression en fonction du temps pour les 07 formulations du béton

**Figure III.6** : Essai de la traction par flexion

**Figure III.7** : variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du temps pour les 07 formulations du béton.

## Liste des tableaux

**Tableau I.1** : La teneur des constituants du béton en poids et en volume.

**Tableau I.2.** Classification des ciments selon la norme EN 206.

**Tableau. I.3.** Classification des ajouts.

**Tableau II.1.** Caractéristiques du sable d'oued m'zi

**Tableau II.2.** Analyse granulométrique du sable.

**Tableau II.3** .propriété des graviers.

**Tableau II.4.** Analyse granulométrique.

**Tableau II.5.** Analyse granulométrique

**Tableau II.6** : Masse volumique apparente du gravier utilisée

**Tableau II. 7** : Masse volumiques absolues des gravies utilisée

**Tableau II. 8:** Caractéristiques physiques et mécaniques de CEM I 42.5 R.

**Tableau II.9.** Caractéristiques de MEDAFLOW 30

**Tableau II.10** propriétés du poudre « SILTEK POWDER»

**Tableau II.11:**Le volume des composants en ( $m^3$ )

**Tableau II.12:** les composants en masse(Kg)

**Tableau II.13** Liste des différents bétons étudiés.

**Tableau II.14.** Les quantités des constituants des mélanges des bétons ordinaires.

**Tableau III.1** : valeurs d'affaissement pour les 07 formulations du béton.

**Tableau III.2:** valeurs de Résistance à la compression pour les 07 formulations du béton.

**Tableau III.3** : valeurs de Résistance à la traction par flexion pour les 07 formulations du béton.

# INTRODUCTION GENERALE

La protection de l'environnement fait partie des occupations majeures des chercheurs à l'heure actuelle. Les procédés de production du ciment, même s'ils se sont beaucoup améliorés vis-à-vis de l'environnement, restent tout de même polluants. Il faudrait alors réduire la production du ciment par l'utilisation d'autres matériaux moins polluants, ou essayer de substituer même partiellement au ciment des produits issus du recyclage des éco-produits ou des déchets pour l'élaboration des bétons et des mortiers à haute performance.

En plus des recyclages des éco-produits, on peut aussi valoriser les matériaux locaux telle que: le kaolin (K) qui est une argile présente en abondance dans la plupart des régions du monde.

De petites quantités sont utilisées pour la fabrication des céramiques de haute qualité, le reste est non exploité comme le kaolin de Milia de wilaya Jijel.

La formulation des bétons et des mortiers qui, pendant très long temps, a reposé sur une simple association ternaire ciment, eau et granulats, s'est progressivement compliquée au point qu'un mortier ou béton actuel comporte de façon courante cinq constituants : ciment, eau, granulats, additions minérales et adjuvants.

Cet accroissement du nombre de constituants est, d'un point de vue pratique, très avantageux car il conduit, généralement, à l'amélioration très significative des performances mécaniques, physiques et durabilités des mortiers et bétons.

L'incorporation des additions minérales est maintenant une technique importante d'amélioration des propriétés du béton et mortier telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc.

Ces additions minérales affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement liée avec le développement de la résistance, la durabilité des matériaux durcis.

Néanmoins, pour profiter pleinement de ces avantages et ainsi choisir la meilleure solution permettant d'optimiser la formulation, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de ces nouveaux composants (additions minérales et adjuvants) et leurs actions sur les propriétés des bétons et des mortiers.

L'objectif de cette étude, est premièrement l'utilisation du kaolin (K) après transformation en métakaolin (MK) et la fumée de silice comme activité liante dans le ciment pour améliorer la compacité de la matrice cimentaire.

Cette argile (MK) est calcinée dans un four de laboratoire à une température de 750 °C pendant une durée de 4 heures, après son refroidissement, l'argile calcinée est broyée.

La calcination de l'argile à 750 °C permet le départ de l'eau de constitution (la déshydroxylation) et la formation de la métakaolinite avec une structure amorphe ce qui la rend plus réactive que l'argile de départ (K).

Notre travail consiste principalement à élaborer de nouveaux ciments substituée partiellement avec des additions minérales (ajouts cimentaire) visant à la protection de l'environnement et à la valorisation des matériaux locaux existants en grandes quantités mais sous-exploitées.

Les additions concernées par cette étude sont : poudre de marbre (PM), fumée de silice (FS) et le métakaolin (MK) et sont utilisés comme substitution de 15 à 35% PM, MK successivement, quand à la fumée de silice, elle passe de 10 à 50% sur 35% MK.

Dans un but de complémentarité et de comparaison, trois combinaisons d'additions ont été adoptées, il s'agit de combinaisons binaires et ternaires.

Nous étudions l'effet de ces combinaisons d'additions sur les performances mécaniques : la résistance de compression et traction par flexion.

Ce mémoire s'articule sur trois chapitres :

Le premier chapitre se divise en deux partie : La première partie est une synthèse bibliographique, son objectif est de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur l'action des additions dans les matériaux cimentaires afin d'éclaircir en particulier comment elles contribuent à l'activité liante du ciment. Cette partie porte sur les définitions des additions minérales et leurs caractéristiques et les différents ajouts minéraux cimentaires et leur formulation de béton.

On présente ensuite les avantages des additions minérales, leurs mécanismes d'action dans les matrices cimentaires et leurs fonctions.

Cette partie traitera aussi les différents mécanismes d'action de ces ajouts seront présentés de façon à mieux comprendre le comportement vis-à-vis de la présence de ces ajouts.

Une description détaillée des matériaux et du matériel utilisés dans cette recherche est donnée dans le deuxième chapitre.

On y trouve aussi un aperçu sur les techniques expérimentales ainsi que l'ensemble des essais réalisés que ce soit à l'état frais ou à l'état durci.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse et la discussion des résultats obtenus.

Des commentaires sont formulés sur la base d'une comparaison des résultats de 7 compositions de béton (Témoin, binaire et ternaire) en présence des additions minérales en ce qui concerne le comportement mécanique.

**CHAPITRE I :**  
**RECHERCHE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**  
**GENERALITE SUR**  
**LES BETONS**

## I.1 Introduction

Le béton est le matériau de construction par excellence depuis presque un siècle. Constituer à l'origine de seulement quatre composants (gravillons, sable, ciment et eau), leurs méthodes de formulation ont évolué d'un savoir-faire empirique vers la science des matériaux.

Ces constituants (composants) sont dosés, en fonction de leurs propriétés, de manière à obtenir, après réaction physico-chimique entre eux, un produit solide dont les caractéristiques physiques et mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches les plus résistantes.

Dans la mesure où le ciment est un liant hydraulique lui-même fabriqué avec des minéraux naturels, le béton peut être considéré comme une roche artificielle.

Nous abordons dans ce travail un type de béton qui est le béton ordinaire, est un matériau de construction composite constitué d'un mélange de granulats (sable, gravillons) et d'un liant. Le liant appelé ciment, c'est un liant hydraulique.

## I.2 Historique

Le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction bon marché, malléable au moment de le mettre en place et résistant ensuite.

La forme la plus ancienne du béton remonte à 7000 ans avant JC. Un matériau similaire était connu des égyptiens et des Romains, mais l'essor réel du béton tel qu'on le connaît aujourd'hui est dû à l'anglais Joseph Aspidine qui en 1824 fait breveter le ciment Portland [1].

## I.3 Définition d'un béton

Un béton est un matériau composite résultant du mélange judicieusement dosé d'un squelette granulaire (gravier et sable) et d'une matrice pâteuse durcissable composée de ciment, d'eau, le plus souvent, parfois d'adjuvants. Après le durcissement il devient un matériau pierreux [1].

**Tableau I.1** : La teneur des constituants du béton en poids et en volume [2].

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (%)	14-22	1-6	7-14	60-78
Poids (%)	5-9	--	9-18	63-85

## I.4 Composition du béton

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit.

La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide.

Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.



**Figure I.1** les composants du béton.

### I.4.1 Ciments

Le ciment se présente sous la forme d'une poudre fine de couleur grise ou blanche.

La dimension des grains de ciment est caractérisée par la valeur de la finesse Blaine qui mesure la surface totale des grains contenus dans un gramme ; la finesse Blaine des ciments est de l'ordre de 3 500 à 4 500 cm<sup>2</sup>/g [3].

La dimension caractéristique des grains de ciment est d'environ 30 à 50μ.

Le clinker, issu de ce procédé, est employé pour la préparation d'une majorité des ciments.

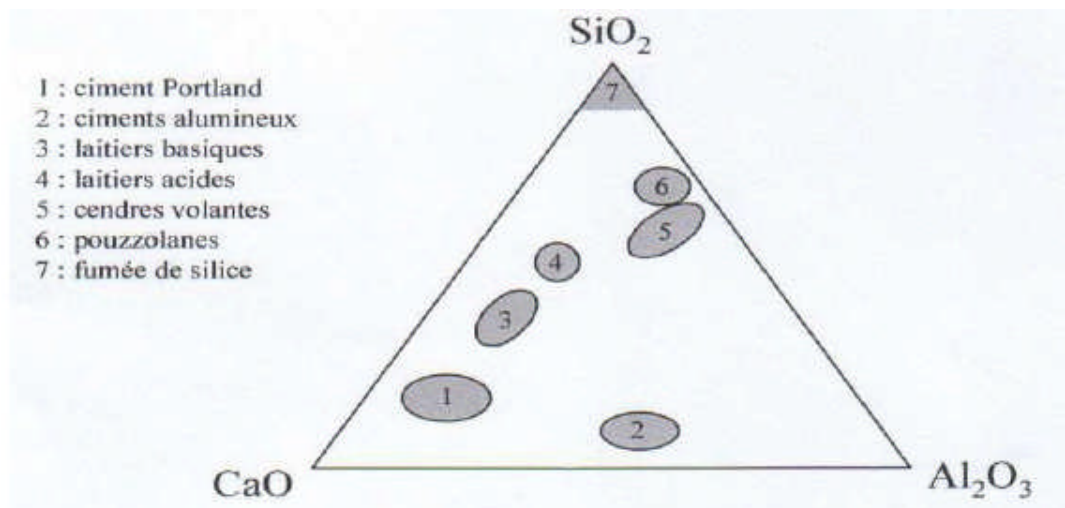
Les clinkers peuvent avoir des compositions variables mais les oxydes principaux sont toujours les mêmes [4] : la chaux (CaO), la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et la ferrite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Le clinker est un matériau de base auquel on peut trouver nombre d'ajouts pour la préparation des ciments, qui sont disponibles sur le marché. On peut ainsi ajouter, des cendres volantes, des laitiers de hauts fourneaux, ou encore des fumées de silice.

On modifie ainsi la composition du ciment et par voie de conséquence ses propriétés (figure I.2).

Les compositions sont normalisées en fonction des compositions et des mélanges (tableau I.2)

**Tableau I.2.** Classification des ciments selon la norme EN 206 [5]

	Ciment Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pouzzolanique		Ciment au laitier et aux cendres		
	CEM I	CEM II/A	CEM II/B	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/C	CEM IV/A	CEM IV/B	CEM V/A	CEM V/B	
Clinker (K)	95%	80% ≤94%	65% ≤79%	35% ≤64%	20% ≤34%	5% ≤19%	65% ≤90%	45% ≤64%	40% ≤64%	20% ≤39%	
Laitier (S)	*	6%≤ total ≤20%	21%≤ total ≤35%	36% ≤65%	66% ≤80%	8% V 9%	*	*	18% ≤30%	31% ≤50%	
Pouzzolanes (Z)	*	(fumée de silice ≤10%)	(fumée de silice ≤10%)	*	*	*	10%≤ total	36%≤ total	18% ≤total	31%≤ total	
Cendres ≤ 50% siliceuses (V)	*			*	*	*	≤35% (fumée de silice ≤10%)	≤55% (fumée de silice ≤10%)	≤30%	≤50%	Cendres
Fumée de silice (D)	*			*	*	*	*	*	*	*	*
Cendres calciques (W)	*			*	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Calcaires (L)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	



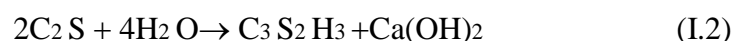
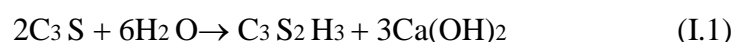
**Figure I.2.** Nature chimique des différents types de ciment [5]

Un ciment est constitué de phases anhydres qui vont s'hydrater en présence d'eau. C'est l'ensemble de ces réactions que l'on définit comme l'hydratation du ciment [6,7].

Le clinker, constitutif de l'essentiel de ce que l'on nomme un ciment Portland, peut être pris en exemple pour décrire le processus d'hydratation. Dans le cas de ciments dits « mélangés », les réactions sont identiques, seules vont changer les proportions ou certaines stœchiométries des hydrates formés [8, 7].

La pâte fraîche obtenue se présente comme un système dispersé de grains de silicates [8,9].

Les équations (1) et (2) représentent les réactions chimiques produites durant l'hydratation et donnant les composés hydratés du matériau selon [10, 11, 12] :



Les deux hydrates principalement formés sont les silicates de calcium hydratés de la forme  $C_3S_2H_3$ , notés « CSH » et la portlandite  $Ca(OH)_2$  symbolisée CH.

D'autres composés mineurs sont également formés durant l'hydratation, tels que des hydroxydes d'aluminium, des aluminates de calcium hydratés ou de l'ettringite [13].

La quantité d'eau apportée durant la fabrication du matériau est généralement supérieure à la quantité utile à l'hydratation complète du ciment, pour favoriser la maniabilité à l'état frais.

Cependant, avec l'avancée de l'hydratation, le cheminement de l'eau jusqu'aux phases anhydres est gêné par les hydrates déjà formés [14, 15].

Ainsi, même si elle ralentit considérablement, l'hydratation se poursuit dans la microstructure du matériau par diffusion de l'eau.

La quantité d'eau est généralement rapportée à la quantité de ciment et cela est noté rapport eau sur ciment (E/C). Plus le matériau présente un E/C faible, plus sa matrice cimentaire est dense.

De ce fait, le rapport E/C est un paramètre qui influence la microstructure se formant durant l'hydratation [16, 17].

#### **I.4.2 Les granulats**

Les granulats (gravillon et sable) forment les squelettes du béton. Les granulats doivent être chimiquement stables lors du contact avec les autres constituants. Pour obtenir un béton avec de bonnes caractéristiques, le choix de l'agrégat s'avère alors très important. La nature, la forme et la granularité des granulats influencent fortement les propriétés des bétons à l'état frais et durci [18, 17].

Les granulats constituent la phase dominante du béton, (70% du volume) et se caractérisent par les propriétés intrinsèques de la roche dont ils sont issus : coloration, caractéristiques mécaniques et physico-chimiques [19].

Ils vont influencer directement les propriétés esthétiques, mécaniques et la durabilité du béton.

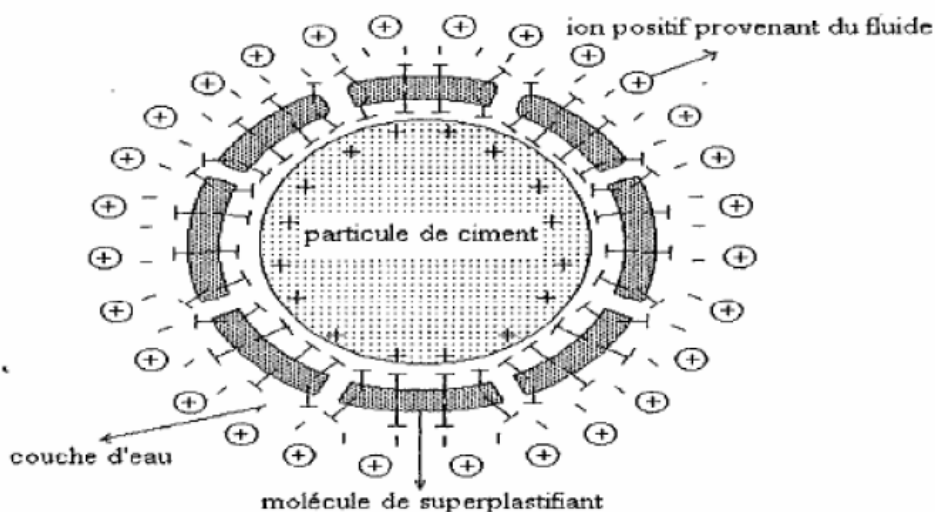
Le granulats est généralement composé de fillers, de sable, de gravier, de pierres concassées, de galets ou de cailloux (selon sa dimension) [20].

Ils sont obtenus en exploitant des gisements de sable et de gravier d'origine alluvionnaire, terrestre ou maritime, en concassant des roches massives, ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition [21, 17].

#### **I.4.3 Adjuvants**

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés en faibles quantités au béton frais afin d'en améliorer certaines propriétés.

Ils représentent entre 1 et 5 % du poids du ciment, leur rôle et leur efficacité dépendent de la nature du produit chimique et de l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton frais [22, 23].



**Figure I.3** mode d'action de superplastifiant.

#### I.4.4 Eau de gâchage

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques.

L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation.

L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences de la norme NF EN 1008, les autres comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, eaux d'origine souterraine, eaux naturelles de surface et eaux de rejet industriel, eau de mer, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire ainsi que les essais chimiques [24].

#### I.4.5 Les additions

Selon la norme NF EN 206-1 ; une addition est un « matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières ».

Les additions minérales sont aussi connues par leur influence sur les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci, et améliorent considérablement la fluidité dans certains cas d'addition, elles améliorent aussi la granulométrie», qui est un remplissage par les éléments les plus fins (de

taille inférieure à 80  $\mu\text{m}$ ) des vides laissés par les éléments les plus gros (sables) et éventuellement, une contribution directe à la résistance par la formation d'hydrates, en général à long terme [25].

## I.5 Ajouts cimentaires

### I.5.1 Définition des ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires sont des matériaux que l'on mélange au ciment Portland et donnent certaines propriétés au béton, grâce à leurs activités hydrauliques et/ou pouzzolaniques.

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

### I.5.2 Classification des ajouts minéraux

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs. Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le (Tableau I.3) ci dessous. [26]

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

Tableau. I.3. Classification des ajouts. [26]

### **I.5.3 Bénéfices de l'utilisation des ajouts cimentaires : [27]**

La recherche d'un liant moins coûteux en utilisant des déchets industriels et des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour palier au déficit dans la fabrication du ciment portland.

Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques.

Les ajouts sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir des avantages économiques écologiques et techniques.

#### **I.5.3.a. Avantages économiques [27]**

Typiquement, le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie.

La plupart des matériaux susceptibles de remplacer le ciment dans le béton sont des sous-produits, et, à ce titre, demandent relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment portland.

Toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et l'utilisateur final et le coût élevé du transport qui en résulte risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels.

De même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés, bien qu'il soit difficile à prédire, le prix des ajouts cimentaires pourrait se comparer à celui du ciment si la demande en béton ne diminuait pas, dans ce monde que menace le CO<sub>2</sub>, et c'est bien le gaz carbonique qui pourrait finalement décider de la valeur de ces denrées.

#### **I.5.3.b. Avantages écologiques [27]**

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique.

De ce fait, le remplacement du ciment Portland par les ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO<sub>2</sub>.

En général, l'utilisation de cendres volantes et de fumées de silice comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie, le laitier, par contre, doit être granulé et sa granulation provoque l'émission d'environ 0,07 tonne de CO<sub>2</sub> par tonne de LGHF (laitier granulé de haut fourneau) produit.

À cela, il faut ajouter les émissions de CO<sub>2</sub> causées par le transport des matériaux jusqu'au chantier de construction, les études montrent que le transport (par camion et chemin de fer) d'une tonne d'ajouts cimentaires sur une distance de 1 000 Km libère environ 0,022 tonne de CO<sub>2</sub>. Il convient donc de considérer tous les paramètres avant d'établir les avantages écologiques des ajouts cimentaires sur le ciment.

#### **I.5.4.c. Avantages techniques [27]**

D'abord, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux à très grande surface active, comme les fumées de silice). Ensuite, les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance à la compression, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.

Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments composés améliorent la résistance à la fissuration en climat chaud.

### **I.6. Les différents types d'ajouts**

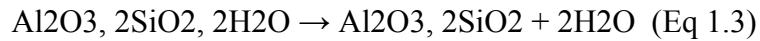
#### **I.6.1 Le méta kaolin**

Le métakaolin est une pouzzolane de synthèse, issue du traitement de la kaolinite, argile assez courante sur la surface du globe, le métakaolin appartient à la famille des ultrafines, particules minérales de dimension inférieure à 10 µm, utilisées dans les bétons et les mortiers pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité.

Le métakaolin (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) [28] et une calcination flash (très rapide en comparaison avec la calcination lente) [29-30] et [31].

À une température élevée, la kaolinite perd son eau par des hydroxylation selon l'équation suivante (Équation 1.3):

Kaolinite → Métakaolin + eau



(En notation cimentière)

L'incorporation du métakaolin dans la fabrication des bétons, permet de transformer la chaux en hydrates stables, d'homogénéiser les teintes, de réduire les efflorescences, d'améliorer la compacité, et d'éclaircir les parements.

Le métakaolin est considéré comme une matière pouzzolanique en raison de sa surface spécifique élevée et de la silice amorphe qui entre dans la composition de cet aluminosilicate [32].

Elle permet d'augmenter la résistance ainsi que la durabilité des matrices cimentaires, due à la réduction de la taille des pores et la fermeture de la connectivité de ces pores, ainsi qu'une perméabilité plus faible que celle des bétons avec fumée de silice ou cendres volantes [33].

### **I.6.2. Laitier des hauts fourneaux**

Le laitier vitrifié moulu provient du broyage du laitier vitrifié granulé ou bouleté, qui provient de la fabrication de la fonte et il est obtenu par la trempe du laitier à sa sortie du four. Par contre, les laitiers de fonte non trempés cristallisés et donc non vitrifié sont utilisés comme ballast ou comme granulats et ne peuvent pas être utilisés comme ajouts cimentaire. De même les laitiers d'aciéries et tous les laitiers de métaux non ferreux qui peuvent contenir des éléments nuisibles aux bétons tels que les sels métalliques sont exclus de l'industrie de ciment. La norme NF P18-506 [34] distingue deux classes de laitier A et B ; la dernière est la plus réactive, sa finesse étant plus élevée. Les laitiers conformes à la norme NF P 18-506 [34] sont des additions de type II au sens de la norme EN 206-1[35] mais seuls les laitiers de classe B sont substituables au ciment au sens et selon les conditions de cette norme

### **I.6.3. Cendres volantes**

Les cendres volantes sont des poudres fines constituées principalement de particules vitreuses de forme sphérique, issues de la combustion du charbon pulvérisé en présence ou non de CO-combustibles, ayant des propriétés pouzzolaniques et composées essentiellement de SiO<sub>2</sub> et de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; la proportion de SiO<sub>2</sub> réactive constituant au moins 25 % de la masse.

Les cendres volantes conformes à la norme NF EN 450 [36] sont des additions de type II au sens de la norme EN 206-1 [35], et sont substituables au ciment au sens et selon les conditions de cette norme.

#### **I.6.4. Additions calcaires**

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection. Ils proviennent de gisements de roches calcaires qui peuvent être dolomitiques, massives ou meubles.

Les additions calcaires conformes à la norme NF P18-508 [37] sont du type I selon la norme EN 206-1 [35] et sont substituables au ciment au sens et sous les conditions de cette norme.

#### **I.6.5. Fumée de silice**

La fumée de silice est une poudre amorphe finement divisée résultant de la production d'alliages de silicium ou contenant du silicium. Elle est entraînée depuis la zone de combustion des fours par les gaz, vers le système de captage. La norme distingue deux classes A et B ; les fumées de silice de classe A étant les plus riches en silice et sont plus fines. Une fumée de silice de classe A ou B, conforme à la norme est une addition du type II au sens de la norme EN 206-1 [35] et est substituable au ciment au sens et aux conditions de cette norme.

Toutefois, compte tenu de la très grande finesse de cette addition et de leur très grande réactivité avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, leur proportion est limitée à 10 % et leur emploi est réservé aux bétons contenant un superplastifiant.

#### **I.6.6. Pouzzolanes**

Le terme pouzzolane tire son nom de Pouzzoles, une localité près de Naples en Italie, riche en terre volcanique. La pouzzolane naturelle est une roche siliceuse légère produite par des projections volcaniques basaltiques. Elle comporte de la silice, de l'alumine, de l'oxyde ferrique qui lui donne sa couleur rouge, ainsi que de la chaux et de la magnésie. La pouzzolane possède une structure alvéolaire. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise. Il existe également des pouzzolanes artificielles,

obtenues par calcination de terres argileuses, de basaltes ou de schistes : leurs propriétés sont équivalentes à celles de la pouzzolane naturelle.

Elle sert comme ajout cimentaire afin de réduire le cout de ciment. Elle est également utilisée pour le jardinage, les constructions, l'assainissement non collectif et les routes. L'application de la pouzzolane dans les jardins peut être multiple : en grosse granulométrie la pouzzolane est utilisée comme roche décorative (paillage) comparable à l'écorce de pin pour limiter l'enherbement, par exemple, dans les massifs d'arbustes ; et en petite granulométrie la pouzzolane sert dans la composition du substrat de certaines cultures comme les bonsaï, l'hydrophone ou pour le lagunage des piscines biologiques. Ce type de roche assure un bon drainage au niveau racinaire. Les bords coupants de la pouzzolane favorisent le développement des racinelles. [37]

### **I.7. Les différents types du béton [38]**

Le matériau, fait l'exception pour le remplacer dans la construction ; techniquement et économiquement. Nous assistons a différents types de béton d'où :

#### **I.7.1. Béton auto plaçant (BAP)**

Un béton auto plaçant est un béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuent par le seul effet gravitaire) et conférant à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration

#### **I.7.2. Le béton a haute performance (BHP)**

Se caractérisent par une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre; un rapport eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4. Ils présentent une structure très dense, une faible porosité et une très bonne résistance à la pénétration d'agents agressifs

#### **I.7.3. Béton ordinaire**

Est un ensemble homogène obtenu par le mélange du ciment, de l'eau, des granulats et quelque fois d'adjuvants. Sa masse volumique se situe aux alentours de 2500 Kg/m<sup>3</sup>. Les bétons peuvent être armés ou non, ou même précontraints. Ses performances (durabilité, résistance au feu, etc.) varient selon ses composants. C'est un matériau dont le moulage est assez facile et il est adapté à tous les types de formes d'ouvrage [39].

#### **I.7.4. Béton préfabriqué**

La fabrication est une solution technique qui consiste à fabriquer à l'avance des produits (éléments de construction) généralement en grand nombre répétitif soit en usine ou sur chantier pour être montés sur place par la suite.

#### **I.7.5. Béton de fibre**

Ce sont des bétons dans lesquels ont été incorporées des fibres de nature, dimension et géométrie diverses, dans le but de leur conférer certaines propriétés. De façon générale, ces bétons présentent : une meilleure résistance à la traction, une amélioration des résistances mécaniques (jeune âge, chocs, cisaillement, usure, abrasion...), une bonne maîtrise de la fissuration, une amélioration en matière de plasticité, de moulage et d'aspect de surface [39].

#### **I.8. Formulation du béton**

L'étude de la composition d'un béton, consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de partie d'ouvrage en cause.

##### **I.8.1 Méthode de Dreux-Gorisse**

C'est une méthode pratique qui simplifie et rend la formulation du béton plus pragmatique. Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telles que la dimension des granulats(D).

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton. Il faut déterminer au préalable le rapport E/C [24].

##### **I.8.1. A. Données de base**

- Nature de l'ouvrage :

La connaissance de la nature de l'ouvrage est nécessaire : ouvrage massif ou au contraire élancé et de faible épaisseur, faiblement ou très ferrillé. Il sera nécessaire de connaître l'épaisseur minimale et les dispositions des armatures dans les zones les plus ferrillées distance minimale entre elle et couverture par rapport au coffrage.

- **Resistance souhaité :**

En général on demandera une résistance  $f_{c28}$  en compression à 28 jours et compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique, il faudra viser une résistance moyenne à 28 jours :  $f_c$  supérieur à  $f_{c28}$  car :  $f_{c28} = f_c - 0,8$ .

Si l'on admet un coefficient de variation moyen de l'ordre de 20 %. On pourra adopter la règle approximative pour la résistance moyenne à visée :  $f_{c28} = 1.15 f_c$

- **L'ouvrabilité désirée :**

Elle est fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massifs ou plus ou moins ferrillé), de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage etc... Elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par affaissement au cône comme indiqué au tableau I.4

Classe	Affaissement en mm	Propriété du béton frais
S1	10 – 40	Ferme, très secs et peu maniable
S2	50 – 90	Plastique, à humidité moyenne et à maniabilité moyenne
S3	100 – 150	Très plastique, très humide et à maniabilité élevée
S4	160 – 210	Fluide, très humide et à maniabilité élevée
S5	$\geq 220$	Très fluide, très humide et à maniabilité élevée

**Tableau I.4** affaissement au cône

### I.8.1. B. Dosage en ciment

On commencera par évaluer approximativement le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée  $f_c$ .

$$f_c = G \cdot F_{CE} (C/E - 0.5)$$

Avec :

$f_c$  : résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa.

$F_{CE}$  : classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa.

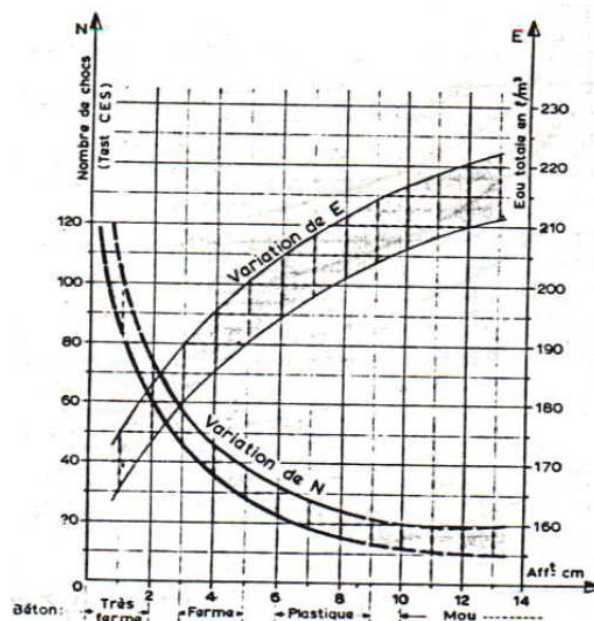
$C$  : dosage en ciment (en kg/m<sup>3</sup>).

$E$  : dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour 1m<sup>3</sup>).

$G$  : coefficient granulaire.

### I.8.1. C. Dosage en eau

L'abaque de la (**figure 1.2**), donne l'allure générale de la variation du dosage en eau en fonction de l'affaissement au cône et du test d'ouvrabilité C.E.S. Il ne s'agit bien entendu que d'ordre de grandeur pour des bétons courants et permettant de dégrossir rapidement une formule de composition mais comme pour tous les facteurs de cette composition c'est par des essais sur des éprouvettes que les divers éléments constitutifs, et l'eau tout particulièrement, peuvent être définitivement dosée



**Figure I.4** Variation relatives moyennes du dosage en eau E et du nombre de chocs du test [9] d'ouvrabilité C.E.S en fonction de l'affaissement dans le cas des bétons composés suivant la présente méthode (le dosage en sable augmente quand le dosage en ciment diminue).

### I.8.1. D. Analyses granulométriques des granulats

Sur un graphique d'analyse granulométrique, on trace la courbe granulaire de référence AOB.

- Le point 0 est repéré par ses coordonnées : [0,01 ; 0]
- Le point B est repéré par ses coordonnées suivantes : [D ; 100], (D: le diamètre du plus gros granulat).
- Le point de brisure A à des coordonnées ainsi définies:
  - ✓ En abscisse (à partir de la dimension D tamis)
    - si  $D < 20\text{mm}$  l'abscisse est  $D/2$ .
    - si  $D \geq 20\text{mm}$  l'abscisse est située au milieu du « Segment gravier » limité par le module 38 (5mm) et le module correspondant à D.
  - ✓ En ordonné

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

**K** : est un terme correcteur qui dépend du dosage de ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassé (et c'est surtout le sable dont l'influence est ici prépondérante) et également du module de finesse du sable.

### I.8.1. E. Dosage des granulats

- La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur la même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants.
- On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats, en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point à 5% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite.
- On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage, le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats  $g_1$ ,  $g_2$  et  $g_3$ , par exemple si C est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :  $V_c = C/3.1$  (en admettant une masse spécifique de 3.1 pour les grains de ciment, valeur moyenne habituellement admise).
- On choisira dans (Annexe 4) une valeur convenable du coefficient de compacité en fonction de D, de la consistance et de l'efficacité du serrage.

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :  $V_G = (1000 \times \gamma) - V_c$

Les volumes absolus de chacun des granulats sont par suite :

$$V_1 \geq g_1 V_G$$

$$V_2 \geq g_2 V_G$$

$$V_3 \geq g_3 V_G$$

Si les masses spécifiques de chacun de ces granulats sont  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  et  $\omega_3$  les masses de chacun deux sont :

$$P_1 = V_1 \omega_1$$

$$P_2 = V_2 \omega_2$$

$$P_3 = V_3 \omega_3$$

Masse totale des granulats :  $G = (P_1 + P_2 + P_3)$

### I.8.2 Conclusion

On peut conclure que la formulation d'un béton dépend de plusieurs paramètres, à savoir :

- La granulométrie ;
- La qualité des granulats ;
- Les masses volumiques des granulats ;
- La classe du ciment ;
- L'environnement.
- Le rapport C/E
- La maniabilité (affaissement) désirée.
- La compacité désirée.

## Conclusions

La qualité d'un béton dépend de son constituant qui a une influence sur son comportement à l'état frais et ses caractéristiques mécaniques à l'état durci.

Le béton c'est un matériau composite et hétérogène résulte d'un mélange intime de ciment, de granulats, d'eau, et présente des propriétés mécaniques qui peuvent être très supérieures à celles des roches naturelles.

Cependant, et vue son indispensabilité dans le domaine de la construction, le matériau béton a été et reste toujours sujet à de multiples travaux d'étude et de recherche. Même si l'avancée est jugée considérable, les études d'adaptation et de formulation s'avèrent nécessaires à travers quelques études présentes dans la littérature, on peut dire que :

- D'après la littérature, il n'est pas aisé de dégager des règles générales d'emplois de combinaison de ciments, additions et d'adjuvants dans les mortiers ou bétons ; cela vient de la disparité des objectifs des scientifiques, de ce que leur travail vise à caractériser, ou rechercher des propriétés particulières, de l'abondance des paramètres de composition, de matériaux locaux.
- Elle permet de dégager une problématique importante concernant la compatibilité entre les différents constituants du béton. La formulation des matériaux durables, reste actuellement une des difficultés majeures à son développement et son utilisation.
- Les différentes méthodes de composition du béton sont tout à fait adaptées pour comparer des formulations en fonction de la variation des caractéristiques d'un composant du mélange comme la classe du ciment ou la granulométrie des granulats.

Ces méthodes ont fait depuis longtemps leurs preuves pour les bétons courants et disposent d'un retour d'expérience positif important.

# CHAPITRE II :

# MATERIAUX ET

# ESSAIS

## II.1 Introduction

L'incorporation des ajouts minéraux est maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du béton telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc.

Ces additions affectent de manière significative sur la rhéologie des matériaux cimentaires à état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance, la durabilité des matériaux durcis.

Dans cette partie, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre programme de recherche.

La caractérisation des matériaux de construction tels que la matrice cimentaire nécessaire pour la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration de certaines interprétations ne pourraient être possibles que si les différents constituent sont bien caractérisés.

Le programme expérimental a été réalisé en deux phases successives.

Dans une première phase, six ciments composés ont été fabriqués en substituant une partie du ciment par deux ou trois ajouts cimentaires disponibles localement (poudre de marbre, métakaolin et fumée de silice) sont souvent analysés par comparaison d'effet sur le béton avec un ciment portland.

La caractérisation des propriétés physico-mécaniques de matériaux cimentaires est d'une importance cruciale puisque ces propriétés impactent directement le comportement des bétons, à l'état frais qu'à l'état durci.

Les propriétés physiques des matériaux à prendre en compte sont la morphologie, la granulométrie, la finesse ainsi que la surface spécifique, en prenant en compte leur effet sur le comportement à l'état frais des bétons.

La caractérisation des propriétés mécanique par essai de compression est importante pour assurer que l'élément étudiée été réalisée avec une bonne résistance ou pas, pour diagnostique l'effet des matériaux cimentaires sur le béton à l'état durci.

Dans une deuxième phase, une étude préliminaire a été réalisée en confectionnant un béton à base de filler en optant pour un rapport E/C = 0.5, avec adjuvant et une finesse de mouture des ciments constante. Des pourcentages d'ajouts cimentaires (poudre de marbre, métakaolin et fumée de silice) sont substitués au ciment. Pour chaque mélange, des éprouvettes 7x7x28 cm<sup>3</sup> coulées et conservées dans la chambre humide ont été soumis à des essais de compression.

Afin de bien évaluer La composition du béton est obtenue en utilisant la méthode de formulation de Dreux- Gorisse [40].

Nous avons également testé de béton (l'état frais et l'état durci) en prenant les mêmes proportions des constituants que les formulations ont été caractérisés mécaniquement à 7, 14, 28 jours.

## II.2 Les matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans notre étude sont des matériaux locaux, nous avons effectué des études expérimentale qui concerne leurs caractéristiques au saine du laboratoire de génie civil à l'université Ammar Thelidji de Laghouat.

### II.2.1 Le sable

Le sable de base de notre recherche provient d'Oued M' ZI.

Le sable d'Oued M'Zi (Région de Laghouat) est un sable alluvionnaire siliceuse car il est constitué majoritairement du Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), il est caractérisé par des particules de forme roulée et de surface lisse. [41]

Les caractéristique physique et analyse granulométrique du sable sont illustrées dans les tableaux (II.1, II.2).

**Tableau II.1.** Caractéristiques du sable d'oued m'zi

	<b>Mapp</b> (g/cm <sup>3</sup> )	<b>Mabs</b> (g/cm <sup>3</sup> )	<b>Mf</b>	<b>ES %</b>	<b>Coeff</b> <b>Ab%</b>
<b>Sable 0/5</b>	1.50	2.60	2.30	96	0.84

#### II.2.1.a Le Coefficient d'Absorption d'Eau (la norme NF P 18-554)

Le coefficient d'absorption d'eau  $A_b$  représente la capacité d'absorption d'eau d'un granulat, plus il est élevé, plus le matériau est absorbant.

L'essai d'absorption consisté à déterminer le taux d'absorption d'eau des granulats secs durant 48 heures

#### II.2.1.b Module De Finesse (la norme NF P18-540)

Le module de finesse (Mf) est un facteur très important qui nous permet de juger la qualité du sable est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5mm.

Le sable alluvionnaire d'oued M'ZI c'est un sable préférentiel.

### II.2.1.c Masse Volumique

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

➤ **Masse volumique apparente : (la norme NF P 18-554)**

Principe :

Remplir un récipient d'un volume connu, et en déterminer la masse.



**Figure II.1** : La masse volumique apparente.

Donc la masse volumique apparent est égale :

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Avec :

$\rho$  : masse volumique apparente (g/cm<sup>3</sup>)

M : masse de l'échantillon de granulats (g)

V : volume du récipient utilisé pour la masse (cm<sup>3</sup>)

➤ **Masse volumique absolue : (la norme NF P 18-555)**

C'est la masse d'un corps par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains.

A l'aide d'une éprouvette graduée on peut facilement déterminer cette valeur :

- On remplit l'éprouvette de liquide inerte vis-à-vis de l'échantillon étudié jusqu'au niveau V1
- On rajoute une masse M de l'échantillon à étudier
- On lit le niveau actuel du liquide, soit V2



**Figure II.2** : la masse volumique absolue.

La masse volumique absolue :

$$\rho = \frac{M}{V2 - V1}$$

**Commentaire :**

La masse volumique absolue pour les granulats est  $> 2 \text{ g/cm}^3$ , selon la norme NF.P 18-301 ce sont des granulats courants.

**II.2.1.d Equivalent de sable : (NF P 18-598)**

Pour les sables, la propreté peut se contrôler par l'essai d'équivalent de sable.

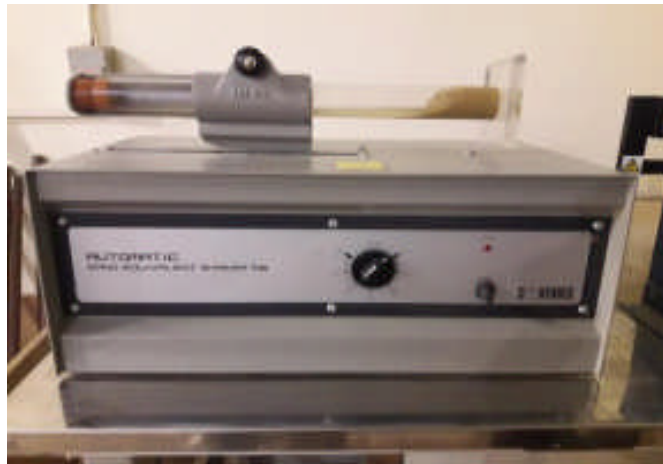
L'essai consiste à :

- Remplir une éprouvette graduée jusqu'au 1er trait.
- Verser la quantité de sable (environ 120 g), et laisser reposer pendant 10 min,
- Boucher l'éprouvette, et la faire agiter 90 fois aller et retours dans le sens horizontal puis replacée verticalement.

- Laver le sable avec une solution lavant, et laisser reposer l'ensemble pendant 20 min
- Mesurer la hauteur du sable propre (h2) et la hauteur du sable propre + éléments fins (h1).
- La mesure de h2 n'est pas toujours aisée, ce qui conduit à faire la mesure la plus précise : ES.
- Descendre lentement le piston dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, l'immobiliser, mesurer h2.

L'équivalent de sable est défini par :

$$ES\% = \frac{h2}{h1} * 100$$



**Figure II.3** : Equivalent de sable

Donc le Sable est propre - à faible pourcentage de fines argileuses Convenant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.

$$70 \leq ES < 80$$

### II.2.1.e Analyse Granulométrique

La connaissance de la courbe granulaire des granulats est nécessaire pour déterminer la composition optimale du béton.

#### Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains consistant 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 au placé en partie supérieur des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne des tamis.



**Figure II.4 : Tamiseuse utilisée Insérer**

### Calculs et résultat

L'analyse granulométrique est faite selon la norme NF P18-560 [27], la masse testée répond à la condition générale suivante :

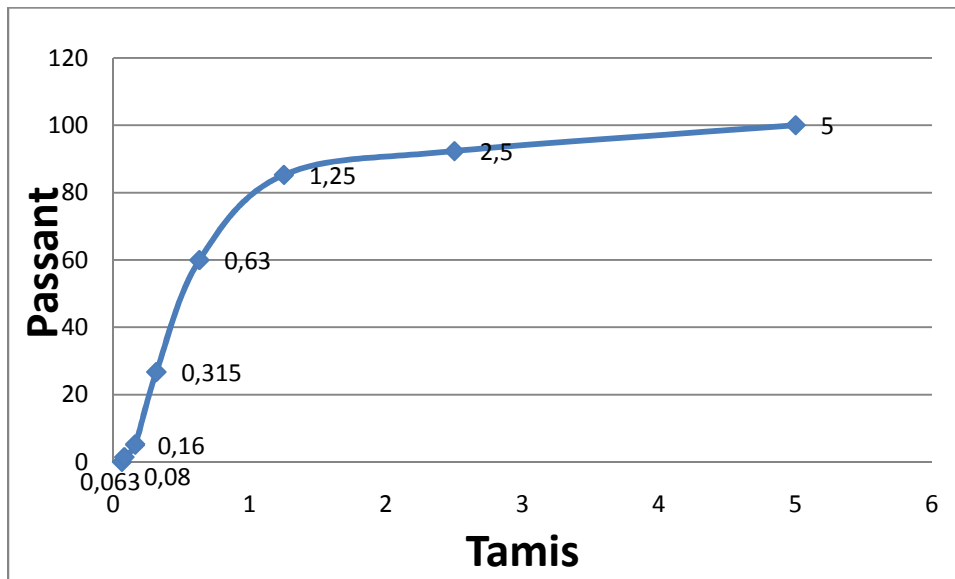
$$200D < M < 600 D$$

D : taille maximale des granulats.

Les résultats de l'analyse granulométrique obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous (tableau II.2)

**Tableau II.2.** Analyse granulométrique du sable.

Tamis (mm)	R (g)	RC	RC%	P%
5	0	0	0	100
2.5	38.4	38.4	7.68	92.32
1.25	35.33	73.73	14.746	85.254
0.63	126.59	200.32	40.064	59.936
0.315	166.1	366.4	73.284	26.716
0.16	107.78	474.2	94.84	5.16
0.08	18.74	492.94	98.588	1.412
Fond	5.38	498.32	99.664	0.336



**Figure II.5.** Analyse granulométrique.

### II.2.2 Gravier

Le gravier est un gravier calcaire provenant de la station de concassage ouazane, constituée de deux classes gravier 3/8 et gravier 8/16.

Les propriétés du gravier sont données sur le tableau **II.3** ci-dessous.

Gravier	Mapp (g/cm <sup>3</sup> )	Mabs (g/cm <sup>3</sup> )	Coeff Ab %
3/8	1.29	2.69	4.85
8/16	1.25	2.65	3.48



**Figure II.6 :** Gravier utilisée

### II.2.2.a Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933 – 5]

#### ➤ But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

#### ➤ Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau.

Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableaux et sous forme graphique

#### ➤ Préparation de l'échantillon pour l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme (NA EN 933-5).

La masse  $M$  de l'échantillon pour essai doit être supérieure à  $0.2D$ , avec  $M$  exprimé en kilogrammes et  $D$  plus grande dimension spécifiée en millimètres [42].

### Gravier 3/8

Selon l'analyse faite au laboratoire, on a obtenu les résultats des passants cumulés de gravie (8/15), représentés dans le **tableau (II.4)**.

**Tableau II.4.** Analyse granulométrique.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus (%)	Passant (%)
10	3.93	3.93	0.252	99.738
8	67.54	71.47	4.76	95.24
6.3	267	338.47	22.56	77.44
5	412.08	750.55	52.70	47.3
3.15	597	1387.55	92.50	7.5
2.5	90.87	1478.43	98.56	1.44
Fond		1948.51	100	0.0

**Gravier 8/16**

Selon l'analyse faite au laboratoire, on a obtenu les résultats des passants cumulés de gravie (8/16), représentés dans le **tableau (II.5)**.

**Tableau II.5.** Analyse granulométrique

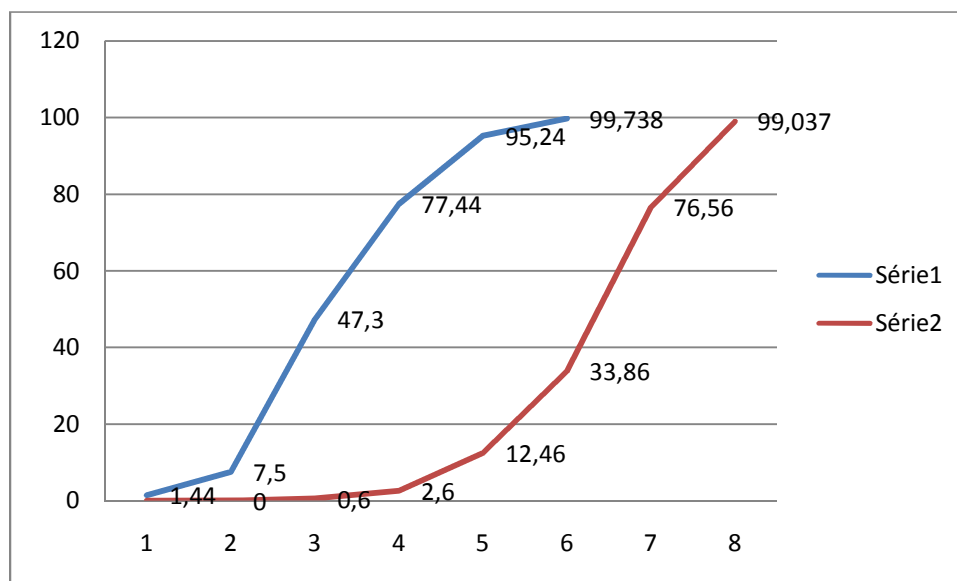
Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus (%)	Passant (%)
16	49	49	0.963	99.037
12.5	1143.5	1192.5	23.44	76.56
10	2173	3365.5	66.14	33.86
8	1104	4469.5	87.84	12.46
6.3	486	4955.5	97.4	2.6
5	102	5057.5	99.4	0.6
Fond	30.5	5088	100	0.0

Les différentes courbes granulométriques des gravies utilisés sont montrées sur la figure suivant :

Avec :

Série 1 : fraction 3/8

Série 2 : fraction 8/16

**Figure II.7.** La courbe granulométrique des graviers (3/8, 8/16).

### II.2.2.b Masse volumique

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité sur le volume de ce corps.

Il ne faut pas confondre entre la masse volumique et la densité : une densité est le quotient entre la masse d'un certain volume d'un matériau et la masse du même volume d'eau à 4°C, c'est – à – dire une grandeur sans unité

Comme il existe le volume apparent et le volume absolu, on distinguera :

➤ **Masse volumique apparente ( $\gamma$ )**

C'est la masse d'un corps par unité de volume total y compris des vides entre les grains de constituants.

➤ **Mode opératoire**

Le poids apparent est déterminé par pesage d'un volume déterminé du matériau séché jusqu'à la formulation du poids

- Peser le récipient à vide M1.
- On verse le gravier d'une hauteur de 10 cm dans un récipient de poids M1
- On remplit le récipient de gravier arasé au niveau de séparé supérieure par une réglette
- On pèse le récipient avec le gravier on le poids M2

$$\gamma_{\text{app}} = \frac{M2 - M1}{V}$$

M1 : Masse de récipient

M2 : Masse de récipient + gravier

V : Volume du récipient

**Tableau II.6** : Masse volumique apparente du gravier utilisée

Fraction	Essai n°	$\gamma_{\text{app}}(\text{g/cm}^3)$	$\gamma_{\text{moy}}(\text{g/cm}^3)$
3/8	01	1.30	1.29
	02	1.28	
	03	1.29	
8/16	01	1.25	1.25
	02	1.23	
	03	1.27	

➤ **La masse volumique absolue( $\rho$ )**

La masse volumique absolue (spécifique) (est la masse d'un corps par unité de volume de la matière pleine sans aucun vide entre les grains.

➤ **Mode opératoire**

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume  $V_1$  D'eau.
- Peser Un échantillon sec  $M$  De granulats et l'introduire dans l'éprouvette en primant soin d'éliminer tous les bulles d'air.
- Le liquide montre dans l'éprouvette, lire le volume de l'ensemble  $V_2$
- La masse volumique est alors :

$$\gamma_{\text{abs}} = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

$V_1$  : Volume d'eau.

$V_2$  : Volume d'eau + gravier.

$M$  : Masse de gravier.

**Tableau II. 7** : Masse volumiques absolues des gravies utilisée

Fraction	Essai n°	$\gamma_{\text{abs}}(\text{g/cm}^3)$	$\gamma_{\text{moy}}(\text{g/cm}^3)$
3/8	01	2.69	2.69
	02	2.69	
	03	2.69	
8/16	01	2.64	2.65
	02	2.65	
	03	2.66	

### II.2.2.c Détermination Du Coefficient D'absorption D'eau

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne comme ceux d'origine volcanique qui est préjudiciable, en particulier, au dosage en eau des bétons ce qui influe a sa la résistance.

En effet, la détermination du coefficient d'absorption d'eau permet d'évaluer la quantité d'eau retenue par la porosité des granulats afin d'en tenir compte pour le dosage en eau efficace lors de la formulation des bétons.

- **Principe de la mesure [43] :** On détermine un coefficient d'absorption qui est le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon.

Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20°C. Le coefficient d'absorption d'eau  $A_b$  est défini par la relation :

$$A_b = \frac{M_0 - M_1}{M_0} 100$$

$M_0$ : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105° C.

$M_1$  = masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée comme suit :

Ainsi pour le cas de nos essais, après séchage de nos matériaux à l'étuve à 105° nous avons trouvé :

- Pour les gravillons de la classe 3/8,  $m_0$  (g)
- Pour les gravillons de la classe 8/16,  $m_0$  (g)

Après imbibition :

- Pour les gravillons de la classe 3/8,  $m_1$  (g)
- Pour les gravillons de la classe 8/16,  $m_1$  (g)

### II.2.3 Le ciment

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment **CEMI 42.5 R**, provient de la cimenterie "**BISKRIA CIMENT**" c'est un ciment pour les travaux dans les milieux agressifs, les bétons haut performances et a une résistance rapide à court terme.



**Figure II.8 :** le ciment utilisé CEM I 42,5 R

**Tableau II. 8:** Caractéristiques physiques et mécaniques de CEM I 42.5 R.

Physique						Mécanique					
Refus (%)	SSB (cm <sup>2</sup> /g)	La consistance (%)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Expansion à chaude (mm)	Résistance a flexion (MPa)			Résistance à compression (MPa)		
						3j	7j	28 j	3j	7j	28j
4.5	3246	25	180	270	0.5	4.8	6.5	8	30.1	44.5	54.3

### II.2.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisé est une eau courante du laboratoire de département de génie civil d'université Laghouat.

### II.2.5 Superplastifiant

Le MEDAFLOW 30 R est un superplastifiant haut réducteur d'eau retardateur de prise formulé à base de polymères de synthèse et combinés ce qui améliore considérablement les propriétés des bétons, fourni par l'entreprise GRANITEX (Alger-Algérie).



**Figure II.9** superplastifiant MEDAFLOW

L'adjuvant MEDAFLOW 30 permet d'augmenter les résistances mécaniques à jeune long terme. Il est applicable à tout type de ciment conforme à la norme EN934-2 NA 774.

La page de dosage recommandée est : 0,6 à 2,5% du poids de ciment, soit 0.5 L à 2 L par 100 Kg de ciment, Ses caractéristiques physiques et chimiques sont représentées dans le tableau (II.9).

**Tableau II.9.** Caractéristiques de MEDAFLOW 30

Superplastifiant	Forme	PH	Couleur	Teneur en chlore	Extrait sec
MEDAFLOW 30	Liquide	7 – 8	Brun clair	< 1%	30%

## II.2.6 Les addition

### ➤ kaolins

Les kaolins utilisée dans notre étude est roche dont le minéral argileux kaolinite provient d'El-Milia wilaya Jijel, carrière Soalka de type KT3 a subi un processus de cuisson pour obtenir le métakaolin comme addition minérale d'un masse volumique réelle  $2.6 \text{ g/cm}^3$ .



**Figure II.10** les kaolins.

### ➤ Fumée de silice

C'est un produit en poudre, constitué par une excellente silice active micronisée, communément appelée « fumée de silice » commercialisée sous le nom « SILTEK POWDER » par Teknachem Algérie SPA groupe Hasnaoui Sidi-Bel-Abbès avec les propriétés suivant :



**Figure II.11** fumée de silice par Teknachem.Groupe Hasnaoui (Siltek Powder)

**Tableau II.10** propriétés du poudre « SILTEK POWDER»

	Physique			Chimique		
	SSB (cm <sup>2</sup> /g)	$\gamma_{abs}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teneur en Na <sub>2</sub> O	Teneur en SiO <sub>2</sub>	Teneur en oxydes (Fe, Al, Mg,Ca)
SILTEK POWDER	22000	1.9	0.65	éq. 0.60 %	>95%	1.00 % ( $\leq$ 1.50)

### ➤ Poudre de marbre

La poudre de marbre (PM) est une roche métamorphique compacte commercialisée par fabrication de revêtement de type carrelage issue.

## II.3 Formulations des bétons

Pour l'étude expérimentale de la formulation du béton, on a utilisé la méthode de DREUX-GORISSE, nous avons respecté les étapes et le mode opératoire de laboratoire tel qu'il est.

### II.3.1 La formulation selon la méthode de Dreux-Gorisse

#### ➤ Résistance visée :

Par sécurité, la résistance visée est majorée de 15% par rapport à la résistance que nous souhaitons obtenir. Ainsi, la résistance visée est obtenue comme suit :

La résistance désirée pour le béton à 28 jours est:  $\sigma_{28j} = 25 \text{ MPa}$

La résistance visée vaut alors:  $\sigma'_{28j} = 1.15 \sigma_{28j} = 1.15 \times 25 = 28.75 \text{ MPa}$

➤ Dosage en ciment et en eau :

La formule ci-dessous permet de calculé la résistance à la compression visée à 28 jours, soit:

$$f_c = G \cdot \sigma'_c \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

$f_c' = \sigma'_{28j}$  résistance visée à 28 jours donc :  $f_c' = 28.75 \text{ MPa}$ .

Avec :

G : coefficient granulaire, donc :  $G = 0.45$ .

$\sigma'_c$  : la classe vrai du ciment ;  $\sigma'_c = 51 \text{ MPa}$ .

➤ Dosage en ciment d'un mètre cube de béton :

Notre étude est sur un béton courant, donc on a choisi le dosage de ciment égal à  $350 \text{ kg/m}^3$ .

- d'après le rapport  $\left( \frac{E}{C} = 0.5 \right)$  la quantité d'eau sera estimé comme suit :

$$E = 350 * 0.5 = 175 \text{ L}$$

- Correction sur le dosage en ciment et le dosage en eau E en fonction de  $D_{\text{Max}}$

$D_{\text{Max}} = 16 \text{ mm}$ , donc :

$$C = C + 4\% = 364 \text{ Kg} ;$$

$$E = E + 4\% = 182 \text{ Kg} ;$$

➤ Cette quantité est confirmée par le calcul théorique par le rapport  $\frac{C}{E}$  et pratiquement par l'affaissement souhaité A au cône d'ABRAMS, nous déduisons, grâce à l'abaque  $\frac{C}{E}$  en fonction de A,



**Figure II.12:** Essai de cône d'ABRAMS.

Tracé de la courbe granulaire de référence AOB :

Nous traçons une courbe de référence OAB avec:

- le point O est repéré par ses coordonnées: [0.01; 0]
- le point B est repéré par ses coordonnées: [D; 100], (D: le diamètre du plus gros granulat).

Le point de brisure A aux coordonnées suivantes:

- en abscisse :
- Le plus gros granulat est  $D = 16\text{mm}$ , donc le point de brisure a pour abscisse:

$$A = D/2 = 8\text{mm}$$

$$\text{- en ordonnée : } Y = 50 - \sqrt{1.25D} + K$$

Avec :  $K' = k + k_s + k_p$ ;  $k_p = 0$  pour les bétons pompée et  $k_s = 6(M_f) - 15$ .

K : Terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage (faible), de la forme des granulats roulés ou concassés, pour notre cas de gravier concassé, donc :  $k = 4$

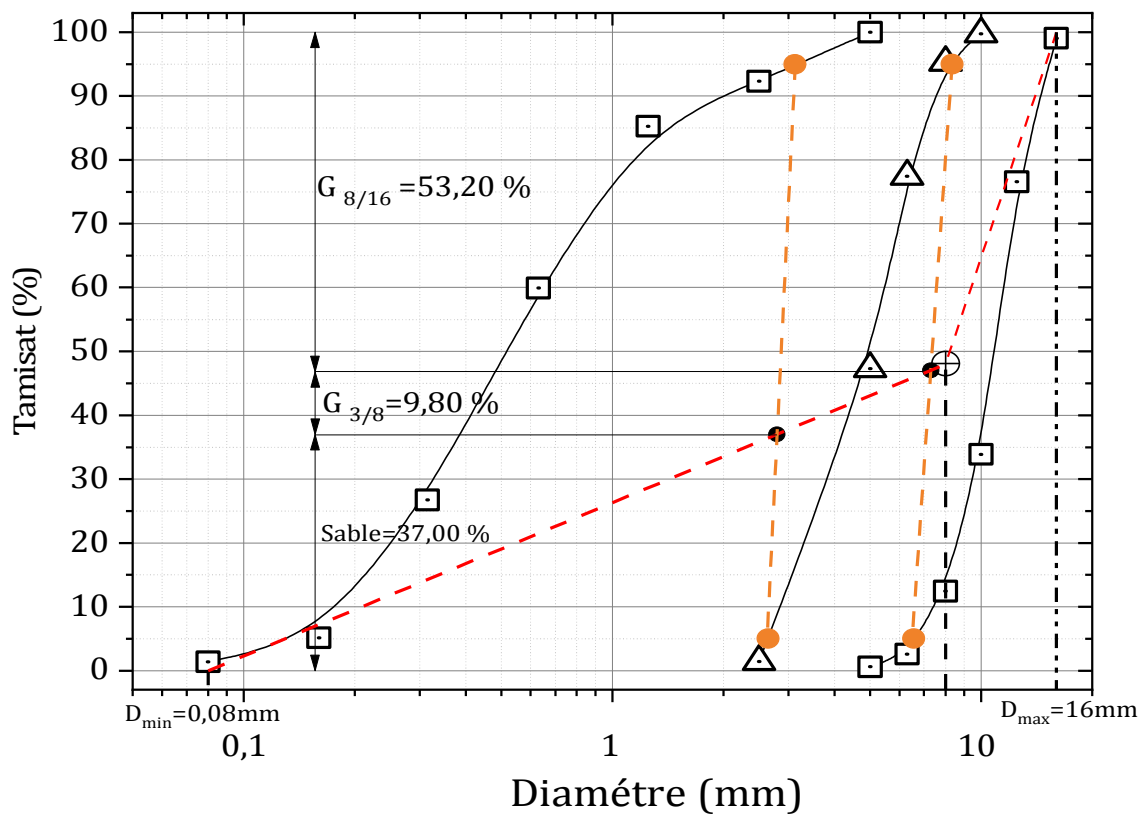
$M_f$  : c'est le module de finesse, donc :  $M_f = 2.3$ .

$$\text{Alors } Y = 50 - \sqrt{20} + 2.8 = 48$$

Ainsi, les coordonnées du point de brisure A sont:

$$[8 ; 48]$$

**Figure II.13** Courbe de référence



- Les lignes de partage de 95% et 5% d'ordonnée sont tracées et chaque intersection de ces lignes avec le droit brisé OAB est un pourcentage d'un composant du béton.
  - intersection (1) : 95% du sable avec 5% des gravillons 3/8 on donne 37% de volume totale occupé par le sable.
  - intersection (2) : 95% des gravillons 3/8 avec 5% des graviers 8/16 on donne 9.80% de volume totale occupé par gravillons 3/8
  - le reste de volume total occupé de 53.2% par gravier 8/16.

Nous obtenons donc un mélange optimal avec un volume absolu de 37% de sable et de 63% de gravier (Gravier 3/8 +Gravier 8/16).

Sur la courbe de granulométrie, les points d'intersection entre les lignes de partage et la courbe OAB donne les pourcentages des granulats suivants:

- Sable: 37%
- Gravier 3/8: 9.80%
- Gravier 8/16: 53.20 %

- Détermination de la composition en volume absolu :

-Le dosage en béton est déterminé pour obtenir un mètre cube de béton en place cela signifie que le volume de matière vaut 1m<sup>3</sup>:

$$V_{\text{abs}} = V_s + V_g + V_c = 1\text{m}^3$$

A partir de **la compacité "c"** du béton permet de déterminer le volume total absolu V de granulats intervenant dans la formulation du béton :  $V_T = (c - V_c)$  où  $V_c$  est le volume de ciment défini par  $V_c = C / \gamma_{\text{abs}}(C)$  où  $\gamma_{\text{abs}}(C)$  est la masse volumique absolue du ciment utilisé.

Avec :  $c = c_0 + c_1 + c_2 + c_3$

$$c = 0.805 + (-0.01) + 0 + 0.003$$

- $c = 0.798$

$$\text{Donc : } V_T = 0.798 - \frac{364}{3040} = 0.699 \text{ m}^3$$

-Volume de sable :

$$V_s = 37\% \times 0.699 = 0.2586 \text{ m}^3$$

-Volume de gravillons

$$V_G = 63\% \times 0.699 = 0.4403 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume de gravier (3 /8) } = 9.80\% \times 0.699 = 0.06851\text{m}^3$$

$$\text{Volume de gravier (8 /16) } = 53.20\% \times 0.699 = 0.3718\text{m}^3$$

- Détermination de la composition pondérale sèche en Kg :

Masse de ciment  $C=364\text{Kg}/\text{m}^3$

Masse d'eau  $E=182\text{L}/\text{m}^3$

Masse de sable  $S= V_s \times \gamma_{\text{abs}}(s)$

$S= 0.2586 \times 2600 = 672.36\text{ Kg}/\text{m}^3$

Masse de gravillons  $G_{3/8} = V_g \times \gamma_{\text{abs}}(g) = 0.06851 \times 2690 = 184.30\text{Kg}/\text{m}^3$

$G_{8/16} = V_G \times \gamma_{\text{abs}}(G) = 0.3718 \times 2650 = 985.27\text{ Kg}/\text{m}^3$

**Tableau II.11:** Le volume des composants en ( $\text{m}^3$ )

Composant	Volume $\text{m}^3$
Sable	0.2586
Gravillons 3/8	0.06851
Gravier 8/16	0.3718
Ciment	0.120

**Tableau II.12:** les composants en masse(Kg)

Composant	Masse Kg
Sable	672.36
Gravillons 3/8	184.30
Gravier 8/16	985.27
Ciment	364

### II.3.2 Composition des différents bétons ordinaires

Nous avons réalisé des essais sur des bétons confectionnés avec de superplastifiant et des bétons à base de ciment Portland substitué en poids par différents pourcentages de:

- béton de référence a base de 100% ciment portland(C), (CEM I 42.5 R).
- béton à base de ciment Portland substitué par 35% métakaolin (MK) ,15% poudre de marbre (PM) et 50% ciment.
- béton à base de ciment Portland substitué par différents pourcentages de fumée de silice (FS), (10%,20%,30%,40%,50%) de 35% MK,15% PM et 50% C.

Ces bétons ont été conservés pendant 28 jours, les tableaux (II.12) donnent la composition des différents bétons étudiés. Les quantités de granulats sont données en masse de matériaux et les dosages en Superplastifiant(SP) sont présentés.

**Tableau II.13** Liste des différents bétons étudiés.

Notation	Désignation
B.C	Béton référence 100% ciment + 0.5 %SP
BMKPM	Béton + 35%MK + 15%PM + 0.5%SP
BMKPM10	Béton + 10%FS de 35%MK + 15%PM + 0.5%SP
BMKPM20	Béton + 20%FS de 35%MK + 15%PM + 0.5%SP
BMKPM30	Béton + 30%FS de 35%MK + 15%PM +5%SP
BMKPM40	Béton + 40%FS de 35%MK + 15%PM + 0.5%SP
BMKPM50	Béton + 50%FS de 35%MK + 15%PM + 0.5%SP

**Tableau II.14.** Les quantités des constituants des mélanges des bétons ordinaires.

Désignation des béton V = 1 m <sup>3</sup>	Les compositions (kg)									
	E/C %	Eau	C	s	g 3/8	G 8/16	MK	PM	Fumée silice	SP %
B.C	0.5	182	364	708.78	169.22	977.76	0.0	0.0	0.0	0.5
BMKPM	0.5		127.4				0.0	0.5		
BMKPM10	0.5		114.66				12.74	0.5		
BMKPM20	0.5		101.92				25.48	0.5		
BMKPM30	0.5		89.18				38.22	0.5		
BMKPM40	0.5		76.44				50.96	0.5		
BMKPM50	0.5		63.7				63.7	0.5		

### II.3.3 Confection des éprouvettes

Pour les besoins de notre étude et selon la nature de l'essai à réaliser, on a utilisé des moules prismatiques  $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$ , pour la confection des éprouvettes.

Le malaxage est exécuté à l'aide d'une bétonnière, les étapes de malaxage sont :

- Introduction de tous les granulats dans le malaxeur (sable, gravillon et gravier) et faire le malaxage pendant 3 min afin d'assurer une bonne homogénéité parmi les éléments traditionnels du béton
- Introduction du ciment et faire le malaxage pendant 1min
- Introduction du 70% l'eau en suite 30% d'eau avec SP et faire le malaxage pendant 2min.



**Figure II.14 :** Bétonnière utilisée

### **II.3.4 Moulage et démoulage**

Après le malaxage, le béton est prêt à l'emploi. Le béton est introduit dans des moules déjà graissés par une huile pour faciliter le démoulage après 24 heures de leur coulage.

Le remplissage des moules est exécuté en deux couches, chaque couche est piquée par 25 coups le but de piquage est le remplissage parfait du moule.

A la fin du coulage, il faut araser les éprouvettes à l'aide d'une règle selon les normes NF P18-422 et NF P 18-423. La face supérieure de l'éprouvette doit être lisse et bien finie.

Après démoulage, les éprouvettes sont entreposées dans la chambre d'humidité élève jusqu'au moment de l'essai.



**Figure II.15 :** La mise en place du béton

## II.4. Présentation des essais expérimentaux

Différents essais ont été effectués afin de déterminer les propriétés de béton témoin et béton modifié par les additions et comparer ceux-ci aux propriétés de béton ordinaire.

### II.4.1. Essai sur béton frais

#### ➤ Mesure de la consistance (Norme NF P 18-439):

Le contrôle de l'ouvrabilité est effectué à l'aide de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams qui consiste à :

- Mouler des troncs de cône en béton (base de diamètre 20cm, partie haute de diamètre 10cm).
- Remplir le cône en trois couches piquées chacune par 25 coups avec une tige métallique de 16 mm de diamètre à extrémité arrondie.
- Soulever le moule avec précaution et mesurer la hauteur d'affaissement en centimètre (cm).



**Figure II.16 :** l'essai de mesure de consistance du béton frais.

### II.4.2. Essais sur béton durci

Ce sont des essais destructif pour mesurée la comportement mécanique appliquée sur les éprouvettes confectionnée.

➤ **Essai de compression : Norme (NF EN 18-455) [33]**

L'essai de résistance à la compression (Essai d'écrasement) a été effectué par l'application d'un effort de chargement sur une éprouvette cubique (7×7×7) cm<sup>3</sup>, jusqu'à rupture par une presse d'essai de compression.

La presse utilisée est une machine de type CONTROLS ayant une capacité maximale de 3000KN.



**Figure II.17 :** l'essai de compression a l'état durci

➤ **Essai de traction par flexion**

L'essai de traction par flexion est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7×7×28) cm<sup>3</sup> selon les normes NF P.18-407, il s'agit de déterminer la résistance à la flexion (3 points) de l'éprouvette soumise à un effort centré exercé à l'aide d'une presse hydraulique.

La résistance à la traction par flexion est calculée à partir de la formule suivante :

$$\sigma_t = 3FL/2d^3$$

Avec:

$\sigma_t$  : résistance a la traction par flexion en (MPa)

F : la charge appliquée à la rupture en (N)

L : la distance entre les appuis (L = 210 mm)

d : le coté de la section carrée de l'éprouvette (d = 70 mm).



**Figure II.18** : l'essai de flexion a l'état durci.

## CONCLUSION

- Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés ainsi que leurs propriétés physiques.
- Le partie expérimentale de la méthode de formulation du béton DREUX-GORISSE.
- Les essais de caractérisation de la phase inerte : sable + gravier laissent apparaitre que les granulats utilisés dans notre travail se sont des granulats courant utiliser pour les bétons ordinaires.

- Le projet expérimental associe : essais de caractérisation a l'état frais des différentes compositions du béton ainsi des essais de caractérisation a l'état durci : mécanique (essai de compression et de flexion).

**CHAPITRE III :**  
**RESULTATS**  
**EXPERIMENTAUX**  
**ET ANALYSES**

### III.1. Introduction

Ce travail est consacré à l'étude expérimentale des indicateurs généraux de la résistance d'un béton ordinaire et des bétons confectionnés à base du ciment portland substituée avec des différents pourcentages de metakaolin et poudre de marbre (MK35 % ;PM15 %) et béton avec des différents pourcentages de fumée de silice(10%; 20%; 30%; 40%; 50%) de 35%MK.

Ce chapitre est concerne l'étude des caractéristiques mécaniques des mêmes bétons cités ci-dessus.

### III.2. Résultats et interprétations

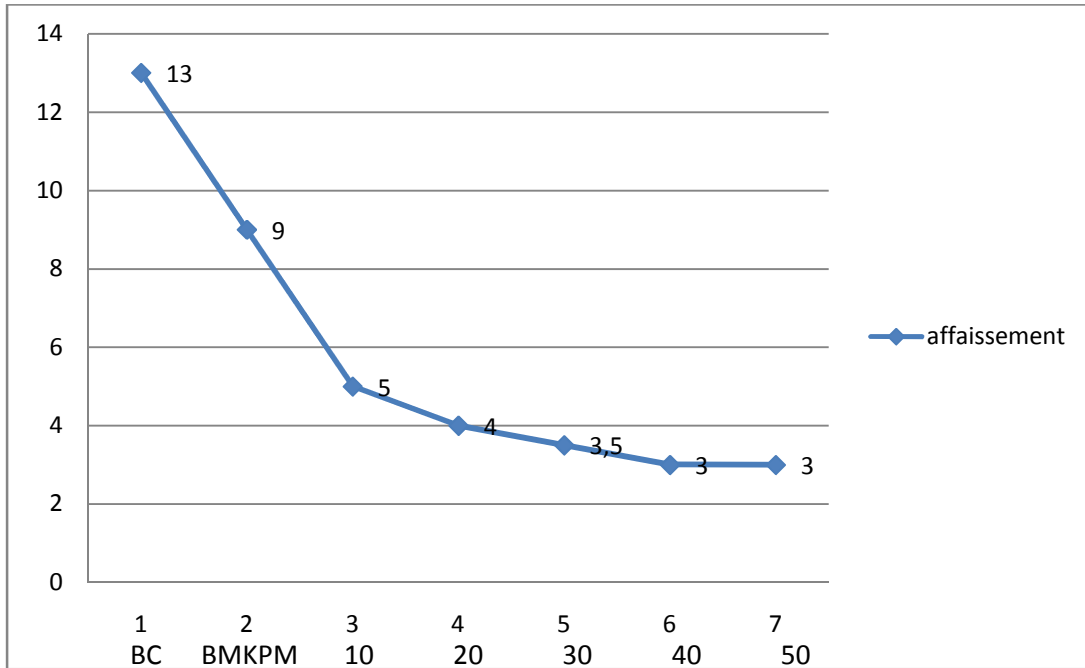
#### III.2.1. Essai sur béton frais

##### Essai d'affaissement

Le tableau III.1 et les figure III.1 présentent les valeurs de l'affaissement en fonction des bétons étudiés.

**Tableau III.1** : valeurs d'affaissement pour les 07 formulations du béton.

Les bétons	L'affaissement (cm)
B.C	13
BMKPM	9
BMKPM10	5
BMKPM20	4
BMKPM30	3.5
BMKPM40	3
BMKPM50	3



**Figure III.1** : valeurs d'affaissement pour les 07 formulations du béton.



**Figure III.2** : Essai d'affaissement du béton BMKPM10

### Commentaire

D'après la Figure III.1 on peut constater que l'affaissement diminue avec l'augmentation de pourcentage substituée de ciment, En effet il passe de 9cm pour un béton contenant (35%MK+15%PM) de substitution et à successivement (5cm, 4cm, 3.5cm, 3cm, 3cm) pour (BMKPM10, 20, 30, 40,50).

Par ailleurs, on constate que le BC présente une grande ouvrabilité (13cm), il est un béton référentielle.

### III.2.2. A l'état durci

#### Caractéristiques mécaniques

##### ➤ Résistance à la compression

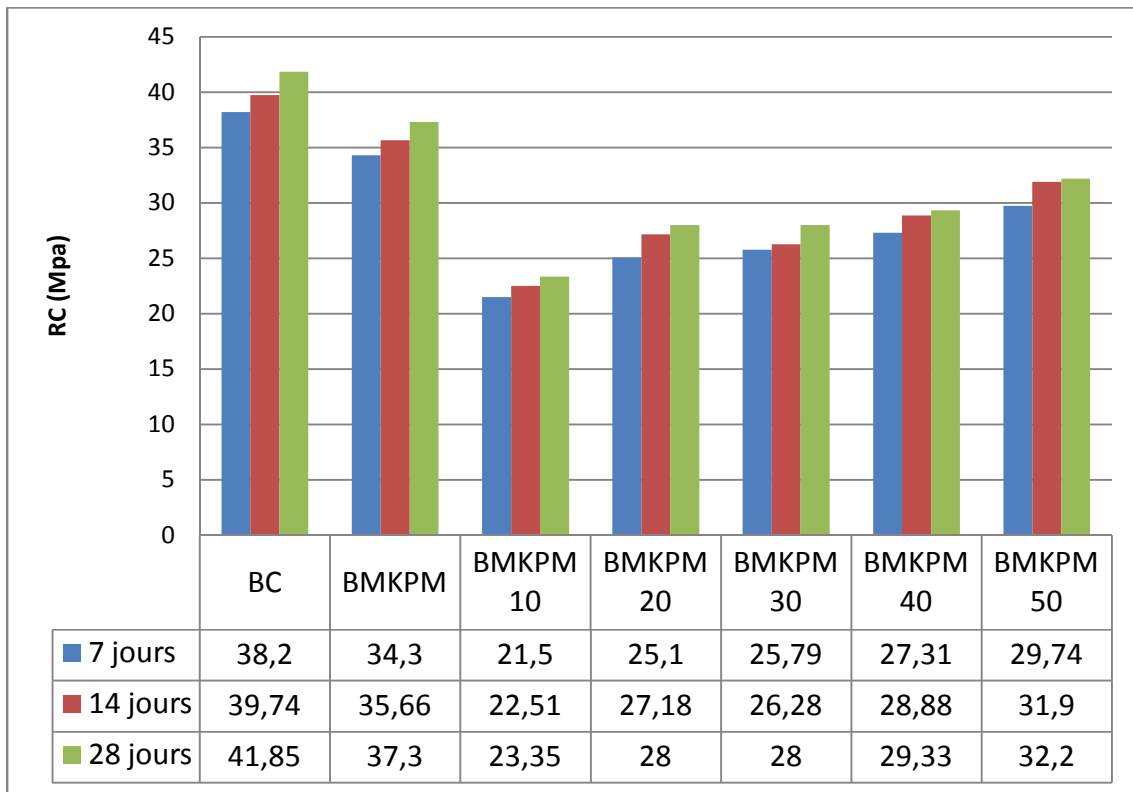
L'évolution de la résistance à la compression a été étudiée à l'âge de 7,14 et 28 jours de conservation dans la chambre, les résultats sont présentés dans le tableau suivant :



**Figure III.4 :** Essai d'écrasement

	RC (Mpa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
BC	38.20	39.74	41.85
BMKPM	34.3	35.66	37.30
BMKPM10	21.50	22.51	23.35
BMKPM20	25.10	27.18	28
BMKPM30	25.79	26.28	28
BMKPM40	27.31	28.88	29.33
BMKPM50	29.74	31.90	32.20

**Tableau III.2:** valeurs de Résistance à la compression pour les 07 formulations du béton.



**Figure III.5** : variation de la résistance a la compression en fonction du temps pour les 07 formulations du béton

### Commentaire

La substitution d'une partie du ciment par des additions minérales s'accompagne d'une baisse de la résistance en compression, et ça pour les différents âges étudiés. Par ailleurs, on constate que la résistance entre le BC et BMKPM est comparable mais une fois la fumée de silice entrant (BMKPM10) on observe une chute de résistance est de l'ordre de 44% et 28% par rapport BC et MKPM successivement bien que ce pourcentage diminue à mesure que le pourcentage de fumée de silice augmente (BMKPM20, 30, 40,50) jusqu'à de l'ordre 22% par rapport le BC et 13% par rapport le BMKPM.

➤ **Résistance à la traction par flexion :**

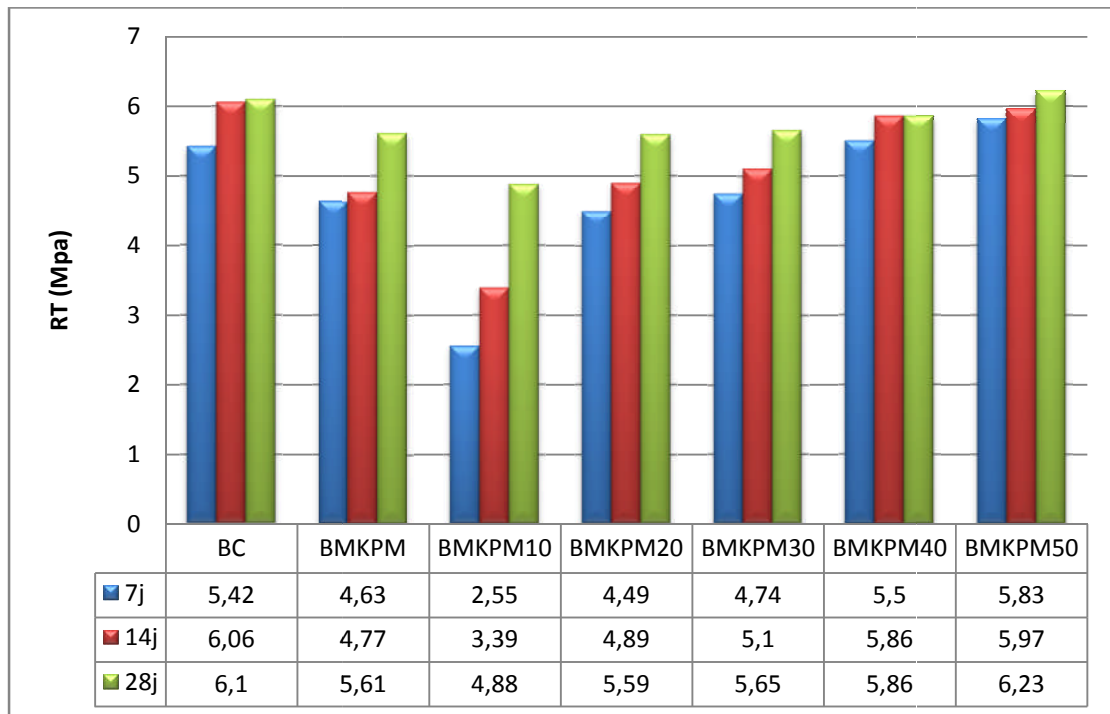


**Figure III.6 :** Essai de la traction par flexion

L'évolution de la résistance à la traction par flexion a été étudiée à l'âge de 14,7 et 28 jours de conservation dans la chambre, les résultats sont présentés dans le tableau suivant:

	RT (Mpa)		
	7 jours	14 jours	28 jours
BC	5.42	6.06	6.10
BMKPM	4.36	4.77	5.61
BMKPM10	2.55	3.39	4.88
BMKPM20	4.49	4.89	5.59
BMKPM30	4.74	5.10	5.65
BMKPM40	5.50	5.86	5.86
BMKPM50	5.83	5.95	6.23

**Tableau III.3 :** valeurs de Résistance à la traction par flexion pour les 07 formulations du béton.



**Figure III.7 :** variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du temps pour les 07 formulations du béton.

### Commentaires

On observe que la résistance de traction par flexion est comparable entre le BC et BMKPM on remarque que la différence entre eux est d'ordre de 10% à 15%.

Par ailleurs, on ne constate que la résistance en traction par flexion indique de chute significative une fois substituée le béton par le fumée de silice avec de faible pourcentage (10%) c'est chute d'ordre 45%.

Ensuite, cette diminution est composée par l'augmentation du pourcentage de fumée de silice (BMKPM20, BMKPM30), même surpassant le béton de référence au cas de BMKPM40 et le BMKPM50.

### Conclusion

L'étude présentée dans cette partie concerne le comportement mécanique d'un béton substitué a été réalisé avec de trois additions (poudre de marbre, métakaolin et fumée de silice).

Les conclusions suivantes peuvent être tirées à partir des résultats présentés dans cette étude:

- La substitution des bétons diminué la résistance mais elle reste approximative dans un intervalle acceptable.
- Pour assurée l'efficacité des additions on peut déterminer le taux optimale.
- La fumée de silice améliorée la résistance a la compression et a la traction.

CONCLUSION

GENERALE

## Conclusion générale

Le devenir des sous-produits représente un enjeu majeur, au centre des préoccupations du monde industriel en pleine mutation environnementale.

L'étude articulée autour des deux principaux axes suivants :

- L'influence des fillers sur les propriétés des bétons confectionnés à l'état frais et à l'état durci.
- Caractérisation des bétons avec le metakaolin, poudre de marbre et fumée de silice à travers des essais mécaniques.

Les résultats obtenus dans cette étude nous a permis d'aboutir les conclusions suivantes :

En maintien un rapport E/C égale à 0.5 avec un dosage SP 0.5% constant, on a obtenue un béton référentielle à base 35% MK et 15% PM avec un affaissement de 5cm, la méthode de Dreux-Gorisse conjuguée à celle de coulis nous ont conduit à des compositions de béton satisfaisantes, suite à l'optimisation des facteurs de formulation une fois la fumée de silice entrant avec des pourcentage (10, 20, 30, 40 et 50%) de 35% MK et comparée avec le béton référentielle.

Les résultats de cette étude nous a permet de conclure les points suivantes:

- ✓ L'augmentation du taux d'ajout dans le ciment influe sensiblement sur la finesse (surface spécifique) des ciments.
- ✓ Le dosage l'ajout soit de metakaolin ou du marbre ou la fumée de silice dans le ciment, augmente la surface spécifique du liant qui entraîne une demande d'eau supplémentaire et conduit ainsi à une eau de consistance plus importante dans toutes les pâtes de ciment.
- ✓ La consistance normale augmente avec l'augmentation de la surface spécifique de Blain des ajouts cimentaires, ce qui favorise les réactions et les particules hydratés forment une bonne cohésion.
- ✓ Les additions minérales contribuent au remplissage des pores en plus de ce que l'hydratation du ciment seul peut apporter, par la formation d'hydrates lors de la prise et du durcissement.
- ✓ L'amélioration de la porosité du béton est d'autant plus importante que la finesse de l'addition est élevée

✓ La fumée de silice vraiment jouet un rôle très important pour l'amélioration des comportements mécanique mais par ailleurs elle causer une grande perte de maniabilité

- [1] **DR. P .BOERAEVE** : «Technologie du béton », Edition 1994, Groupement Belge du béton
- [2] **L. J. Vicat**, Traité pratique et théorique de la composition des mortiers, ciments et gangues a pouzzolanes et de leur emploi dans toutes sortes de travaux.
- [3] **BABA-ARBI, MANSOUR**, 2017. Etude du Comportement du béton de sable de dunes renforcé par des fibres métalliques soumis à haute température ; mémoire mastère ; Université Ouargla.
- [4] **K.E. Alyamac and R. Ince**. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction and Building Materials* 23, pp 1201–1210, 2009.
- [5] **J. Baron, J.P. Olivier et J.C. Weiss**. Les ciments courants, Les bétons, Bases et données pour leur formulation, sous la direction de Jacques Baron, Jean-Pierre Olivier, Ed. Eyrolles, 1996.
- [6] **M.Y. Celik and E. Sabah**. Marble Deposits and the Impact of Marble Waste on Environmental Pollution Geological and technical characterization of Iscehisar (Afyon–Turkey). *J Environ Manage* 87: pp10, 6–116, 2008
- [7] **Andra**, Dossier 2005. Ré férentiel des matériaux d’un stockage de déchets à haute activité et à vie longue, Tome 2 : matériaux cimentaires, document interne à l’Andra n° CRPASC040015T2\_A, 2005, 2005.
- [8] **S. Diamond**. The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer. *Cement & concrete composites*, Vol. 26, 2004, p. 919-933.
- [9] **P. Lawrence** Sur l’activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires, Thèse de doctorat de l’Université Paul Sabatier, Toulouse III, 2000.
- [10] **Lucien Pliskin** « Béton»,  
[http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/32774/C%26T\\_1992\\_26\\_58](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/32774/C%26T_1992_26_58)
- [11] **A. Shayan et A. Xu**. Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, volume 34, numéro 1, p. 81-89, 2004
- [12] **Rabah chaid, hamid zeroub et damien rangeard**. Concrete durability indicaj“ orswith glass powdllt addition in marihe environment, algerie equipment N°56 décembre 2015.

<https://www.freepdfconvert.com/membershi>.

[13] **H.J.H. Brouwers**. The works of powers and Brownyard revisited : part1. Cement and concrete research, Vol. 34, 2004; p. 1697-1716

[14] **R. Dupain, R. Lanchon et J.C. Saint-Arromain**. Granulats, sols, ciments et bétons, Paris ; Ed.Educavivre, 276 p, 1995.

[15] **J.P. Ollivier et J. Baron**. Les bétons, bases et données pour leur formulation. Edition Eyrolles, 1997.

[16] **J.-P. Balayssac, V. Kringkaï, M. Sbartai, G. Klysz, S. Laurens, G. Arliguie**. Contribution au développement du radar pour la caractérisation non destructive du béton », 25e rencontres de L'AUGC, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), INSA – UPS Génie Civil, 135 avenue de Rangueil, F-31077 TOULOUSE Cedex 04, France, 05- 2007

[17] **John Wiley and Sons, F. Taylor, S. Thompson**, 1912. Atreaise on concrete plain and reinforced, New York.

[18] **N. Schwarz et N. Neithalath**. Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. *Cement and Concrete Research*, volume 38, numéro 4, p. 429-436, 2008.

[19] **Notice N° PM 08-01**. Guide d'utilisation du béton en site maritime. Centre d'Etudes techniques maritimes et fluviales, ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, France, 04- 2008.

[20] **E. Tazawa, S. Miyazawa et T. Kasai**. Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste, *Cement and Concrete Research*, 25, 2, 1995, p 288-292.

[21] Fiches techniques. **CIM béton**: Le ciment et ses applications, 2000.

[22] **V. Baroghel-Bouny**. Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, méthode, analyse, interprétation. LCPC, 1994.

- [23] **P. C. Aitcin**. Bétons Haute Performance, éditions Eyrolles, 2001.
- [24] **De Larrard**. Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par LECOMTEA, études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 414 p, 2000.
- [25] **Andra**, LERM, Choix des formulations de bétons de référence, document interne Andra n° C RP 0 LER 01-004/A, 2001.
- [26] **Mr : BOUGLADA Mohamed Salah** < Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier>, Mémoire de magister université Mohamed Boudiaf de m'sila.
- [27] **Harbi Radhia** « Propriétés physico-mécaniques et durabilité des Mortiers avec additions minérales » CHAPITRE 1. Partie 1 : Synthèse Bibliographique. P 27-28. Thèse de doctorat.
- [28]. **Buathier S**, " Modélisation en régime dynamique d'un four tournant". Rapport de DEAP rocède, Systèmes, Matériaux, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1998.
- [29]. **Davies T.W**, " Equipment for the study of flash heating of particules suspension". High Temperature Technology. Vol. 3, 1984, p141-147
- [30]. **Henin J.P, Pinoncely A**, " FCB et la calcination flash". Mines et Carrières Technologie, Vol.6, 1986, p249-252. [28].**Salvador S**, "Production de pouzzolanes de synthèse par calcination flash de sols argileux: étude des produits et conception d'une installation". Thèse INSA de Toulouse, 1992, 177p.
- [31]. **LIU, J.N**. "Strength and hydration of an activated aluminosilicate material", Pennsylvania. State University, USA, 1998.
- [32].**DYER, T. D., THIR, R. K**. "Use of glass cullet as a cement component in concrete", Proceeding of international symposium organised by the concrete technology unit and held at the University of Dunidee, Scotland, UK,ISBN 0-7277-2994-2, ,19-20 march 2001,292 p.
- [33]. NF P18-506,"Additions pour béton hydraulique-laitier vitrifié moulu de haut fourneau", 1992, 4p
- [34]. NF EN 206-1,"Spécification, performances, production et conformité", Béton partie I,2002, 77p

- [35]. NF EN 450, "Cendres volantes pour béton- définition, exigences et contrôle de qualité", 1995.
- [36]. NF P18-508, "Additions pour béton hydraulique- additions calcaires-spécification et critères de qualité", 1994, 4p.
- [37]. **Pierre-Discount.com**, "La Pouzzolane", <http://www.pierre-discount.com/pouzzolane.html>.
- [38]. **MOSBAHI Lamia**, SOLTANI Khedidja, Université Larbi Tébessi – Tébessa Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique Les différentes méthodes usuelles de formulation du béton ordinaire Etude comparative 2018.
- [39]. **S-Laldji**. Cours ETS. Caractéristiques fondamentales du béton : hiver 2015.
- [40] **Georges DREUX, Jean FESTA**. Nouveau guide du béton et de ses constituants, 8ème édition Eyrolles Paris 1998.
- [41] (**Bou noua Abdelkrim1, Boukhelkhal Aboubakeur2, Bederina Madani1, Makhloufi Zoubir1**) Durabilité des mortiers à base de sable alluvionnaire siliceux substitué par du sable calcaire de concassage vis-à-vis des agressions chimiques Revue des Sciences et Sciences de l'ingénieur Journal of sciences and engineering sciences <https://www.asjp.cerist.dz/en/PresentationRevue/303>.
- [42] **DR. P .BOERAEVE** : «Technologie du béton », Edition 1994, Groupement Belgedu béton.
- [43] **R. Dupain**, *Granulats, sols, ciments et béton*, édition 2008.