

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf- M'sila

Faculté De Technologie

Département De Génie Civil

N° :



Domaine : Technologie

Filière : Génie civil

Option : Matériaux

Mémoire Présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master Académique

Par : BOUAZIZ Amel

ACHOUR Hanane

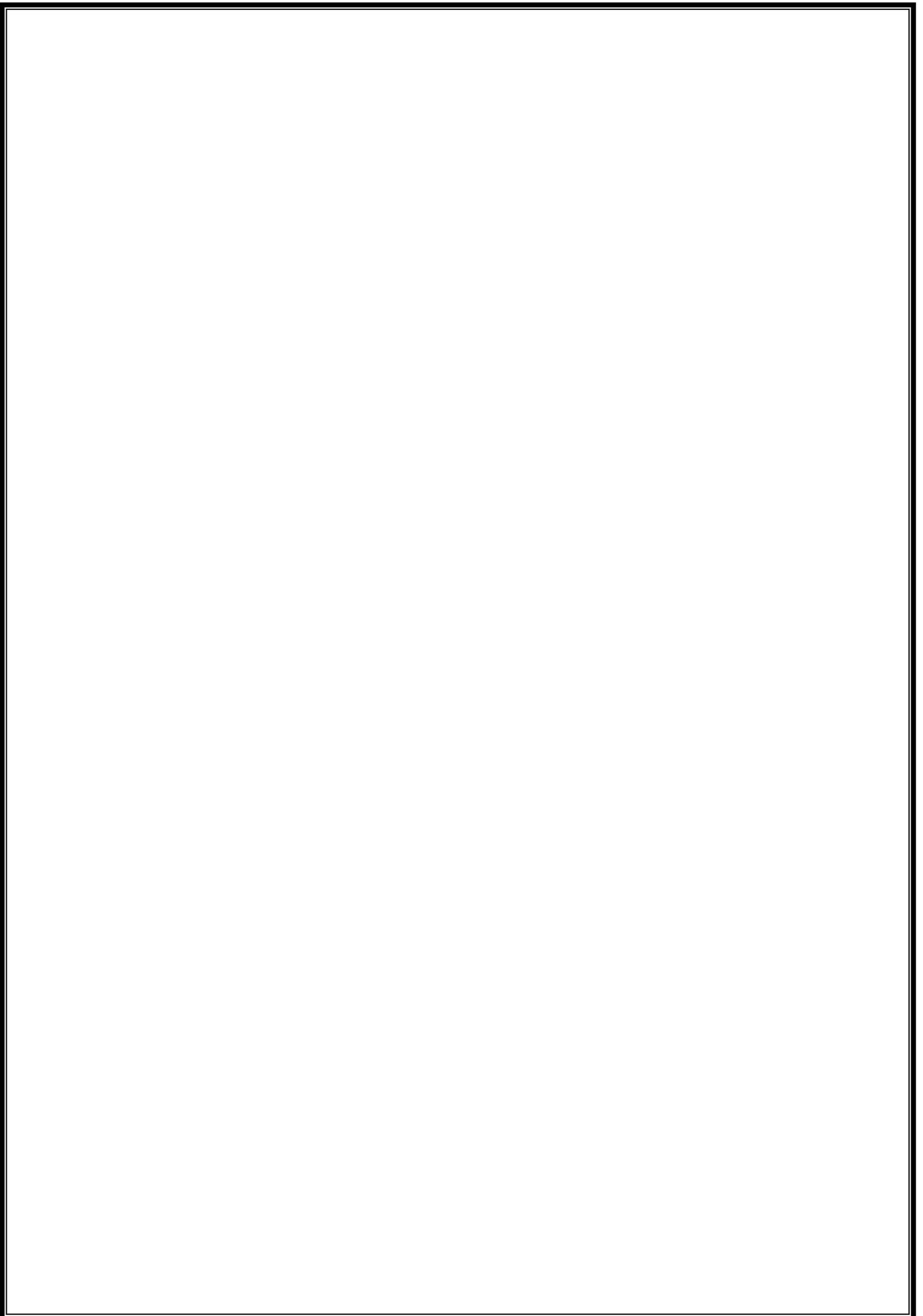
Intitulé

*Confection D'un Béton ordinaire
avec l'introduction d'une vase traitée*

Soutenu devant le jury composé de :

RAHMOUNI Zine El Abidine	Université de M'sila	Président
CHIKOUCHE Mohamad Aziz	Université de M'sila	Rapporteur
ZITOUNI Salim	Université de M'sila	Examineur
BOUALEGUE Saida	Université de M'sila	Examineur

Année Universitaire : 2017/2018



REMERCIEMENTS

*Nous tenons profondément à remercier tout d'abord ALLAH
l'unique qui a permis à ce travail de voir la lumière
Nous voudrions exprimer également nos vifs remerciements à
notre encadreur pour son attention, ses conseils et sa précieuse
aide.*

CHIKOUCHE Mohamed Aziz

*Nous remercions nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits
pour que nous terminions nos études.*

*Nous remercions également tous les enseignants du département
de Génie civil ainsi que ceux du membre du jury et tous les
professeurs qui ont participé à mon cursus (scolaires et
universitaire).*

*Pour cette occasion Nous remercions les ingénieurs du
Laboratoire de génie civil surtout*

« Bakhti Yammna ».

*En fin, Nous voudrions exprimer ma reconnaissance à tous mes
amis pour leurs soutiens moral et matériel*



Bouaziz Amel et Achour Hanane

DEDICACE

Ce travail est dédié tout d'abord a mes parents :

*Ma mère et mon père, ma grand mère rabi
yarhamha, a mes frères et mes sœurs à tous les
membres de la famille ACHOUR*

Et la famille halfaya

*Avec tous mes sentiments de respect et de
reconnaissance pour tous les sacrifices déployés pour
m'élever dignement et assurer mon éducation dans
les meilleures conditions*

*A mes Amies: AMEL Bouaziz, SOUMIA Saleh, Zineb
Allal cherif, souaad .*

Hada, ikram, ibtissam

*A Imen OMRI, Yamna Bakhti qui m'a soutenu au
cours mon stage au labo*

*A tous les responsables sans exception, pour leurs
efforts afin de m'assurer une formation et bonne
stage solide*

*Aux étudiants de génie civil et toute la promotion
2017/ 2018*

ACHOUR HANANE

Dédicace

*Je dédie ce mémoire de Master :
En signe de respect et de reconnaissance aux
Personnes les plus chères : ma mère et mon père.
A mes frères et ma sœur.
A toute la famille Bouaziz.
Aux étudiants de génie civil et toute la promotion*

2017/2018

*Je dédie à mes chères amies :
Omri Imen, Bakhti Yamina, zineb, somia, hanane,
ikram, hada, ibtissam
Au monde du génie-civil.*

BOUAZIZ AMEL

Résumé

L'unique barrage de la wilaya de M'sila enregistre un taux d'envasement très avancé. Ce problème nous a incité à poser la question suivante : que ce qu'on peut faire dans le domaine de génie civil afin de remédier à ce problème ?

La vase (Issue du barrage K'sob), séchée, broyée, tamisée, traitée thermiquement est utilisée comme ajout ou substituant au ciment à différents pourcentages (5-10 et 20%) dans la confection du béton .

Différentes essais ont étaient conduites telles que l'affaissement, la résistance à la compression et le suivi du retrait, qui ont révélé un réel intérêt de sa valorisation dans la matrice cimentaire d'un béton ordinaire.

Mots clés : Vase traitée - ciment - substitution - Béton ordinaire- Caractéristiques mécaniques.

Abstract

The only dam in the wilaya of M'sila records an advanced siltation rates. This has prompted us to ask the question: what can we do in the civil engineering field in order to remedy this problem?

Sludge (from K'sob Dam), dried, crushed, sieved, heat-treated is used as an additive or cement substitute at various percentages (5-10 and 20%) in the confection of ordinary concrete.

Various tests were conducted such as subsidence, compressive strength and shrinkage, which revealed a real value of its valorization in the cement matrix of ordinary concrete.

Keywords : Treated sludge- Cement- Substitution- Ordinary concrete- Mechanical characteristics.

ملخص

السد الوحيد بولاية المسيلة يسجل مستوى عال للترسب بالطمي، هذا المشكل دفعنا لطرح السؤال التالي: ماذا يمكننا فعله في ميدان الهندسة المدنية لعلاج هذه المشكلة؟

الطمي (المستخرج من السد)، المجفف، المسحوق، المغريل والمعالج حراريا، استعمل في هذه الدراسة كمادة مضافة للإسمنت عن طريق استبدال عدة نسب مئوية (5-10-20%)، من أجل صناعة الخرسانة العادية.

قمنا بعدة تجارب: كانخفاض الخرسانة، مراقبة المقاومة للضغط ومتابعة الانكماش. هذه التجارب كشفت عن فائدة كبيرة لتثمين هذا الطمي داخل المصفوفة الاسمنتية للخرسانة العادية.

الكلمات المفتاحية : الطمي المعالج - الاسمنت - استبدال - الخرسانة العادية - الخصائص الميكانيكية

Sommaire

	Page
ملخص.....	10
Résumé.....	11
Abstract.....	12
Introduction générale	14
CHAPITRE I- Les ajouts cimentaires	
-1-Introduction.....	17
-2- Définition du ciment.....	17
-2-1-Différents types de ciment.....	18
-2-2-Principe de fabrication des ciments courants.....	18
-2-3-Les Constituants du ciment.....	19
-2-3-1- Le clinker.....	19
-2-3-2- Le gypse(CaSO_2).....	21
-2-4-Classification des ciments courants.....	21
-3- Les ajouts cimentaires.....	23
-3-1-Définition des ajouts.....	23
-3-2-Avantages des ajouts minéraux.....	23
-3-2-1-Avantages techniques.....	23
-3-2-2- Avantages économiques.....	24
-3-2-3- Avantages écologiques.....	24
-3-3-Type des ajouts.....	24
-3-3-1- Cendres volantes (V et W).....	25
-3-3-2- Fumé de silice.....	25
-3-3-3- Laitier granulé de haut-fourneau.....	26
-3-3-4- Pouzzolane naturelle.....	27
-3-3-5-Pouzzolanes artificielles.....	27
-3-4-Importance des ajouts.....	27
-3-5-L'utilisation des ajouts en Algérie.....	28
-4-Conclusion.....	29
CHAPITRE II- L'argile calcinée	
-1-Introduction.....	31
-2-Définition.....	31
-3-Classification des argiles.....	31
-3-1- Groupe Kaolinite [7.1A°].....	31
-3-2- Groupe monmorillonite [9.4 à 15A°].....	32
-3-3-Groupe de Chlorites [14A°].....	32
-4-La calcination.....	33
-4-1- La calcination flash	33
-4-2- La calcination traditionnelle.....	34
-4-2-1-Les fours traditionnels.....	34
a- Les fours à vis.....	34
b- Les fours rotatifs.....	34
c- Les fours à lit fluidisé.....	35
d- Les fours à multi-foyers ou fours à étages.....	35
-4-3- L'effet de la transformation thermique sur les argiles.....	35
-5-La vase.....	36
-5-1-La valorisation des vases.....	37

-5-2-Présentation du bassin versant du K'sob.....	37
-5-3-Utilisation de la vase dans les matériaux cimentaires.....	38
-6 Conclusion.....	39

CHAPITRE III- Essais et résultante

III-1-Introduction	41
-2-Caractérisation des matériaux utilisés	41
-2-1- Le sable.....	41
III-2-1-1-Caractéristiques physique des sables utilisés.....	41
a) Masse volumique (absolue).....	41
b) Masse volumique apparente.....	42
c) Porosité.....	43
d) Compacité.....	43
e) L'indice des vides.....	43
f) Equivalente de sable	44
g) Teneur en eau	45
h) Degré d'absorption d'eau.....	46
i) Analyse granulométrique.....	46
j) Module de finesse	47
-2-2-Le gravier	47
a) Masse volumique apparente.....	47
b) Masse volumique absolue.....	48
c) Porosité, Compacité et Indice des vides.....	48
d) Analyse granulométrique	49
III-2-2-2-Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés	49
a)Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles)	50
III-2-3-L'eau de gâchage	50
III-2-4- Caractéristiques du ciment CEMI.....	50
a)Composition chimique du ciment CEMI.....	51
b) Composition minéralogique du ciment CEMI.....	51
III-3-Elaboration des ciments modifiés et les différents bétons.....	52
III-3-1-Caractéristique de la vase.....	52
III-3-1-1 Analyse Chimique de la vase brute	52
III-3-1-2-Analyse Chimique de la vase calcinée.....	52
III-3-1-Analyse chimique des ciments modifiées (5-10-20)%.....	53
III-2-2-Analyse chimique des ciments modifiés.....	53
III-4-Confection des bétons étudiés.....	53
III-4-1-Formulation du béton.....	53
III-5-Essai sur béton frais.....	54
III-5-1-Affaissement au cône d'Abrams.....	54
III-6- Essai sur béton durci.....	55
III-6-1- La masse volumique.....	55
III-6-2-Résistance à la compression.....	55
III-6-3-Essai à ultrason.....	57
III-6-4-Le retrait.....	57
III-6-5-L'absorption.....	59
III-6-5-1-L'absorption totale.....	59
III-6-5-2-l'absorption capillaire.....	60
Conclusion générale.....	61
Bibliographie	

Liste des tableaux

	Page
CHAPITRE I- Les ajouts cimentaires	
Tableau I-1- Composition chimique du clinker	21
Tableau I-2- les différents types de ciment courants.....	22
Tableau I-3- Classe de résistance du ciment	23
Tableau-I-4- types d'ajouts utilisés dans les matériaux cimentaires.....	24
Tableau-I-5- Les différents ajouts utilisés en Algérie.....	29
CHAPITRE III- Essais et résultante	
Tableau-III-1- Masse volumique absolue du sable de Boussaâda	42
Tableau-III-2- Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état lâche.....	42
Tableau-III-3- Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état compact...	43
Tableau-III-4- La porosité, la compacité et l'indice de vide pour le sable de Boussaâda.....	44
Tableau-III-5- Equivalent du sable de Boussaâda.....	45
Tableau-III-6- Comparaison des résultats.....	45
Tableau-III-7- Teneur en eau du sable de Boussaâda.....	45
Tableau-III-8- Degré d'absorption d'eau du sable de Boussaâda.....	46
Tableau-III-9- Analyse granulométrique du sable de Boussaâda.....	32
Tableau-III-10- Masse volumique apparente du Gravier.....	32
Tableau-III-11- Masse volumique absolue du gravier.....	48
Tableau-III-12- Porosité, Compacité, et indice des vides.....	49
Tableau-III-13- Analyse granulométrique du gravier concassées 3/8.....	49
Tableau-III-14- Analyse granulométrique du gravier concassé 8/16.....	49
Tableau-III-15- Analyse granulométrique du gravier concassé 16/25.....	50
Tableau-III-16- Valeur du coefficient L_A	50
Tableau-III-17- Classification des roches en fonction du coefficient L_A	51
Tableau-III-18- Caractéristiques de CEM I (Fiche technique).....	52
Tableau-III-19- Composition chimique du ciment CEMI.....	52
Tableau-III-20- Composition minéralogique du ciment CEMI.....	53
Tableau-III-21- Analyse chimique de la vase brute.....	54
Tableau-III-22- Analyse chimique de la vase calcinée.....	54
Tableau-III-23- Les différents ciments modifiées de l'étude.....	54
Tableau-III-24- Les analyses chimique des mélanges pour ciments modifiées (5-10- 20)%.....	55
Tableau-III-25- Valeurs de G coefficient granulaire.....	57
Tableau-III-26- Volume des mélanges des essais.....	58
Tableau-III-28- Abréviation des bétons utilisés.....	61
Tableau-III-29- Evaluation de vitesse de propagation des ondes.....	61

Liste des figures

Page

CHAPITRE I- Les ajouts cimentaires

Figure I.1. Usine moderne de fabrication de ciment	17
Figure I.2. Poudre d'un ciment courant.....	17
Figure I.3. Schéma représentatif des matériaux utilisés pour avoir du ciment	18
Figure-I-4- Schéma d'une usine de fabrication des ciments.....	19
Figure-I-5- Composition typique d'un ciment portland type I.....	20
Figure-I-6- Résistance à la compression des phases cristallisées principales du clinker.....	21
Figure-I-7- poudre de cendre volante.....	25
Figure-I-8- Tunnel de Lötschberg (Suisse) réalisé par un béton à fumée de silice.....	26
Figure-I-9- Laitier de haut fourneau sous microscope optique.....	26
Figure-I-10- Hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire.....	28

CHAPITRE II- L'argile calcinée

Figure-II-1- Structure de la kaolinite.....	32
Figure-II-2- Structure de la montmorillonite.....	32
Figure-II-3- Structure du Chlorites.....	33
Figure-II-4- Représentation d'un four flash pour la production du métakaolin.....	34
Figure-II-5- Principe de fonctionnement de four rotatif.....	35
Figure-II-6- Courbe thermique différentielle pour la kaolinite.....	36
Figure II-7- La formation de la vase dans les barrages.....	36
Figure-II-8- Situation géographique du bassin versant du K'sob.....	38
Figure-II-9- Chaleur d'hydratation d'un ciment portland vs.....	38
Figure-II-10- Résistance à la compression du mortier à base de sédiment de dragage.....	39

CHAPITRE III- Essais et résultants

Figure-III-1- Pastille d'analyse chimique et son support.....	53
Figure-III-2- le changement de couleur de la vase.....	54
Figure-III-3- Dosage en ciment.....	56
Figure-III-4. La courbe granulair des différentes fractions.....	57
Figure-III-5-Essai du cône d'Abrams.....	58
Figure-III-6-Affaissement des différents bétons.....	58
Figure-III-7- La densité pour les différents types des bétons étudiés.....	59
Figure-III-8- La machine de compression.....	60
Figure- -9- Résistance à la compression des différents bétons [Mpa].....	61
Figure-III-10- Appareil ultrason.....	61
Figure-III-11- Appareil de retrait.....	62
Figure-III-12- Essai de retrait libre.....	62
Figure-III-13- Evaluation de taux d'absorption totale.....	63
Figure-III-14- Evaluation de taux d'absorption capillaire (%).....	64

Introduction



Introduction Général

L'utilisation de matériaux liant les différents constituants est très ancienne. Les égyptiens utilisaient du gypse calciné quand trouve aujourd'hui à Khéops. Les grecs et les romains employaient du calcaire calciné de la chaux et l'eau, du sable et soit des pierres concassées ou des morceaux de briques ou des fragments de tuiles, ainsi ils réalisaient les premiers bétons de l'histoire. Certaines constructions romaines comme le colisée et le panthéon de Rome ou le pont du Gard près de Nîmes et les ruines de Pompéi ont survécu jusqu'à nos jours.

Au moyen âge, la qualité du ciment et son utilisation ont connu un déclin général jusqu'au 18ème siècle lorsque J. Smeaton mélange de la pouzzolane avec du calcaire calciné contenant une forte proportion de matières argileuses, suivi du « ciment romain » développé par James Parker. En 1824 J. Aspdin, maçon de Leeds, tailleur de pierre et entrepreneur dépose le brevet du « ciment Portland » en chauffant un mélange d'argile et de calcaire finement broyé dans un four jusqu'à évacuation du CO₂, à une température plus faible que la clinkérisation. En 1845 I. Johnson chauffe un mélange d'argile et de craie jusqu'à clinkérisation.

En 1900, La production totale mondiale de ciment était d'environ 10 millions de tonnes, elle passe à 1,6 milliards de tonnes, en 1998. Supposons une moyenne de 250 kg de ciment utilisés pour produire 1m³ de béton, en 1900 seulement 40 millions de m³ de bétons ont été confectionnés, alors qu'en 1998, la quantité produite était d'environ 6,4 milliards de m³.

Cette production intense implique une prospection en grandes quantités de terres d'argiles et de calcaires, ce qui conduit à anéantir des montagnes de ces matériaux non renouvelables. Une atteinte démesurée à l'environnement est conduite afin de construire ou améliorer des édifices, des autoroutes, des hopitaux, hôtels, métro, aéroports.... Pour cette raison des additions aux matériaux cimentaires en vue le jour comme la fumée de silice, le laitier de hauts fourneaux, argile calcinée, etc.

En parallèle les déchets de démolition, céramiques, tuiles, briques... prennent de plus en plus d'espace et d'ampleur. Le dépôt sur des terrains retenus à cet effet ne constitue pas une solution à ce problème. Par exemple la boue issue du dragage des barrages ne cessent d'envaser et réduire la capacité des retenues comme dans le cas de notre unique barrage « le barrage K'sob ».

Objectif de l'étude

Parmi les récents ajouts cimentaires on peut citer la boue de papeterie traitée thermiquement ou la cendre bagasse de la canne à sucre. Dans notre travail on a cherché à valoriser un déchet qui commence à prendre de l'ampleur et constitue un danger imminent envers le seul barrage de la wilaya de M'sila. Car selon la dernière statistique de 2013 le barrage du K'sob est envaser à 60%. Après un traitement thermique, cette argile calcinée à était combinée au ciment CEMI à différents pourcentages afin d'étudier certaines caractéristiques.

Structure de la thèse

Pour arriver à notre fin nous avons divisé notre travail en trois chapitres en plus d'une introduction et une conclusion.

*Le premier chapitre relate sur les différents types de ciments et les ajouts les plus utilisés

*Le deuxième chapitre récite les différents minéraux argileux et l'effet de calcination ou les transformations thermiques sur les argiles.

*Le troisième chapitre est consacré aux différents essais effectués au sein du laboratoire pédagogique du département du génie civil.

*A la fin une conclusion a été formulée avec une synthèse des différents résultats obtenus et quelques perspectives.

Chapitre I

Les ajouts cimentaires

CHAPITRE I- Les ajouts cimentaires

-1-Introduction

Les ciments sont des poudres sèches et ne doivent pas être confondus avec des bétons ou des mortiers, mais ils sont un constituant important de ces deux matériaux, dans lesquels ils agissent comme de la «colle» et donne de la résistance aux structures. Pour cette raison, le ciment est un matériau de construction extrêmement important [MOM 15].

La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer. Le développement n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériels nouveaux : four rotatif et broyeur à boulets en particulier. Les procédés de fabrication se perfectionnèrent sans cesse : en 1870, pour produire une tonne de clinker (constituant de base du ciment) il fallait 40 heures, actuellement, il faut environ 3 minutes grâce au nouveaux technique qui en vue le jour surtout les dernières décennies (Figure -1). [CIM 05]



Fig. -1. Usine moderne de fabrication de ciment

-2- Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui (Figure I-2), mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps à travers des processus chimique. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et les aluminates de calcium, la proportion de chaux et de silice réactive devant être au moins de 50% de la masse du ciment. [FES, 98]



Fig. -2. Poudre d'un ciment courant

-2-1-Différents types de ciment

Le ciment anhydre est un mélange intime réalisé, soit avant ou après broyage d'un ou de plusieurs constituants. Ces dernières sont (Figure I-3) [ABD 08]:

- Un produit spécialement fabriqué à cet effet (clinker);
- Des sous-produits d'autres industries (laitiers, cendres volantes) qui subissent, en vue de leur incorporation dans les ciments, une sélection et une préparation plus ou moins élaborée, ou des produits naturels qui, ne subissent pas d'autre traitement qu'un simple séchage et une pulvérisation (fillers, pouzzolanes naturelles). Ces constituants, apportent de l'hydraulicité ou la pouzzolanité ou améliorent certaines qualités physiques du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution de la perméabilité...). Certains constituants peuvent avoir plusieurs de ces propriétés, à un degré plus ou moins développé.

Ainsi, en fonction de la nature des constituants utilisés et de leur dosage, il existe une grande variété de types de ciments, On peut citer:

- Les ciments courants;
- Les ciments adaptés à des usages spécifiques;
- Les ciments blancs;
- Les ciments spéciaux;
- Les liants hydrauliques routiers.

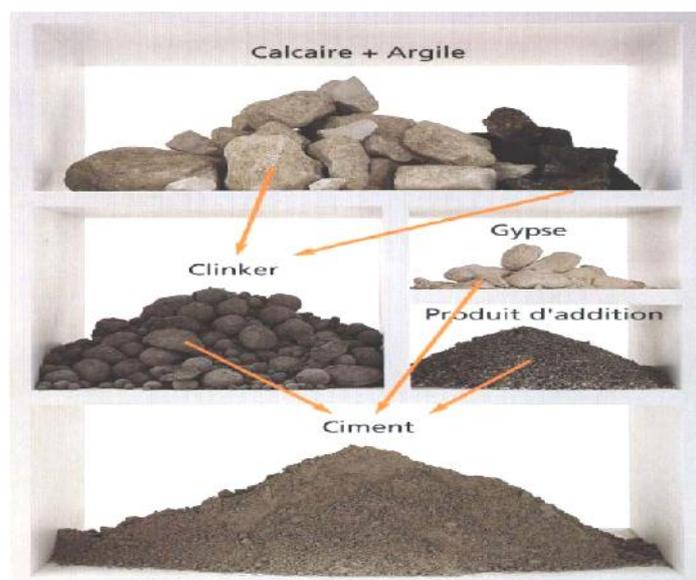


Fig. -3. Schéma représentatif des matériaux utilisés pour avoir du ciment

-2-2-Principe de fabrication des ciments courants

Le ciment Portland est fabriqué à partir de produits naturels (argile et calcaire) qui sont extraits pour former le "clinker". Finement broyé et associé à des proportions étudiées de gypse en obtient le produit appelé "ciment". La fabrication des ciments s'effectue soit par voie sèche, humide ou demi-sèche (Figure I-4). [SAL 07]

Aujourd'hui, La voie sèche, est de très loin la technique la plus employée, à travers le monde. La matière première est préparée sous forme de poudre. La préhomogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des constituants essentiels du ciment, par superposition de multiples couches. Une station d'échantillonnage analyse régulièrement les constituants et le mélange pour en

garantir la régularité. À la sortie du hall de préhomogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre présentant la finesse requise. Cette poudre, le « cru », est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation. [ABD 08]

D'autres techniques consistent à agglomérer la matière sous forme de granules (voie semi-sèche) ou à la transformer en une pâte fluide (voie semi-humide ou humide). Ces techniques, consommatrices d'énergie, ont été progressivement abandonnées en France au profit de la voie sèche. [ABD 08]

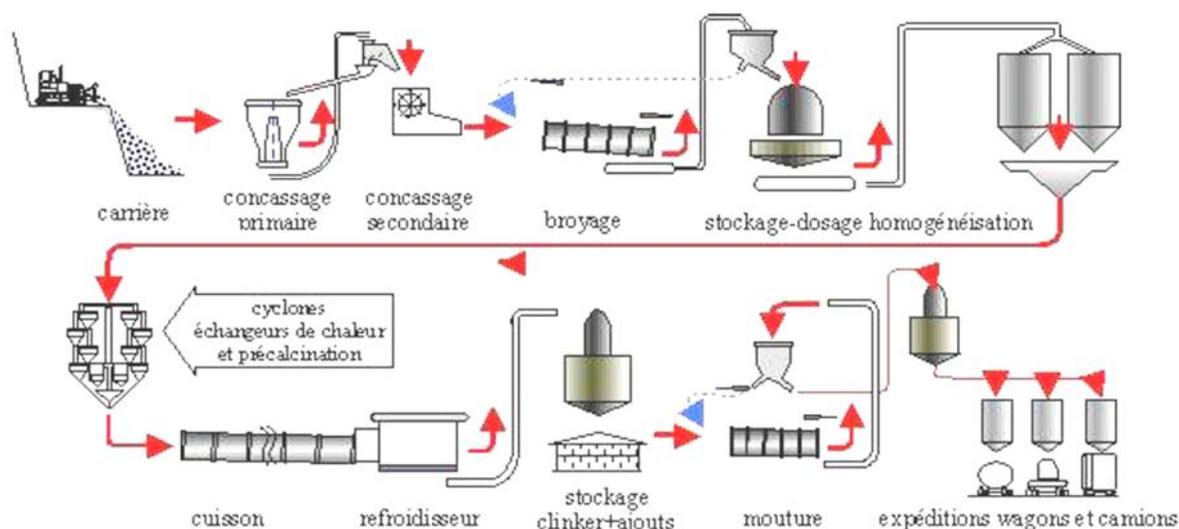


Fig. -4. Schéma d'une usine de fabrication des ciments

-2-3-Les Constituants du ciment

-2-3-1- Le clinker

Il est le résultat de la cuisson d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire et de 20% d'argiles. le clinker prend la forme de granules durs avant d'être finement broyé pour entrer dans la composition d'un ciment. Il est principalement composé de quatre types d'oxydes: CaO (C), SiO_2 (S), Al_2O_3 (A) et Fe_2O_3 (F). Ces oxydes qui se combinent pour former quatre phases cristallisées principales (figure I-5) [BUR 12]:

L'alite C_3S , silicate tricalcique Ca_3SiO_5 (35-65 % en masse)

La bélite C_2S , silicate dicalcique $-\text{Ca}_2\text{SiO}_5$ (10-40 %)

La célite C_3A : aluminat tricalcique $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ (0-15 %)

L'alumino-ferrite tétracalcique C_4AF : $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ (5-15 %).

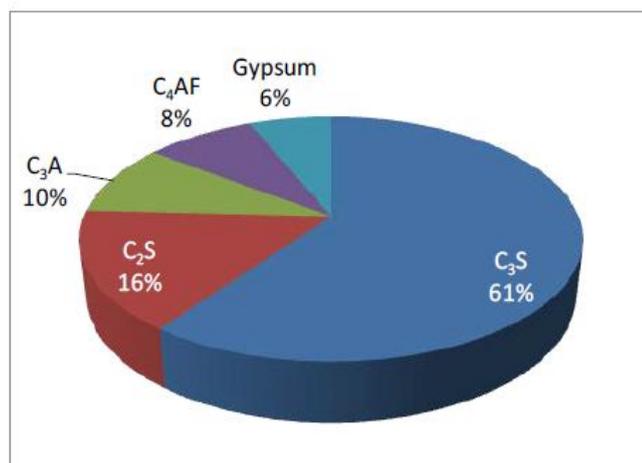


Fig. -5. Composition typique d'un ciment portland type I

Des oxydes mineurs comme MgO, TiO₂, MnO, K₂O, Na₂O et P₂O₅, conditionnent en partie les propriétés physicochimiques et mécaniques du ciment. Ils jouent un rôle notable dans le processus de cuisson du clinker, les ions métalliques de ces oxydes s'insèrent dans le réseau des silicates, aluminates et alumino-ferrites, soit en remplacement des quatre oxydes principaux, soit en sites interstitiels, soit dans les lacunes du réseau.

L'alite, ou hatrurite pour son équivalent naturel, est le principal constituant du clinker avec une proportion dépassant généralement les (60 – 65%). Ce silicate tricalcique (Ca₃SiO₅) est un nésosilicate, il est composé de tétraèdres de silice (SiO₄)⁴⁻ isolés et liés aux ions Ca²⁺ coordonnés octaédriquement. Seuls trois octaèdres sont liés aux ions Si⁴⁺. En fonction de la température et des ions de substitutions du Ca²⁺, il existe plusieurs polymorphes de structures cristallines différentes: une rhomboédrique de haute température (supérieure à 1070 °C), trois monocliniques de moyenne température (de 980 °C à 1070 °C) que l'on retrouve dans le clinker et trois tricliniques de basse température (inférieure à 980 °C). Le C₃S s'hydrate rapidement et est largement responsable de la prise et du durcissement de la pâte; le C₃S assure la résistance initiale (figure I-6).

La Bélite est un silicate dicalcique (Ca₂SiO₄) est la deuxième phase en importance dans les clinkers. Comme l'alite, il possède un polymorphisme très compliqué et encore mal connu. La bélite, ou larnite pour son homologue naturel, est aussi un nésosilicate de système cristallin monoclinique. La concentration en ions se substituant au Ca²⁺ est plus importante que dans le silicate tricalcique, Les plus communs sont : K⁺, Na⁺, Fe²⁺, Ba²⁺, Sr²⁺ et Mg²⁺. Le C₂S s'hydrate lentement, il est responsable du gain en résistance à long terme (une semaine et plus).

La célite ou/et Ferrite aux températures de clinkérisation, les cristaux de silicates de calcium sont entourés par un liquide interstitiel. Ce liquide, après solidification, se compose globalement d'un mélange intime d'une phase riche en Al₂O₃, la célite ou aluminat tricalcique (Ca₃Al₂O₆) et d'une phase riche en Fe₂O₃, la ferrite, ou brownmillérite pour son équivalent naturel, qui est un alumino-ferrite tétracalcique (solution solide de Ca₂(Al_x,Fe_{1-x})₂O₅ pour x = 0,7).

L'aluminate tricalcique, qui a un système cristallin cubique, n'est pas polymorphe et ne possède pas d'équivalent naturel. C'est un cyclo-aluminate composé de tétraèdres d'alumine

(AlO_4^{5-}) disposés en anneaux constitués de six (AlO) $^{4-}$ (Al_6O_{18}) $^{18-}$. Il peut incorporer des ions Na^+ en substitution des ions Ca^{2+} .

Le C_3A s'hydrate très rapidement, et libère beaucoup de chaleur dans les premiers jours, et contribue légèrement à la résistance initiale. Le C_4AF s'hydrate lentement et contribue peu à la résistance mécanique. Le sulfate de calcium est ajouté au broyage pour contrôler l'hydratation du C_3A par la formation de composés moins réactifs (ettringite, sulfoaluminates). Sans le gypse, le ciment contenant du C_3A fait prise trop rapidement. [GAG 96]

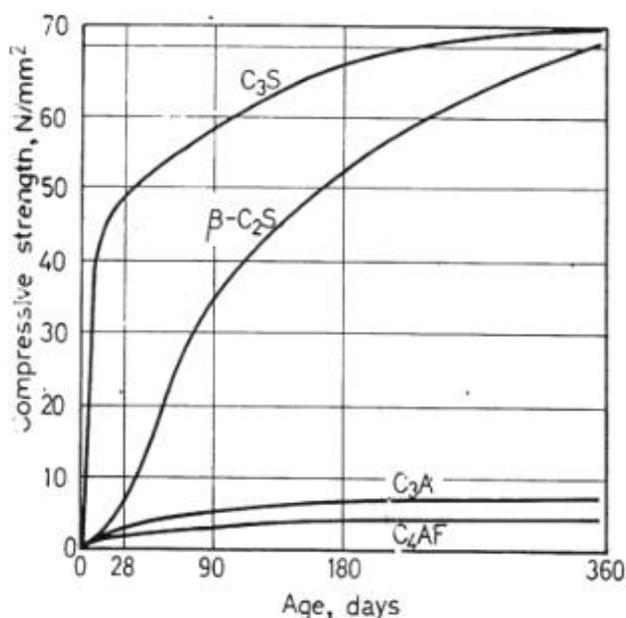


Fig. -6. Résistance à la compression des phases cristallisées principales du clinker

La composition chimique d'un clinker est donnée au tableau suivant (Tableau I-1).

Tab. -1. Composition chimique du clinker :

Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Ti ₂ O
Fourchette %	62 à 68	18 à 24	4 à 8	2 à 5	0 à 5	0 à 5	0 à 2	0 à 2	0 à 2
Moyenne %	66,6	21,9	6,3	2,5	1,0	0,8	0,2	0,2	0,2

-2-3-2- Le gypse(CaSO_4):

Le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ralentit la prise du ciment. Il réagit énergiquement avec l'hydroaluminat tricalcique et produit un sel insoluble d'hydrosulfoaluminat de calcium ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{CaSO}_4.31\text{H}_2\text{O}$). La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en C_3A dans le liant et lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydroaluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial. [BOU 10]

-2-4-Classification des ciments courants

Selon sa composition, les ciments constitués de clinker et d'ajouts cimentaires respectent les normes Européenne ENV 197-1 et Algérienne NA 442, qui les divisent en cinq classes et notés « CEM » suivi d'un chiffre romain de 1 à 5:

- CEM I Ciment Portland Artificiel;
- CEM II Ciment Portland composé;
- CEM III Ciment de haut fourneau;
- CEM IV Ciment pouzzolanique;
- CEM V Ciment aux laitiers et aux cendres.

Selon ses résistances à la compression, les normes Algériennes NA 234 et européennes EN 196-1 classent les ciments par rapport aux résistances normales à 2, 7 et 28 jours. La résistance normale du ciment est la résistance à la compression mesurée sur mortier normalisé conformément à la norme, elle s'exprime couramment en MPa. [BOU 10]

Selon que des constituants autres que le gypse (tableau I-2), sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments. Le tableau ci-dessous donne la liste des différents types de ciments courants normalisés. [FES98]

Tab. -2. les différents types de ciment courant :

désignation	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un de constituants suivant : laitier pouzzolanes cendres – calcaires - schistes- fumées de silice
CEM I	95 à 100%	
CEMII/B	80 à 94%	-de 6 à 20% de l'un des constituants, sauf dans le cas où le constituant est les fumées de silice la proportion est limitée à 10%.
	65 à 79%	-de 21 à 35% avec les mêmes restrictions.
CEM III/A	35 à 64%	-35 à 65% de laitier de haut fourneau
CEM III/B	20 à 34%	-66 à 80% de laitier de haut fourneau
CEMIII/C	5 à 19%	-81 à 95% de laitier de haut fourneau
CEMIV/A	65 à 90%	-10 à 35% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10%.
CEMIV/B	45 à 64%	-36 à 55% comme ci-dessus
CEM V/A	40 à 64%	-18 à 30% de laitier de haut fourneau et 18 à 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.
CEM V/B	20 à 39%	-31 à 50% de chacun des deux constituants.

Les ciments sont répartis en trois classes de résistances ; 32.5 - 42.5 - 52.5Mpa (tableau I-3), définis par la valeur minimale de la résistance caractéristique du ciment à 7 et à 28 jours. La résistance du ciment est déterminée sur des éprouvettes de mortier de ciment (Mortier normalisé). [CIM 05]

Tab. .3: Classe de résistance du ciment :

Classe de résistance	Résistance à la compression (en MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante à 28 jours	
	à 2 jours	à 7 jours		
32.5 N	-	16	32,5	52,5
32.5 R	10	-		
42.5 N	10	-	42,5	62,5
42.5 R	20	-		
52.5 N	20	-	52,5	-
52.5 R	30	-		

-3- Les ajouts cimentaires

Dans le processus de fabrication du ciment, c'est l'obtention du clinker qui est responsable de la quasi-totalité des émissions gazeuses, puisque c'est pendant cette étape que les fours sont utilisés et le dioxyde de carbone CO_2 est émis.

Le remplacement d'une quantité de clinker ayant les propriétés d'un liant, permet la réduction de grandes quantités de CO_2 . Ces produits de substitution appelés ajouts cimentaires peuvent être naturels par exemple les roches pouzzolanique, ou très souvent d'origine artificielle, comme les laitiers des hauts-fourneaux, les cendres volantes et les fumées de silice.

En effet les laitiers granulés de hauts-fourneaux et les cendres volantes des centrales thermiques constituent des ajouts hydrauliquement actifs grâce à l'intervention de l'hydroxyde de calcium produit par l'hydratation du clinker, ils réagissent en présence de l'eau pour donner des composés hydratés semblables à ceux du clinker et donc doués de propriétés liantes. [ZOU 11]

-3-1-Définition des ajouts

Les ajouts sont des matériaux minéraux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelques fois également au béton afin d'améliorer les propriétés du mortier ou du béton grâce à une activité hydraulique et / ou pouzzolanique.

Ils sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir un ciment composé plus économique.

-3-2-Avantages des ajouts minéraux [BAR 11]

-3-2-1-Avantages techniques

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 de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés, les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration.

-3-2-2- Avantages économiques

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 mortier ou béton sont des sous-produits, ils demandent relativement moins d'énergie, sinon aucune, lors de la substitution, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment Portland. En effet, dans un béton ordinaire, l'ajout de cendres volantes induit une baisse du prix d'environ 10-30% par rapport à l'OPC. [DUX 07]

-3-2-3- Avantages écologiques

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO_2) (1 ton du ciment = 1 ton du CO_2). De fait, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de (CO_2). Par exemple, la production d'un ton de ciment géopolymère à base de kaolin génère pas plus que 0,180 tonnes de CO_2 provenant de la combustion de carbone, comparé à un ton de CO_2 pour les ciments Portland. [DAV 11]

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.

-3-3-Type des ajouts

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-4) ci-dessous. [BOU 10]

Tab. I-4. Types ajouts utilisés dans les matériaux cimentaires :

Type	Réactivité	Matériaux
hydraulique latent	Fortement réactif	laitier granulé (laitiers de haut fourneaux vitreux granulé), cendres riches en calcium (cendres volantes calciques)
pouzzolanique	fortement réactif	fumée de silice
Pouzzolanique	moyennement réactif	cendres volantes pauvres en calcium (cendres volantes siliceuses), pouzzolanes naturelles (verres volcaniques, tufs volcaniques, trass, phonolithe, terres à diatomées)
pouzzolanique	faiblement réactif	scories cristallines
inerte	pas réactif	filler (farine calcaire et poudre de quartz), fibres pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétiques.

-3-3-1- Cendres volantes (V et W):

Les cendres volantes, sont des produits pulvérulents avec une finesse comprise entre 3500 et 4400 cm^2/g . (figure I-7). Elles proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques et peuvent être : siliceuses (V) (présentent des propriétés pouzzolaniques c'est à dire qu'elles sont capables de fixer la chaux à température ambiante, faisant prise et durcissant par hydratation), ou calciques (W) avec des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques.

Les cendres volantes siliceuses (V) sont constituées de silice réactive, entre 40 et 55 %, (il ne doit jamais être inférieur à 25 %), et d'alumine entre 20 et 30 % environ, la proportion de chaux réactive devant être inférieure à 5 %. Les cendres calciques (W), moins souvent utilisées, doivent contenir une proportion de chaux réactive supérieure à 5 %. [FES 98]



Fig. -7. poudre de cendre volante

-3-3-2- Fumé de silice

La fumée de silice est une nouvelle venue parmi les liants hydrauliques. Cependant, son action dans le béton n'est pas seulement celle d'une pouzzolane très réactive, car elle présente d'autres qualités particulièrement bénéfiques pour les bétons (figure I-8). [NEV 00]

Les fumées de silice, constituées de particules environ 100 fois plus petites que les grains de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de $1/10$ de micron, présentent des propriétés pouzzolaniques en raison de leur forte teneur en silice amorphe. En outre, en raison de leur finesse, elles complètent la granulométrie des ciments (20 à $25 \text{ m}^2/\text{g}$). Ces billes ont un diamètre moyen 100 fois plus petit que les grains de ciment (0.25 à $0.50 \text{ m}^2/\text{g}$). Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice.

Elles doivent contenir au moins 85% de silice réactive, la réaction pouzzolanique s'avérant plus élevée que celles des pouzzolanes naturelles ou des cendres volantes. [FES 98]



Fig. -8. Tunnel de Lötschberg (Suisse) réalisé par un béton à fumée de silice

-3-3-3- Laitier granulé de haut-fourneau

Le laitier, sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités (figure I-9), tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc davantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de la chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique. [FES 98]

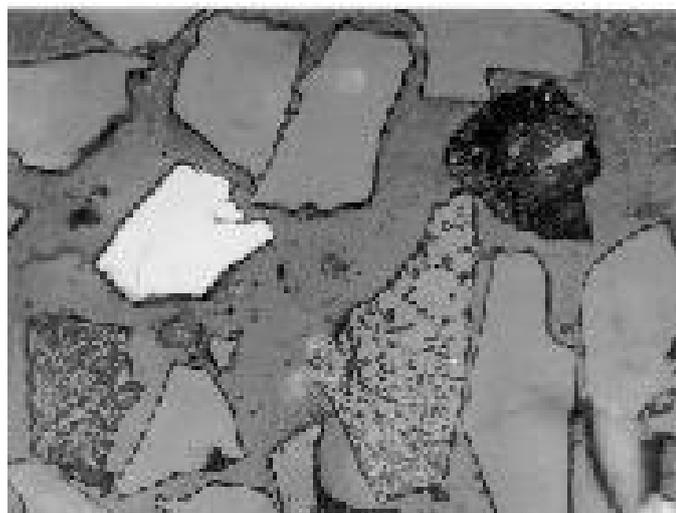


Fig. -9. Laitier de haut fourneau sous microscope optique

-3-3-4- Pouzzolane naturelle

C'est des substances d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriée; Les pouzzolanes doivent leur nom aux cendres volcaniques de la région de Pouzzoles, en Italie, qui étaient utilisées par les Romains dans la préparation du ciment.

Les pouzzolanes naturelles ne durcissent pas par elles-mêmes lorsqu'elles sont mélangées avec de l'eau, mais elles réagissent à température ambiante habituelle, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ dissous, pour former des composés de silicate de calcium et d'aluminate de calcium développant des résistances. [BEN 06]

-3-3-5-Pouzzolanes artificielles

Les pouzzolanes artificielles sont des résidus de certaines industries, fins ou broyés dont les propriétés chimiques sont actives par un traitement thermique approprié ou un traitement physique.

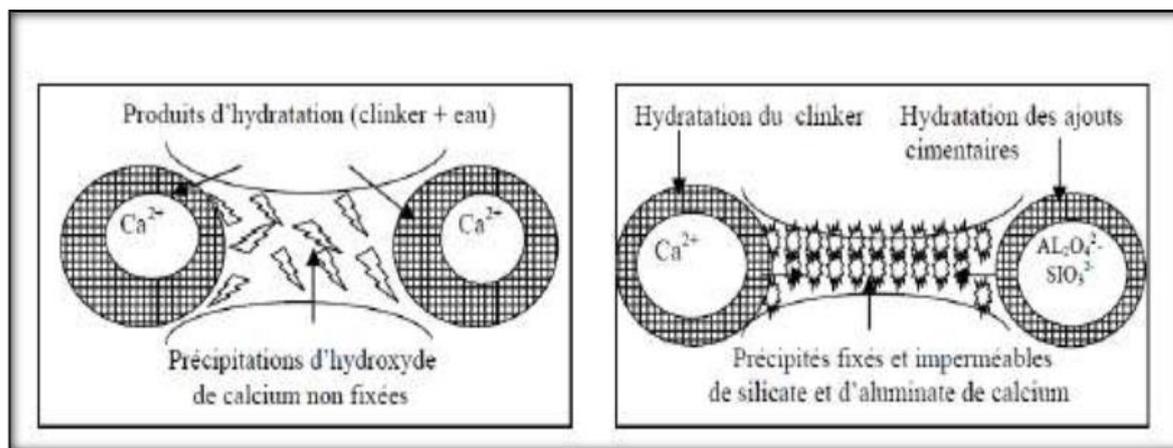
Le traitement chimique provoque une déshydratation et modifie la structure du matériau, qui renferment une quantité importante de silice et d'alumine réactives. [BEN 14], [DEL 08]. Le traitement physique améliore la finesse de la pouzzolane comme par exemple la finesse de la fumée de silice 15000 g/cm^2 .

-3-4-Importance des ajouts

Les ajouts cimentaires finement broyés combler les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau.

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux à la suite de la réaction de l'hydratation du C3S et C2S (30% de la masse du ciment). Cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable de problème de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau.

Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau (figure I-10). [CHA 10]

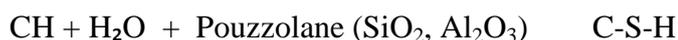


Hydratation d'un ciment avec ajout cimentaire

Hydratation d'un ciment sans ajout cimentaire

Fig. -10. Hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire

La réaction pouzzolanique se produit en solution (dissolution / précipitation) entre la silice et l'alumine provenant de la dissolution de la pouzzolane, et l'hydroxyde de calcium CH issu de l'hydratation du ciment, en formant des silicates calciques hydratés (C-S-H) et aluminates calciques hydratés (C-A-H) qui précipitent sous forme de gel durcissant en une structure amorphe. [BOU 10]



-3-5-L'utilisation des ajouts en Algérie

Après l'indépendance, la production cimentaires varié entre 50 000 et 400 000 tonnes par an, à Miftah, Zehana et Rais Hamido. Plus tard, au cours de la période 1983-2005, deux nouvelles lignes à Aïn Touta (Batna) et Elma Labiod (Tébessa), portant la capacité productive à 11,5 millions de tonnes /an.

En 2002, le Groupe industriel des ciments d'Algérie «GICA» a vue le jour et hérité des quatre groupes régionaux et leurs filiales (ERCE, ERCC, ECDE et ERCO), avec la vocation de la gestion du portefeuille de 23 filiales et 02 prises de participations. [GIC 18]

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie, comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf.

Le tableau suivant (tableau I-5), donne une idée sur les ajouts utilisés par les cimenteries algériennes. [KER 09]

Tab. -5. Les différents ajouts utilisés en Algérie :

Ajouts Utilisés	Cimenterie	Entreprise
Pouzzolane	Ain Touta	Groupe Industriel des Ciments d'Algérie «GICA»
	Ain El Kebira	
	Hamma Bouziane	
Laitier	H'djar Essaoud	
Tuf / Calcaire	Meftah	
Poussière	Raïss Hamidou	
Calcaire/Tuf	Sour EL Ghozlane	
Calcaire	Chlef	
Pouzzolane	Beni Saf	
	Zahana	
	Saida	

-4-Conclusion

Les ajouts cimentaires (introduites dans toutes les étapes de production du ciment anhydre) font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques, chimiques et physiques des matériaux cimentaires (mortier et béton).

D'autre part leurs utilisations ont pour objectifs de réduire la consommation de clinker et par conséquent la diminution des émissions gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone par exemple, ainsi en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Chapitre II

L'argile calcinée

Chapitre : L'argile calcinée

-1-Introduction

Les argiles constituent la partie altérée des roches qui affleurent à la surface de l'écorce terrestre. Elles se forment le plus souvent par l'altération des minéraux de roches sous l'action des eaux, soit de surface, soit hydrothermales. Dans les deux cas, il y a un lien étroit entre la présence de l'argile et de l'eau. Les modes de formation des argiles sont souvent complexes et perturbés dans les phénomènes géologiques naturels, elles sont en conséquence toujours accompagnées d'impuretés.

L'argile, en tant que roche, est constituée par des substances diverses sous formes de particules de très petite taille telles que: les carbonates, la silice, l'alumine, les sulfures, l'oxyde et l'hydroxyde de fer, l'oxyde de manganèse, la matière organique,... En procédant à la séparation par lévigation des constituants des argiles en fonction de leurs tailles, on s'est rendu compte que leurs propriétés de plasticité et d'adsorption sont imputables à la présence de particules fines de taille inférieure à 2 μm . Ainsi, on a défini la fraction argileuse fine comme étant la fraction formée de minéraux argileux de différentes natures et dont la taille des particules est inférieure à 2 μm . [BOU 12]

-2-Définition

Le terme argile trouve son origine dans le mot grec argilos dérivé d'argos qui signifie blanc, puis sa traduction en latin : argilla. Cette nomination par les anciens est semble-t-il due à la couleur du matériau utilisé en céramique.

L'argile brute contient généralement des particules élémentaires dont le diamètre des grains est inférieur à 2 micromètre ($<2\mu\text{m}$) qui représente les individus cristallins (phase minérale pure) appelés minéraux argileux responsable de ses propriétés tel que le gonflement, la plasticité et les propriétés d'adsorption. Mais dans les sols, ces particules élémentaires sont en général liées entre elles par des ciments de nature très diverse (carbonates, composés organiques, composés minéraux amorphes ou oxydes et hydroxyde de fer et d'aluminium, quartz feldspaths) au sein d'agrégat de tailles beaucoup plus grandes. [CHO 13]

-3-Classification des argiles

On différencie les argiles par leur type de combinaison d'empilement des feuillets tétraédriques et octaédriques, le cation de la couche octaédrique, la charge de l'argile et le type de matériel interfoliaire. Les minéraux argileux se répartissent en plusieurs grandes familles : [HER 16], [CHO 13]

-3-1- Groupe Kaolinite [7.1A°]

Cette argile (Kaolinite) blanche, douce, friable, réfractaire, contient autant d'aluminium que de silice. Riche en silice et peu concentrée en sels minéraux, elle est utilisée pour la fabrication de porcelaine et de céramique.

Le feuillet est formé par la juxtaposition d'une couche tétraédrique et une couche octaédrique (figure I-1). Les cristallites des minéraux de type T-O ont leurs feuillets successifs empilés de telle sorte que le plan des atomes d'oxygène d'un feuillet se trouve en face de celui des groupements d'hydroxyles du feuillet voisin. Des liaisons hydrogènes interfeuillets stabilisent alors

l'empilement. Cet assemblage peut se faire pour différentes positions des deux plans, ce qui entraîne des déplacements relatifs des feuillets et détermine le système cristallin du minéral.

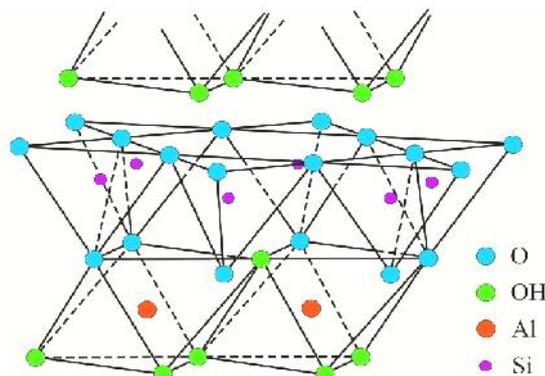


Fig. -1: Structure de la kaolinite.

-3-2- Groupe monmorillonite [9.4 à 15A°]

La monmorillonite est l'argile la plus communément récoltée, elle est généralement vendue verte mais peut-être trouvée sous d'autres couleurs: gris, blanc, bleuté. Son nom provient de sa ville d'origine, Montmorillon située dans la Vienne. Elle détient une forte concentration en silice, en minéraux, dont de la potasse, des oxydes de magnésium, de fer, de manganèse, d'aluminium, de la soude,... D'une rare pureté, l'argile Montmorillonite présente des qualités et des attraits supérieurs à n'importe quelle autre argile verte. Ceci explique que c'est l'argile la plus commune à la vente.

Ce type de minéraux résulte de la combinaison d'une couche octaédrique placée entre deux couches tétraédrique (figure I-2). Les minéraux présentant cette structure sont très nombreux, car les substitutions sont fréquentes aussi bien dans la couche tétraédrique que dans la couche octaédrique, ce qui entraîne la présence de différents cations nécessaires à la neutralisation électrique. La nature de ces cations et leur liaison plus ou moins intime avec le feuillet qu'ils relient, multiplient les espèces chimiques et modifient les propriétés physicochimique des minéraux.

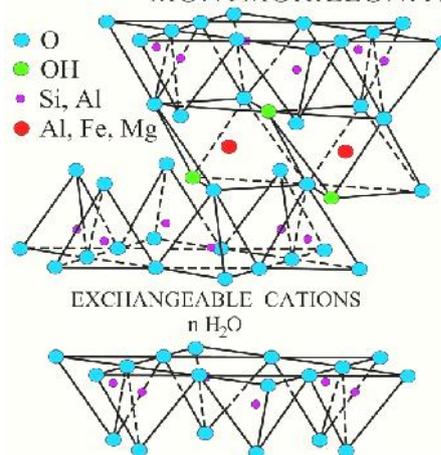


Fig. -2: Structure de la monmorillonite.

-3-3-Groupe de Chlorites [14A°]

Ce nom leur a été attribué pour leur couleur verdâtre, du grec « chloros ». Des chlorites de couleur jaune, rouge ou blanche sont également retrouvés. De structure similaire aux illites et

smectites, l'espace entre leurs feuillets abrite une couche supplémentaire d'hydroxyde de magnésium, de fer ou d'aluminium,...

Ces minéraux sont issus de la combinaison de deux couches octaédriques avec deux couches tétraédriques (figure I-3). La charge du feuillet est compensée par une couche interfoliaire d'octaèdre contenant des atomes d'aluminium et/ou de magnésium.

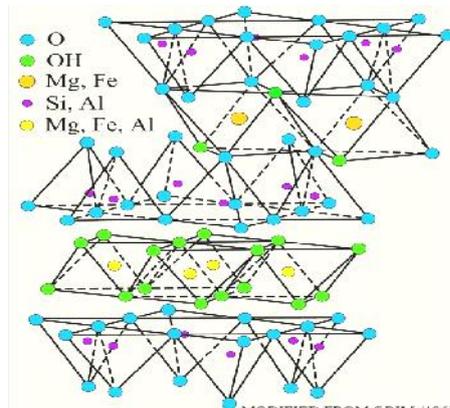


Fig. -3: Structure du Chlorites

-4-La calcination

La calcination est un traitement thermique effectué en présence d'air sur des corps solides. Elle est utilisée en métallurgie pour transformer les métaux en oxydes ou pour la transformation du calcaire en chaux, pour la fabrication du ciment Portland. En distingue deux types de calcination: [BIC 05]

-4-1- La calcination flash

La calcination flash est une calcination très rapide d'un solide, généralement sous forme fine en suspension dans un gaz (figure I-4). Les valeurs typiques sont des chauffages et refroidissements et des durées d'exposition de l'ordre de quelques dixièmes de secondes jusqu'à quelques secondes.

Bien que la plupart des transformations chimiques et physiques aient une cinétique rapide à haute température, le temps très court de résidence dans le four mène à des transformations qui peuvent partiellement ne pas être terminées.

Les propriétés des solides préparés sous ces procédés de chauffage flash, sont différentes de celles de matériaux traités dans des conditions de calcination où l'équilibre chimique et physique a pu être atteint. La calcination flash, à 800°C, a pour effet la déshydroxylation totale ou partielle de la kaolinite ; d'où l'apparition de métakaolinite et non de mullite.

La rapide élévation de température à l'intérieur des particules, génère une vapeur d'eau qui ne peut pas s'échapper par diffusion : la déshydroxylation a eu lieu plus vite que la libération d'eau. Devenant déformables sous l'effet de la chaleur, les particules vont, se modifier pour libérer les bulles de vapeur d'eau sous pression. Le refroidissement rapide bloque alors toute évolution et conserve l'aspect bulleux des particules, ou aspect troué.

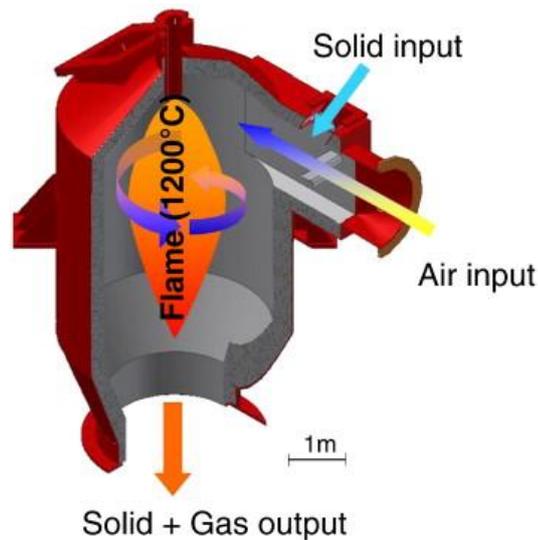


Fig. -4: Représentation d'un four flash pour la production du métakaolin.

-4-2- La calcination traditionnelle

Ce type dure en général, plusieurs heures. L'objectif de la calcination est la stabilisation des matériaux par déshydroxylation. Elle apparaît à partir de 550 à 600°C pour la kaolinite chauffée à vitesse normale par exemple.

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

-4-2-1-Les fours traditionnels

a- Les fours à vis

Les fours à vis sont généralement utilisés pour le traitement de déchets industriels. Les principaux avantages sont un bon mélange interne du déchet ainsi qu'un coefficient d'échange thermique bien meilleur que les fours verticaux. En revanche, les réfractaires présentent un fort taux d'usure, et des fuites aux joints peuvent apparaître. Ce genre d'équipement est utilisé dans le traitement des boues de stations d'épuration des eaux usées à CAPBRETON (FRANCE).

b- Les fours rotatifs (figure I-5)

Le premier four rotatif utilisé dans l'industrie cimentière fût construit et exploité par l'anglais Frederick Ransome. C'est l'installation industrielle couramment utilisée pour les ciments, elle nécessite une première opération de broyage des matériaux. Les fours rotatifs sont également utilisés dans la calcination de matériaux minéraux et dans la pyrolyse des déchets.

La rotation et l'inclinaison font que la matière progresse suivant l'axe. Ces fours génèrent des temps de chauffe de nombreuses heures afin de garantir une calcination satisfaisante des matériaux. D'autre part, le tube est porté à haute température.

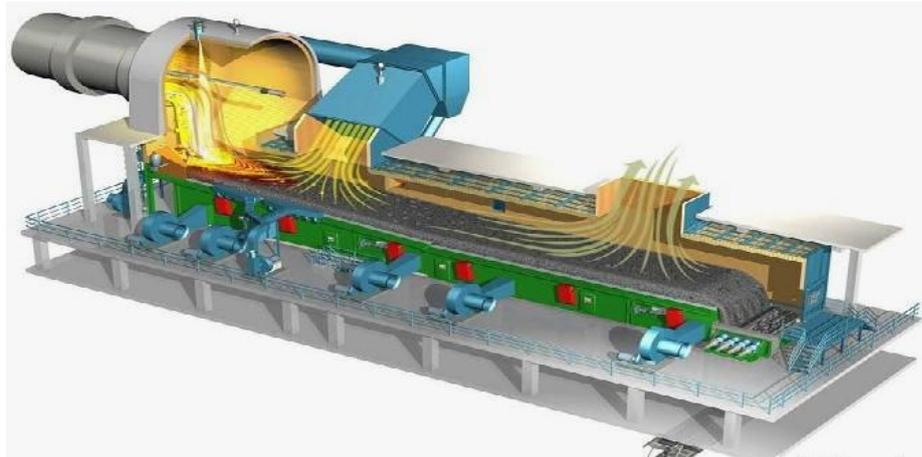


Fig. -5: Principe de fonctionnement de four rotatif

c- Les fours à lit fluidisé

Le lit fluidisé permet, au moyen d'un flux de gaz ascendant, de porter un produit à l'état fluide. Le principal avantage réside dans une bonne homogénéité de la température du lit. Par contre, les inconvénients majeurs sont la nécessité de calibrer les particules ainsi que la création d'un fort taux de poussières dans les affluents gazeux qui nécessite un dépoussiérage intense. Les fours à lit fluidisé sont également utilisés dans la calcination de boues, développant ainsi de bons matériaux pouzzolaniques (DINAMEC-belgium).

d- Les fours à multi-foyers ou fours à étages

Les fours à étages sont constitués d'une série de plateaux que les matériaux parcourent en descendant. Ces fours travaillent à contre-courant: les matériaux descendent tandis que les gaz montent, il a donc un bon rendement thermique.

C'est une technique assurant une bonne calcination mais qui manque de flexibilité. En effet, elle présente une inertie très grande et exige des temps de séjour assez longs. Ces types de fours (NESA Belgique) ont commencé à se développer avec les techniques d'incinération de boues et de déchets industriels. C'est un procédé qui permet d'obtenir une bonne stabilité des paramètres et un produit calciné très réactif.

-4-3- L'effet de la transformation thermique sur les argiles

La première tentative a été élaboré par, Le Chatelier en 1887, lors de ses recherches sur les argiles, il montra qu'on pouvait se baser sur les anomalies thermiques (variant de 150 à 770 °C) qui se présentent en cours d'échauffement pour établir une classification des minéraux, mais cette procédure reposait sur des preuves très minces.

En 1927 à Paris, J. Orcel appliquait la procédure thermique différentielle dans sa forme moderne à l'étude des minéraux argileux. Depuis ce temps cette procédure a été utilisée dans l'étude des argiles par de nombreux chercheurs dans de nombreux pays différents.

En 1945 S. Spiel et al. Ont tracés une courbe thermique différentielle pour la kaolinite. La réaction endothermique entre environ 500 °C et 700 °C correspond évidemment à la déshydratation de la matière minérale (figure II-6). [Grim]

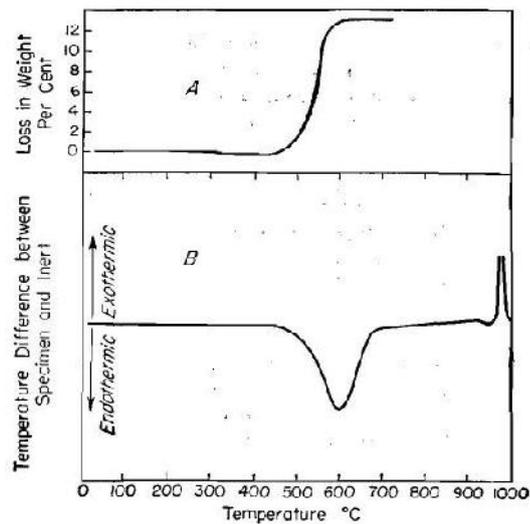


Fig. -6: Courbe thermique différentielle pour la kaolinite

-5-La vase

Une fois ce matériau solide arrivé dans les cours d'eau, il sera transporté par la force du courant. Les concentrations des sédiments sont très élevées suivant les cours d'eau, et l'importance des crues. Variant de 50 à 150 g/l, avec des valeurs maximales dépassant même 500 et 600 g/l puisque des valeurs de 650 g/l ont été enregistrées sur certaines rivières. Une proportion importante de ces sédiments sera piégée dans les retenues de barrages. [REM 03]

Une fois la crue arrivée au niveau des eaux calmes du réservoir, les matériaux grossiers se déposent dans la zone de remous en formant un «delta» en queue de la retenue. Les particules fines sont piégées et commencent à se déposer, se tasser, et à se consolider diminuant ainsi progressivement la capacité de stockage en eau. En l'absence d'ouverture des vannes, les sédiments se compactent selon leur nature, et les conditions physico-chimiques du milieu (Figure II-7).

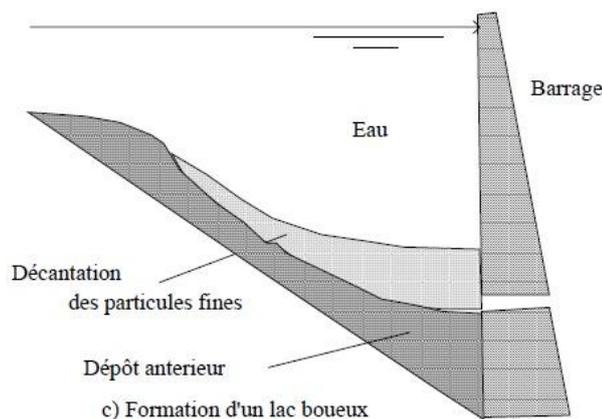


Fig. -7: La formation de la vase dans les barrages [REM 03]

La formation boueuse ou la vase est la désignation générale d'une large famille de sédiments fins argileux, plus ou moins organiques, pouvant atteindre des teneurs en eau très supérieures à la limite de liquidité.

Les vases sont constituées de quatre éléments principaux: [BOU 10]

- La matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates);
- La fraction argileuse (kaolinite, illite ou smectite);

- La fraction organique (débris végétaux, micro-organismes ...);
- Une certaine quantité d'au, présente sous différentes formes.

La fraction solide des vases de barrage constitue un matériau économique local très attractif du fait de sa granularité fine économisant les étapes coûteuses de concassage et tamisage dans les applications en génie civil. L'utilisation de ces matériaux contribue sûrement à la protection de l'environnement contre les désordres apparus suite aux simples rejets des matériaux dragués.

-5-1-La valorisation des vases

L'Algérie enregistre une pluviométrie moyenne annuelle évaluée à 100 milliards de m³. Sur lesquels les eaux de ruissellement ou écoulements superficiels représentent environ 12,5 milliards de m³, le reste des précipitations se partage entre évaporation et infiltration dans le sol.

Aujourd'hui, l'Algérie dispose de plus de 110 barrages en exploitation totalisant une capacité de 4,5 milliards de m³. Or du fait de l'érosion assez sensible (pluie de courte durée, de forte intensité, absence du couvert végétal et relief assez jeune ...), l'Algérie perd annuellement une capacité estimée à 20 millions de m³ par le dépôt des sédiments dans les retenues.

Dans de nombreux pays du monde, le transport des sédiments dans les bassins versants et leur dépôt dans les retenues pose aux exploitants des barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse. Non seulement la capacité utile est progressivement réduite au fur et à mesure que les sédiments se déposent dans la retenue mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, qui bien souvent exige que la retenue soit hors service, ce qui est pratiquement impossible dans les pays arides et semi-arides. Dans l'un et l'autre cas, il en résulte des dommages considérables à l'environnement et une mise en péril de l'économie du projet. [BEN 14]

Il est essentiel d'avoir une bonne connaissance des propriétés des matériaux à vidanger avant l'opération de dragage pour le choix des moyens à mettre en œuvre. Un traitement économique de ces matériaux est recherché dans un but d'améliorer leurs propriétés physiques et mécaniques, Le traitement peut se faire: [ABD 15]

*Soit par stabilisation de la vase par ajout d'autres produits qui améliorent certaines propriétés;

*Soit par traitement physico-chimique;

*Soit par une dépollution.

-5-2-Présentation du bassin versant du K'sob

Le bassin versant du Hodna est le cinquième grand bassin d'Algérie. Il est situé à 150Km à vol d'oiseau au sud de la côte méditerranéenne (Golf de Bejaïa). L'altitude des sommets des monts du Hodna diminuant d'Est en Ouest oscille entre 1900 et 1000 m, tandis qu'au Sud quelques sommets situés dans l'atlas saharien atteignent 1200 m.

Le bassin versant du barrage K'sob, s'étale sur une superficie de 1460 Km² avec un périmètre d'environ 180 Km. Il appartient au grand bassin versant du chott Hodna dont il occupe 41% de la surface. Le coefficient de Graveleuse de ce bassin versant est 1.26 ce qui indique une forme allongée (Figure II-8).

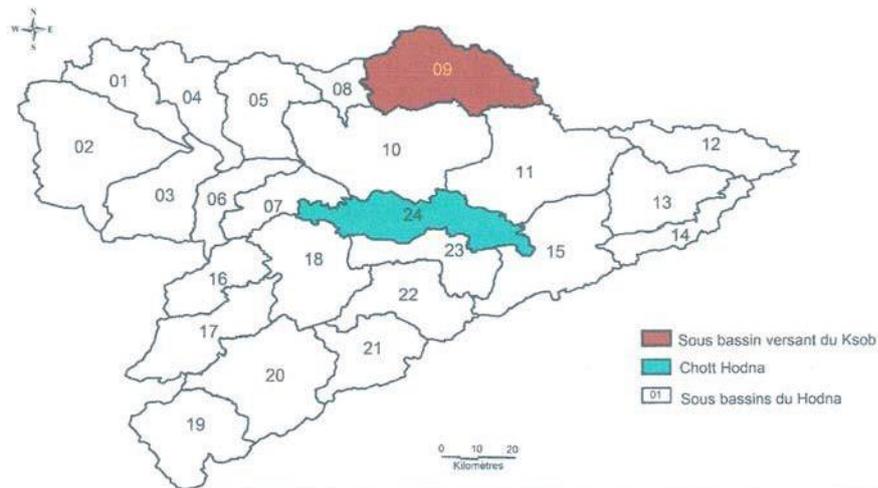


Fig. .8. Situation géographique du bassin versant du K'sob.

-5-3-Utilisation de la vase dans les matériaux cimentaires

La production du ciment Portland, le plus commun des matériaux de construction, a un coût énergétique élevé, calciné à de hautes températures, sa production coûte chère et dégage des gaz à effet de serre portant un énorme préjudice à l'environnement. Le besoin d'un produit de substitution est urgent, la réduction des coûts est cependant liée à la baisse des matériaux de construction. Le ciment à base de ces additions fournit une solution opportune. [BEN 14]

Les chercheurs collaborent entre eux pour pouvoir élaborer à bon marché à partir des déchets naturels ou industriels en abondance, ou encore les boues de dragage utilisés partiellement en substitution au ciment conventionnel, des matériaux pouvant être introduites à différentes étapes dans les matériaux cimentaires (clinker, ciments, mortiers ou bétons).

Aouad et al. [AOU 12] ont utilisé 0,391Kg de sédiment de dragage d'un canal au nord de la France, de la calcite et des correcteurs afin de respecter les modules silicique et ferrique ... etc. ainsi que les formules de bogues pour produire 1Kg de clinker. Ce dernier a montré un taux d'hydratation meilleur que le ciment portland de référence (figure II-8) et une résistance plus élevée.

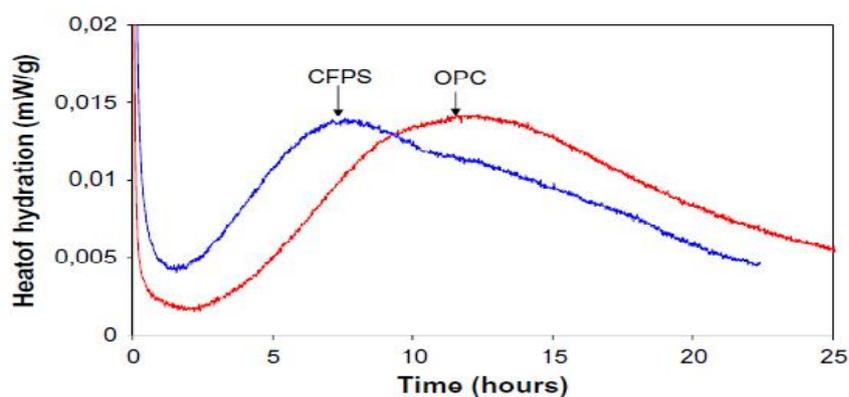


Fig. -9: Chaleur d'hydratation d'un ciment portland vs. ciment fabriquée à base de sédiment de dragage⁽³³⁾

Ben Allal et al. [BEN A.] Lors de l'utilisation des sédiments de dragage non-calciné de deux port marocains à hauteur de 20% ont constaté la diminution de la résistance d'environ 50%, ce-ci à cause de la matière organique qui peut altérer et empêcher l'hydratation du ciment.

Chikouche et al. [CHI 16] avec les sédiments de dragage du barrage K'sob calcinés à hauteur de 600°C ont pu élever la résistance à 28 jours à hauteur de 40 Mpa avec une substitution du clinker à hauteur de 10%, contre 45 Mpa pour un ciment portland (Figure II-9)

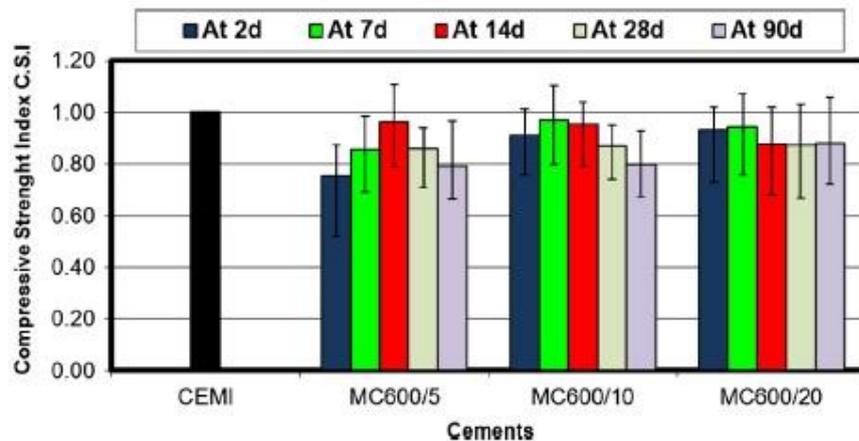


Fig. -10 : Résistance à la compression du mortier à base de sédiment de dragage ⁽³⁵⁾

-6 Conclusion

L'ennemi silencieux des barrages occupe de plus en plus d'espaces, le largage à l'aval sur des terres non-agricole semble une alternative, mais ne constitue pas une solution à long terme. Ces énormes quantités de sédiments présentes dans les barrages en Algérie (spécifiquement dans le barrage K'sob), mérite une valorisation dans la confection des bétons, qui semble une alternative bien fondée et une solution à long terme par rapport aux caractéristiques prometteuses de ces matériaux.

Chapitre III

Essais et résultats

Chapitre I : Essais et résultants

Introduction :

Nous allons présenter dans ce chapitre, les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection du béton. Les matériaux utilisés sont :

- Le sable fin de la région de BOUSAADA (OUED MAITAR);
- Le gravier de carrière située à 25Km de M'sila;
- Le ciment de CEM I de la cimenterie de Hammam Dalaâ (Wilaya de M'sila);
- L'eau potable du laboratoire (laboratoire de génie civil de M'sila).

-1- Caractérisation des matériaux utilisés

-1-1- Le sable:

Le sable de base de notre étude provient des abords de l'OUED MAITRE. Cet oued est situé entre les collines de BOUSAADA, dont le vent provient du sud est chargé de grains fins.

L'avancée du désert a permis au fil des ans, le dépôt du sable dans l'OUED, qui par la suite des vents et des pluies torrentielles ont assurés son transport et son étalement dans la région. Ainsi plusieurs couches de sable fin mélangé aux galets de l'OUED se sont formées sur des profondeurs de plusieurs mètres, le long de l'OUED MAITER. Dans un cas général nous pouvons dire que ce sable est d'origine éolienne.

Plusieurs entreprises étatiques et privées exploitent des carrières le long de l'OUED avec divers moyens surtout mécaniques.

III-1-1-1- Caractéristiques physique des sables utilisés:

Le sable a été soumis à plusieurs essais au laboratoire de génie civil à l'université de M'sila suivant les normes françaises **AFNOR**.

a) Masse volumique (absolue): NF P 18-555

Cet essai a pour but la permission de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons (tab.III.1). Ce paramètre permet, en particulier, la détermination de la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

Dans ce travail nous avons utilisé la méthode de l'éprouvette graduée, elle est simple, rapide et utilise le matériel courant du laboratoire.

La masse volumique absolue est la masse de l'unité de volume, c'est-à-dire le rapport entre sa masse et son volume absolu.

Mode opératoire:

-On détermine la masse volumique absolue du sable à l'aide du récipient de capacité 1000 ml. On prend 03 échantillons d'une masse 300 g.

-On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000ml et on y verse 300ml d'eau préparé préalablement dans 2^{ème} récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange sable-eau. Soit (V) ce volume.

-Sachant que le volume (V_e) d'eau versé est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul.

Volume de sable : V_s = V_m - V_e [ml]

La masse volumique absolue de sable est déterminée par la formule : $\dots = \frac{M}{V_s} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$

Résultats obtenus :

Tab.III.1: Masse volumique absolue du sable de Boussaâda :

N°d'essai	M [g]	V _e [cm ³]	V ₁ [cm ³]	[g/cm ³]	mo _y [g/cm ³]
01	300	150	266	2,59	2,60
02	300	150	270	2,50	
03	300	150	260	2,73	

On remarque d'après le tableau III.1 que cette masse volumique est comprise entre 2,4 et 2,8, après 3 essais, ce qui est acceptable.

b) Masse volumique apparente: NF P 18-555

Le principe de cet essai c'est de remplir un récipient gradué (200ml) et déterminer la masse du contenu. Les différents résultats sont reportés au tab.III.2. Elle se divise en deux familles, à l'état lâche et compact.

*Masse volumique apparente à l'état lâche :

C'est la masse du matériau par unité de volume y compris les vides existant entre les grains.

Mode opératoire :

-On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 2,5 litres.

-On remplit l'entonnoir avec du sable sec. En même temps, on pèse le récipient vide M₁.

-On place le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable. Une fois le récipient est rempli, on nivelle la surface du sable et on pèse le tout. Soit M₂ ce poids.

-Volume de récipient V_r = 900 cm³.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\dots_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

Résultats obtenus :

Tab III.2: Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état lâche :

N°d'essai	M ₁ [g]	M ₂ [g]	[g/cm ³]	mo _y [g/cm ³]
01	114,33	1468,97	1,51	1,50
02	114,33	1463,96	1,50	
03	114,33	1472,72	1,51	

***Masse volumique apparente à l'état compact :**

C'est la masse du matériau par unité de volume après compactage y compris les vides restant entre les grains. Généralement elle est supérieure à la masse volumique à l'état lâche.

Mode opératoire :

Même méthode que celle de l'état lâche, après remplissage du récipient « après tassement » on soumet ce dernier à 30 secousses manuelles, puis on nivelle ce dernier et on le pèse. Soit « M_2 » le poids de l'ensemble (sable + récipient), la masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

Résultats obtenus :**Tab III.3: Masse volumique apparente du sable de Boussaâda à l'état compact :**

N°d'essai	M ₁ [g]	M ₂ [g]	[g/cm ³]	moy [g/cm ³]
01	115	1569	1,615	1,630
02	115	1582	1,630	
03	115	1597	1,646	

c) Porosité (NF P 18-555)

C'est le volume des vides entre les grains du sable. La porosité peut être déterminée par la formule suivante :

$$P(\%) = 100 - (\text{Masse volumique apparente} / \text{Masse volumique absolue}) \times 100$$

$$P[\%] = \left[1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right] \times 100$$

On distingue deux cas :

Pour le sable de Boussaâda :

- Etat lâche : $\rho_L = 42,31\%$
- Etat compacte : $\rho_c = 37,30\%$

d) Compacité:

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est -à-dire le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau.

$$C = (\rho_{app} / \rho_{abs}) = 100 - P$$

On distingue deux cas :

Pour le sable de Boussaâda :

- Etat lâche : $C_L = 57,69\%$
- Etat compacte : $C_c = 62,69\%$

e) L'indice des vides:

L'indice des vides est le rapport entre le volume du vide et le volume de solide. Avec « P » en pourcent (%).

$$e = V_v / V_s = P / (100 - P)$$

Pour le sable de Boussaâda :

- Etat lâche: $e = 0,73 \%$
- Etat compacte: $e = 0,59 \%$

Les résultats de la porosité, la compacité et l'indice de vide sont regroupés dans le tableau suivant (tab.III.4):

Tab III.4: La porosité, la compacité et l'indice de vide pour le sable de Boussaâda :

Porosité P(%)		Compacité C(%)		Indice des vides e	
Lâche	Compact	Lâche	Compact	Lâche	Compact
42,88	37,30	57,12	62,7	0,75	0,59

f) Equivalente de sable : NF P 18-598

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les floccules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable quantifiant la propreté de celui-ci, comme indiqué au (tab.III.5).

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du sable à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- hauteur h_1 : sable propre + éléments fins.
- hauteur h_2 : sable propre seulement (à vue).
- hauteur h'_2 : sable propre seulement (au piston). On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention est Suivant les différentes hauteurs on mesure ESV et ESP.

Mode opératoire :

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500g), et prendre une pesée de 120 g ;
- Remplir l'éprouvette de solution lavante jusqu'au premier repère (10cm) ;
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120g) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de chasser toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon, et laisser reposer pendant 10 minutes ;
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de cours horizontale en 30 secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique ;
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution la vante au-dessus de l'éprouvette, rincer ensuite les parois de celle-ci ;
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter les éléments fins et argileux.
- Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution la vante atteigne le 2^{ème} repère. Laisser ensuite reposer pendant 20 minutes.
- Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau le du flocculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette ;
- Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

$$EVS = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad [\%]$$

- Introduire de piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce 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.

$$EVS = \frac{h'_2}{h_1} \times 100 \quad [\%]$$

Résultats obtenus :**Tab III.5: Equivalent du sable de Boussaâda :**

N°d'essai	h_1 [cm]	h_2 [cm]	ESV [%]	h'_2 [cm]	ESP [%]
01	10,9	9	82,57	8,3	76,15
02	11	9	81,82	8,3	75,45
03	11	9,1	82,72	8,4	76,36

$$(ESV)_{\text{moy}} = 82,37\%$$

$$(ESP)_{\text{moy}} = 75,98\%$$

Donc : $75 < ESV < 85\%$, et $70 < ESP < 80\%$

Tab.III.6: Comparaison des résultats :

E .S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
$65 < E.S < 75$	$65 < E.S < 70$	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 < E.S < 85$	$70 < E.S < 80$	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de hautes qualité.
E.S 85	E.S 80	Sable très propre : l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Notre sable est un sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de hautes qualité.

g) Teneur en eau : NF P 18-555

Le sable à la capacité de retenir une quantité d'eau très grande (elle peut atteindre 20 à 25 % de son poids). Si son humidité est compris entre la limite de 0 à 3%, on appelle sec.

Mode opératoire :

- Peser un échantillon de sable humide, soit « M_h » son poids (500g) et le laisser dans une étuve à une température dans l'intervalle de 105°C à 110°C pendant 24 heures ;
- Peser l'échantillon de nouveau, soit « M_s » son poids.

La teneur en eau du sable est :

$$W = \left[\frac{M_h - M_s}{M_h} \right] \times 100 \quad [\%]$$

Résultats obtenus

Tab.III.7. Teneur en eau du sable de Boussaâda :

N°d'essai	M _h en [g]	M _s en [g]	W [%]	W _{moy} [%]
01	500	499,1	0,18	0,17
02	500	499,2	0,16	
03	500	499,1	0,18	

h) Degré d'absorption d'eau: NF P 18-555

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau, elle est définie en pourcentage d'après la formule suivante

$$A = \left[\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right] \times 100$$

Où :

-M₁ : La masse du matériau sec en [g].

-M₂ : La masse du matériau saturé d'eau superficielle en [g].

Résultats obtenus

Tab.III.8: Degré d'absorption d'eau du sable de Boussaâda :

N°d'essai	M ₁ en [g]	M ₂ en [g]	A [%]	A _{moy} [%]
01	700	710,5	1,48	1,44
02	700	709,8	1,38	
03	700	710,3	1,45	

Selon le mode opération défini dans les normes NF P 18-554 et NF P 18-555, la limite supérieure du coefficient d'absorption d'eau du granulat est fixée à 5%. Dans notre cas, cette propriété est largement vérifiée.

i) Analyse granulométrique : NF P 18-560

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau, en utilisant une série de tamis.

Mode opératoire :

-Prélever (1 kg) de matériau (sable sec) ;

-Pesier chaque tamis à vide à 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 : 5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,165- et éventuellement 0,08mm, plus d'un couvert et un fond ;

-Verser le matériau (sable sec) sur la colonne et la fixer soigneusement sur la machine d'agitation mécanique, agité pendant 10 minutes. Arrêter l'agitateur, puis séparer avec soin les différents tamis ;

-Pesier chaque tamis séparément à près. Soit « M_i » la masse du tamis (I) + le sable. La différence entre M_i et m_i (tamis de plus grandes mailles) correspond au refus partiel R₁ du tamis 1. Et reprendre l'opération pour chaque tamis inférieur ;

-Ajouter le refus obtenu sur le sixième tamis à R₁, soit R₂ la masse du refus cumulé du tamis 2 (R₂=R₁+Refus partiel sur tamis) ;

-Poursuivre l'opération avec le reste des tamis pour obtenir le smasse des différents refus cumulés R_3, R_4, \dots etc.;

-Le tamisât cumulé est donné par la relation suivante : $T = 100 - R_C$.

Où : T: Tamisât en % et R_C : Refus cumulés en (%)

Résultats obtenus

Tab.III.9: Analyse granulométrique du sable de Boussaâda :

Tamis [mm]	Refus [g]	Refus cumulés		Tamisât [%]
		[g]	(%)	
5	0.8	0.8	0.08	99.92
2,5	36.9	37.7	3.77	96.23
1,25	48.9	86.6	8.66	91.34
0,63	75.3	161.9	16.19	83.81
0,315	93.8	255.7	25.57	74.43
0,16	519.3	775	77.50	22.50
0,08	200.5	975.5	97.55	2.45
Fond	24.33	999.83	99.98	0.02

j) Module de finesse :

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable. Il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés par les tamis de maille : [0,16-0,315-0,63-1,25-2,5 et 5(mm)] sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$M_f = \sum \frac{R_C}{100}$$

Où :

R_C : Refus cumulé.

Les normes soviétiques spécifient le « M_f » des sables comme suit :

- *Sable gros $M_f > 2,5$.
- *Sable moyen $2 < M_f < 2,5$.
- *Sable fin $1,5 < M_f < 2$.
- *Sable très fin $1 < M_f < 1,5$.

On se basant sur cette classification, on constate que notre sable est très fin avec un module de finesse égale à 1,32.

-1-2-Le gravier :

Le gravier de base utilise dans la confection du béton est obtenu, par concassage de la roche d'une carrière. Les fractions granulaires du gravier utilisées sont :

- Fraction 3 / 8
- Fraction 8 / 15
- Fraction 15 / 25

III-1-2-1-Caractéristiques physique du gravier utilisé:

a) Masse volumique apparente :

Mode opératoire :

- Sécher le matériau jusqu'à un poids constant ;
- Peser le récipient à l'état vide « M_1 », puis le poser sur une table. A l'aide d'une pelle remplir le gravier avec un certain excédent que l'on relève au ras de la surface du récipient. La distance séparant le récipient de la pelle doit être au environ de 10 cm ;
- Peser de nouveau le récipient plein de gravier .soit« M_2 » ce poids.

La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante : $\dots = \frac{M_2 - M_1}{V}$

Résultats obtenus**Tab.III.10: Masse volumique apparente du Gravier :**

Fraction	N° d'essai	M ₁ [kg]	M ₂ [kg]	V [L]	[kg/L]	moy [kg/L]
3/8	01	2,922	12,640	7	1,39	1,39
	02		12,693		1,40	
	03		12,674		1,39	
8/15	01	3,468	17,521	10	1,41	1,40
	02		17,500		1,40	
	03		17,480		1,40	
15/25	01	7,292	36,245	20	1,450	1,45
	02		36,300		1,450	
	03		36,500		1,460	

b) Masse volumique absolue :**Mode opératoire :**

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique absolue du sable.

Tab III.11: Masse volumique absolue du gravier :

Fraction	N°d'essai	M [g]	V _e [cm ³]	V ₁ [cm ³]	[g/cm ³]	moy [g/cm ³]
3/8	01	300	300	410	2,73	2,69
	02			415	2,61	
	03			410	2,73	
8/15	01	300	300	415	2,61	2,65
	02			415	2,61	
	03			410	2,73	
15/25	01	300	300	410	2,73	2,69
	02			410	2,73	
	03			415	2,61	

c) Porosité, Compacité et Indice des vides NF P 18-555 :

Le mode opératoire est semblable à celui effectué pour le sable, les résultats sont illustrés aux (tab.III.12).

Tab.III.12: Porosité, Compacité, et indice des vides :

Fraction	Porosité [%]	Compacité [%]	indice des vides [%]
3/8	48,32	51,68	0,93
8/15	47,16	52,84	0,89
15/25	46,09	53,91	0,85

d) Analyse granulométrique :

Les résultats obtenus de chaque fraction du gravier, sont regroupés dans les tableaux ci-dessous.

➤ La fraction 3/8 (1.6kg) :

Tab .III.13: Analyse granulométrique du gravier concassées 3/8 :

Tamis [mm]	Refus partiel [g]	Refus cumulés		Tamisât [%]
		[g]	[%]	
8	1,2	1,2	0,08	99,93
6,3	122,1	123.3	7,71	92,29
5	457,3	580.6	36,29	63,71
2.5	1010.6	1591.2	99,45	0.55
1.25	8	1599.2	99,95	0.05
Fond	0	1599.2	99,95	0,05

➤ La fraction 8/15 (3 kg) :

Tab.III.1 4: Analyse granulométrique du gravier concassé 8/15 :

Tamis [mm]	Refus partiel [g]	Refus cumulés		Tamis [%]
		[g]	[%]	
16	0	0	0.00	100.00
12,5	560.6	560.6	18.69	81.31
10	1129.6	1690.2	56.34	43.66
8	1040.2	2730.4	91.01	8.99
6,3	249.3	2979.7	99.32	0.68
Fond	19.9	2999.6	99.99	0.01

➤ La fraction 15/25 (5 kg) :

Tab.III.15: Analyse granulométrique du gravier concassé 15/25 :

Tamis [mm]	Refus partiel [g]	Refus cumulés		Tamis [%]
		[g]	[%]	
25	0.00	0.00	0.00	100.00
20	1177.40	1177.40	23.55	76.45
16	2337.90	3515.30	70.31	29.69
12,5	1450.90	4966.20	99.32	0.68
Fond	32.90	4999.10	99.98	0.02

III-1-2-2-Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés :

Ce sont des essais importants pour les granulats. En effet, le passage de véhicules, par exemple, conduit à émousser et polir progressivement les granulats, ainsi diminuer leurs adhérence aux pneumatiques sur la chaussée.

Ces caractéristiques permettent également d'estimer la qualité des granulats utilisés dans la confection de bétons.

a) Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles) : NF P 18-573

Cet essai renseigne sur la dureté des roches en se basant sur un coefficient appelé coefficient Los Angeles (L_A).

Mode opératoire

L'essai consiste à mesurer la masse « M » d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits la fragmentation du matériau (diamètres compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations.

Si « M » est la masse du matériau soumis à l'essai et « m » la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai. La résistance à la fragmentation aux chocs s'explique par le coefficient de Los Angeles (L_A) comme suit : $L_A = \left(\frac{m}{M}\right) \times 100$

Résultats obtenus

Tab III.17: Valeur du coefficient L_A :

Fraction	Nombres des boulets	M [kg]	m [kg]	Coeff « L_A »
8/15	11	05	1.027	20.54
15/25	12	05	0.984	19.68

Si on se réfère au tableau suivant (tab.III.18), ces graviers sont d'une roche dure avec comme moyenne du coefficient $L_A = 20,11$.

Tab. III.18: Classification des roches en fonction du coefficient L_A :

Coefficient L_A	Nature de la roche
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
< 50	Très tendre

III-1-3-L'eau de gâchage :

Nous avons utilisés pour le gâchage de nos différents types de bétons, l'eau du robinet disponible au niveau du laboratoire pédagogique de génie civil.

III-1-4- Caractéristiques du ciment CEM I :

Ses performances lui confèrent une utilisation adéquate pour l'élaboration de béton prêt à l'emploi et aux éléments préfabriqués dans les milieux agressifs

Tab.III.19. Caractéristiques de CEM I(Fiche technique) :

Composition	Standard de conformité
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Clinker 95% ▪ Constituant secondaire 5% ▪ Sulfate de calcium régulateur de prise 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ NT 47.01 (2005) ▪ NT 47.25 (1998) ▪ NT 47.26 (1998)
Utilisations recommandées	Propriétés du béton fabriqué avec ce ciment
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Béton pour travaux à la mer. ▪ Béton pour milieux sélériteux. ▪ Béton de grande masse. ▪ Béton pour fondation et travaux souterrains. ▪ Béton armé hautement sollicité. ▪ Préfabrication en béton armée avec ou sans étuvage. ▪ Béton précontraint. ▪ Dallage et chaussées en béton. ▪ Travaux de carrelage, de revêtement de sol et d'égouts. ▪ Béton prêt à l'emploi. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Croissance normale des résistances mécaniques. ▪ Résistance accrue à l'agressivité des ions sulfates au cours de la prise et ultérieurement soit dans des eaux ayant une concentration en 2 ions SO_4 1500 mg/l ou dans les sols ayant des teneurs en ions SO_4 Travaux à la mer 1,2 %. ▪ Travaux à la mer
Caractéristiques Mécaniques et Physiques	Résistance Mécanique à la Compression
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Début de la prise - (min) 60 ▪ Expansion - (mm) 5 ▪ Résistance initiale (2 jours) - (MPa) 10 ▪ Résistance finale (28 jours) - (MPa) 42.5 	
Caractéristiques chimiques	Précautions à prendre dans l'application

▪ Sulfates (SO ₃)		
▪ Chlorures (Cl)	3,0%	
▪ Perte au feu (P.F.)	0,1%	
▪ Résidu insoluble (R.I.)	3,0%	
▪ Magnésie (MgO)	0,75%	
▪ Souffre à l'état de sulfure S	3,0%	
	0,2%	
▪ Alumine (Al ₂ O ₃)	8,0%	
▪ Aluminat tricalcique (C ₃ A)	3%	
	20%	
▪ C ₄ AF + 2 C ₃ A	23,5%	
▪ C ₃ A + 0,27 C ₃ S		

- Dans le dosage et dans la relation eau/ciment.
- Durant le durcissement du béton, il faut le maintenir humide et éviter sa dessiccation.

a) Composition chimique du ciment CEMI:

La composition chimique (Tab.III.20) du ciment satisfait aux exigences de la norme EN 197-1, tels que la perte au feu avec moins de 5%, le trioxyde de soufre SO₃ moins de 3.5%. on constate que le pourcentage en silice est proche de 22%, la chaux est d'environ 63,5% et la perte au feu et égale à 1,2%.

Tab. III.20: Composition chimique du ciment CEMI:

Code	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CL	Perte au Feu
ciment	21.85	3.74	4,68	63.48	1.88	2.41	0.52	0.1	0.014	1.20

b) Composition minéralogique du ciment CEMI :

Selon les formules de Bogue on peut estimer les différents indices C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF suivant les relations suivantes (tab.III.21):

$$*C_3S = 4.07 \times CaO - 7.6 \times SiO_2 - 6.72 \times Al_2O_3 - 1.43 \times Fe_2O_3$$

$$*C_2S = 2.87 SiO_2 - 0.75 \times C_3S$$

$$*C_3A = 2.65 \times Al_2O_3 - 1.69 \times Fe_2O_3$$

$$*C_4AF = 3.04 \times Fe_2O_3$$

On remarque que la teneur du silicate tricalcique (C₃S) est comprise entre 45 et 79.7, la teneur du silicate dicalcique C₂S est comprise entre 5.7 et 29.8, la teneur en aluminat tricalcique C₃A est entre 1.1 et 14.9 et l'aluminoferritetétracalcique C₄AF est comprise entre 2.0 et 16.5, ce qui est satisfaisant.

Tab.III.21: Composition minéralogique du ciment CEMI :

Indices de Bogue	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CEMI	60,48	17.34	2,0	14.23

III-2-Elaboration des ciments modifiés et les différents bétons

III-2-1-Caractéristique de la vase :

La vase prélevée dans la zone de rejet est convenablement préparée et a subit une transformation thermique conduisant à un changement de couleur (d'une couleur verte à une couleur rouge brique). Elle a été sélectionnée, homogénéisée, séchée en étuve à 105 °C, concassée et réduite en poudre à l'aide d'un broyeur et tamisée au tamis de 100µm puis calcinée à 600° pendant 5 heures avec une montée de 20°C/mn.

III-2-1-1 Analyse Chimique de la vase brute :

Les teneurs des composants chimiques de la vase à l'état naturelle (brute), sont regroupées dans le (tab.III.22). Sa masse volumique absolue est de 2,63 g/cm³, avec une surface spécifique Blaine est de 7000 cm²/g (selon les essais conduits au laboratoire LAFARGE-Groupe M'sila).

La mise en forme de l'analyse chimique et réaliser dans des conditions optimales (au laboratoire LAFARGE-groupe M'sila), c'est-à-dire en surface plane. La poudre est compactée à l'aide d'une presse à pastille manuelle.

La pastille obtenue est collée sur un port échantillon avec du scotch en carbone double face puis métallisée avant d'être introduite dans la chambre du MEB (fig.III.1).

Les proportions des différents éléments sont obtenues en associant les proportions de carbone aux proportions des autres éléments mesurées par fluorescence X.



Fig.III.1. Pastille d'analyse chimique et son support.

Tab.III.22: Analyse chimique de la vase brute:

Code	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	perte au feu
Vase brute	41.05	8.64	3.73	20.71	1.93	0.20	1.08	0.52	0.021	21.80

La vase est composée d'élément majeur tel que la silice à hauteur de 41% et d'oxyde de calcium avec 20% et d'éléments mineurs comme MgO et SO₃, les chlorures sont à teneur de 0.021 et une perte au feu de 21,80 indiquant la présence d'humidité.

III-2-1-2-Analyse Chimique de la vase calcinée

Après une activation thermique d'une durée de 5heures à une température de 600°C en à refait un test chique de la vase dite "calcinée" (Tab.III.23)

Tab.23. Analyse chimique de la vase calcinée :

Code	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻	perte au feu
Vase calcinée	42.56	8.88	3.94	23.56	1.89	0.19	1.14	0.38	0.022	17.50

La principale constatation est la diminution de la perte au feu qui passe de 21% pour la vase brute à 17% pour la vase calcinée, ceci est dû au traitement thermique appliquée qui est de l'ordre de 600°C, ce qui entraîne une émissions des H₂O (adsorbée et liée chimiquement ; car rappelons le que l'essai de la perte au feu est mené à 1000°C) ainsi qu'un changement de couleur, comme le montre la (fig.III.2), qui peut être attribuée au changement dans la structure ferrique.



La vase brute

La vase calcinée

Fig.III.2. le changement de couleur de la vase

III-2-1-Analyse chimique des ciments modifiées (5-10-20)% :

Dans le cas de notre étude on a choisi différents pourcentages d'introduction de la vase calcinée en substitution du ciment CEMI, a savoir 5%, 10% et 20%, comme le montre le tableau III.24.

Tab.III.24: Les différents ciments modifiés de l'étude :

Vase calciné	CEM
0%	100%
5%	95%
10%	90%
20%	80%

III-2-2-Analyse chimique des ciments modifiés

Comme n'importe quel ciment, les ciments de notre étude doivent satisfaire aux exigences chimiques décrites dans la norme NF EN 197-1.

Tab.III.25 : Les analyses chimiques des mélanges pour ciments modifiées (5-10-20)% :

Code	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CL	PaF	Finesse [cm ² /g]
CM5%	22.91	4,19	5.08	61.15	1.63	2.08	0.49	0	0.018	2.20	3625
CM10%	24.01	4.46	5.03	58.93	1.65	1.95	0.53	0	0.019	3.05	3803

CM20%	22.91	4.19	5.08	58.12	1.63	1.92	0.49	0	0.022	4.36	4194
-------	-------	------	------	-------	------	------	------	---	-------	------	------

On remarque d'après le (tab.III.25), que le taux de silice et l'alumine augmente ainsi que la perte au feu. Le taux de CaO et l'oxyde ferrique diminue en fonction de l'augmentation du taux de vase calcinée. La finesse des différents ciments augmente en fonction de l'augmentation du taux de l'ajout, car rappelons-le que la finesse de la vase calcinée est de l'ordre de $7000 \text{ cm}^2/\text{g}$.

III-3-Confection des bétons étudiés:

Dans ce qui suit, les vases calcinées seront substituées au ciment CEMI dans la confection des bétons, en gardant le même rapport E/C, afin d'étudier le seul effet de la vase calcinée.

III-3-1-Formulation du béton:

Pour l'étude expérimentale de la formulation du béton, on a utilisé la méthode de DREUX-GORISSE.

*Détermination de la résistance moyenne à viser :

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

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

*Détermination du dosage en ciment :

On évalue d'abord le rapport E/ C en fonction de la résistance désirée sur la base de la formule :

$$R_b = G.R_c (C/E-05)$$

Où :

R_b : Résistance à la compression du béton prévue à 28 jours, en bars

G : Coefficient granulaire donné par le(Tab.III.27), en fonction de la qualité et de la dimension maximale (D_{\max}) du gravier

R_c : Classe vraie du ciment à 28 jours, en bars

Connaissant le rapport E la fluidité désirée, qui est une donnée du problème, on peut déterminer le dosage en ciment.

Tab.III.2 7: Valeurs de G coefficient granulaire :

valeurs de G coefficient granulaire			
Qualité des granulats	dimension des granulats D (mm)		
	Fins D 16 mm	Moyen 25 D 40	Gros D 63
Excellente	0.55	0.6	0.65
Bonne, courante	0.45	0.5	0.55
Passable	0.35	0.4	0.45

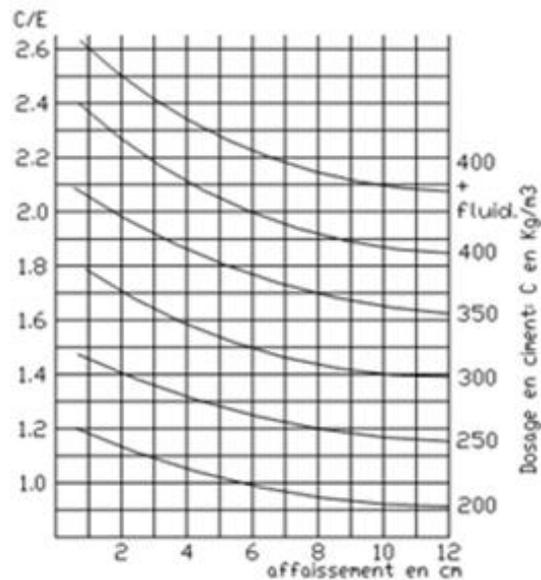


Fig.III.3: Dosage en ciment.

*Détermination du dosage en eau :

Connaissant E et le dosage en ciment (C) on déduit le dosage en eau total à prévoir par la formule : $E = \frac{C}{C/E}$

*Détermination du dosage en Détermination granulats :

C'est le pourcentage de sable et de gravier exprimé à partir de la courbe granulair de référence construite par l'une des méthodes de composition de béton, La courbe OAB, où B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulats et le point de brisure A à des coordonnées ainsi définies comme suit :

• En abscisse :

Si $D \leq 20$ mm l'abscisse est $D/2$,

Si $D > 20$ mm l'abscisse est située au milieu du segment, gravier limité par le module 38(5mm) et le module correspond à (D_{max})

• En ordonnée : Y donnée par la formule suivante :

$$Y = 50 - D + K + K_s + K_p$$

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

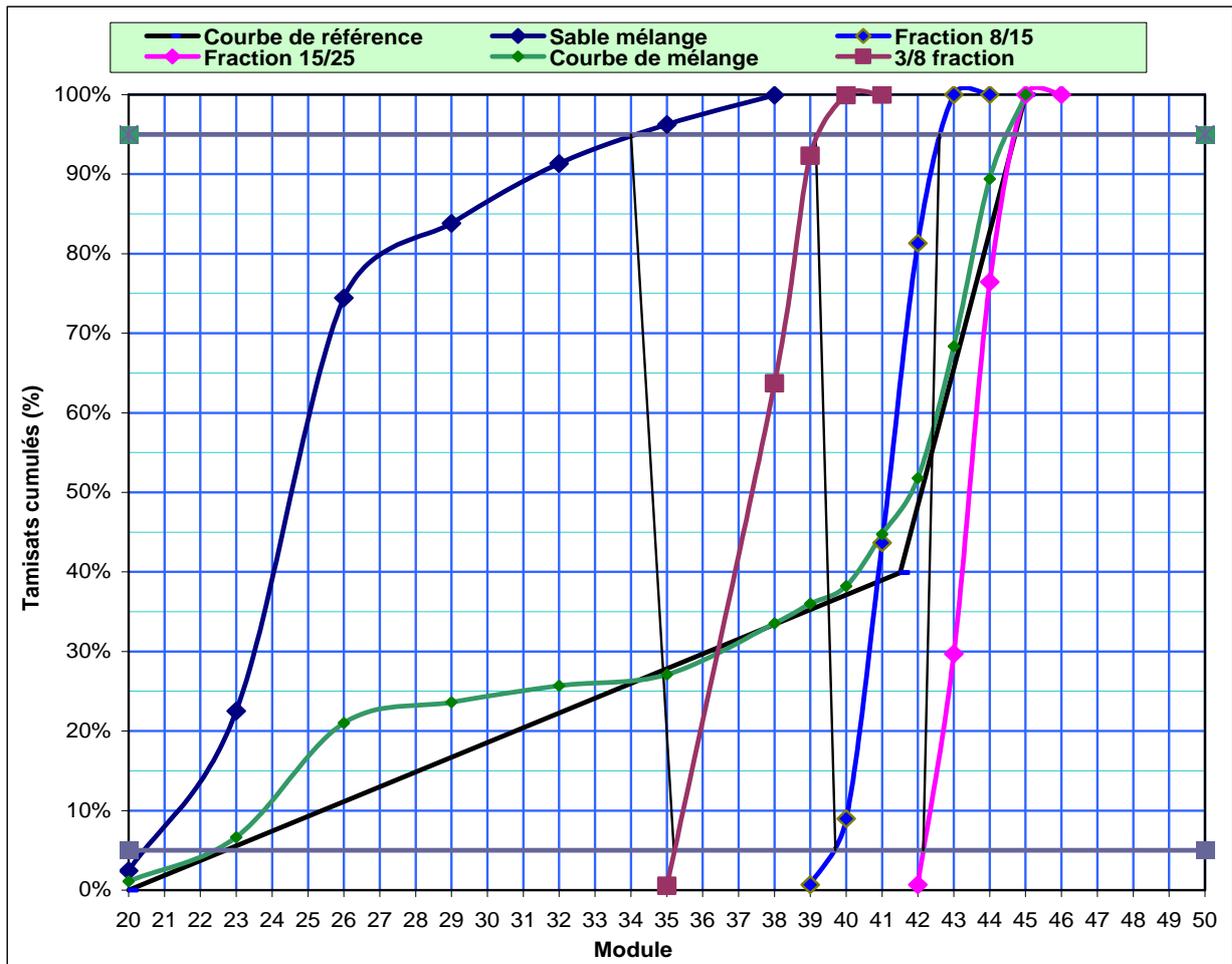


Fig.III.4: La courbe granulair de différentes fractions.

***Volume des mélanges des essais**

Tab.28. Volume des mélanges des essais :

Composition volumétrique et pondérale des constituants / m ³	
Sable	510 [Kg]
gravier 3/8	161 [Kg]
gravier 8/15	351 [Kg]
Gravier 15/25	832 [Kg]
Ciment	370 [Kg]
Eau	175 [Kg]

III-4-Essai sur béton frais

Dans tous ce qui va suivre, on a utilisé les désignations suivantes (Tab.III.29)

Tab.III-29. Abréviation des bétons utilisés :

Codes	Vase calcinée	CEM
Béton témoin (Bt0)	0%	100%
Bt5	5%	95%
Bt10	10%	90%
Bt20	20%	80%

III-4-1-Affaissement au cône d'Abrams : NF P18-451

Pour cet essai (Fig.III.5), on a utilisés un moule tronconique en tôle, utilisé pour mesurer l'affaissement du béton frais. L'essai au cône d'Abrams (effectué conformément aux prescriptions de la norme NF P 18-451, appelé aussi « Slump test » est incontestablement un des plus simple et des plus fréquemment utilisés pour déterminer la consistance du béton. Le remplissage du moule s'exécute en trois touches tassées avec une tige d'acier pointue à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement.



Fig.III.5: Essai du cône d'Abrams.

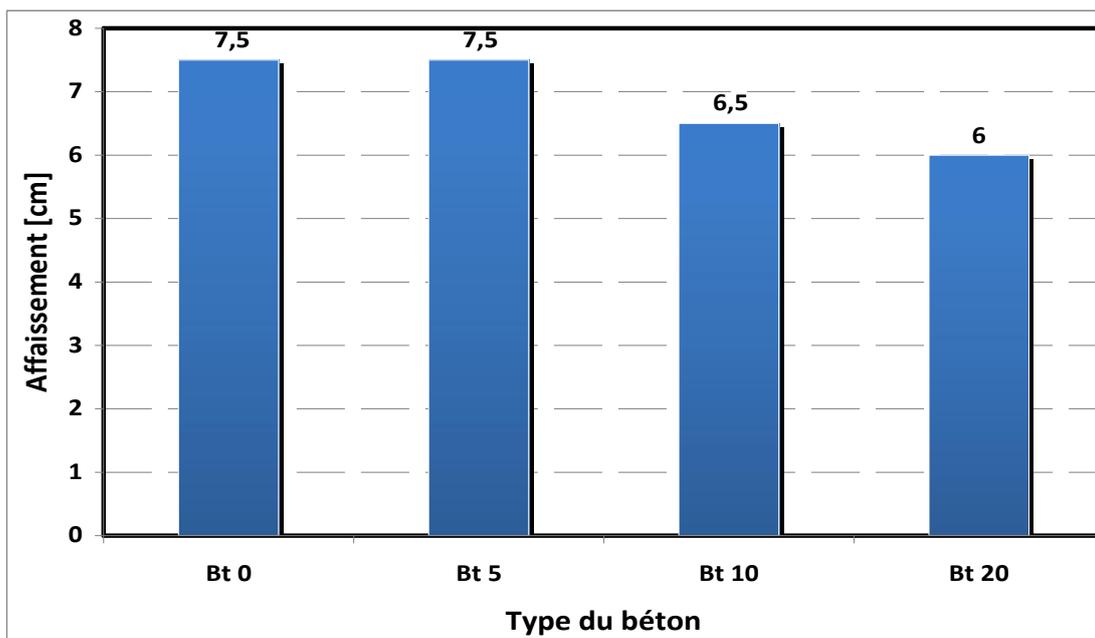


Fig.III.6: Affaissement des différents bétons.

La (fig.III.6.) illustre l’affaissement du différent béton au ciment modifie. Le béton témoin ainsi que le béton à 5% de vase calcinée enregistrent le même affaissement avec 7,5 [cm], cette mesure décroît avec l’accroissement du pourcentage de la vase calcinée pour atteindre 6[cm] pour le béton Bt20.

Ce décroissement est dû d’une part à la diminution du taux de ciment substitué dans les mélanges, mais aussi également à l’augmentation du pourcentage de la vase calcinée dans les bétons et son pouvoir a absorbée l’eau destinée à l’hydratation du ciment, d’où la diminution de l’affaissement

III-5- Essai sur béton durci:

III-5-1- La masse volumique :

La masse volumique d’un corps, est la masse de l’unité sur le volume de ce corps, effectué sur des éprouvettes de forme cubiques de dimensions (10×10×10) cm³, la masse volumique est donnée par la formule suivante :

$$= (M_h - M_s) / M_h$$

M_s: poids sec du matériau kg ;

M_h: poids humide du matériau kg.

La figure III.7, donne les valeurs de la masse volumique des différents types de béton. On constate que cette caractéristique diminue avec le temps (1,7, 14, 28 jours) mais elle reste dans l’intervalle de [2,4 -2,5Kg/m³] témoignage d’un béton moyen. Le béton témoin (Bt0), donne une valeur maximale de masse volumique égale à 2,48 Kg/m³ à 28 jours, la plus faible valeur enregistrée dans les bétons à ciment modifiée est attribuée au béton Bt20 avec une masse volumique de l’ordre de 2,41Kg/m³.

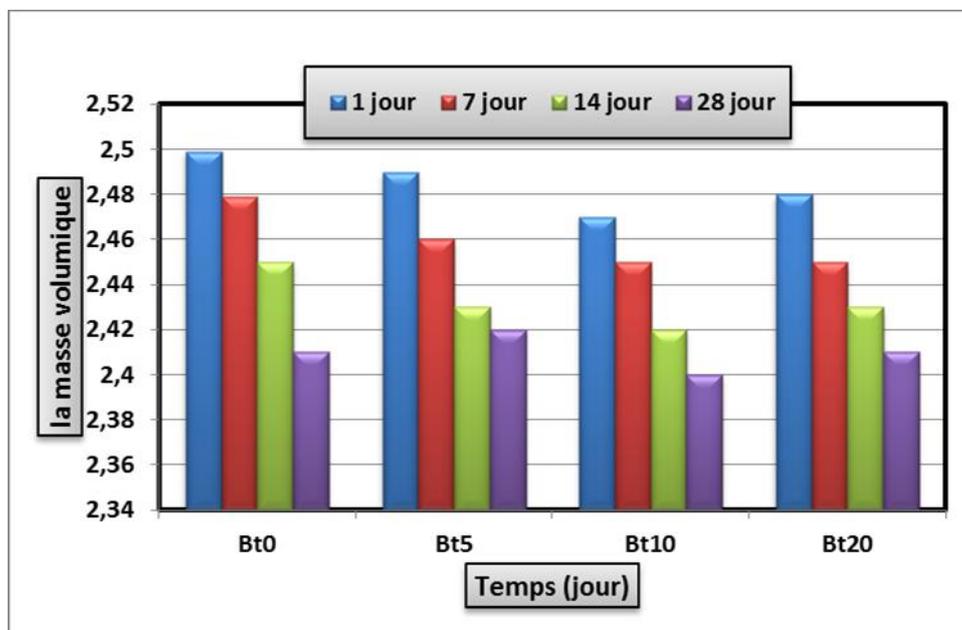


Fig.III.7: La densité [Kg/m³] pour les différents types des bétons étudiés.

Cette différence de densité est dû à la contraction de Le Chatelier, car si en prend comme exemple la réaction d’hydratation :



580,66 [g/mol]

564,64 [g/mol]

253 [ml]

222,6 [ml]

Avec un déficit en masse de 3% et un déficit volumétrique de 12%.

III-5-2-Résistance à la compression : NF P 18- 406

Cet essai a été effectué avec une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et ceci conformément à la norme décrite ci-dessus.

Pour les différents mélanges de béton, trois cubes de $(15 \times 15 \times 15) \text{ cm}^3$ par échéance ont été utilisés pour effectuer l'essai, soit après 7, 14, 28 jours.

La relation suivante permet de calculer la résistance : $R = F/S$

Où :

F : est la charge maximale(en N).

R : est la résistance à la compression exprimée en MPa.

S : est la surface de compression de l'éprouvette exprimée en millimètre carré.



Fig.III.8: La machine de compression.

La figure III.9, illustre la résistance de différentes éprouvettes de béton. Les résistances à 7 jours sont par ordre : Bt5=38,31, Bt10=33,68, Bt20=33,73 Bt0=32,68Mpa, à 28 jours les résistances sont par ordre Bt0=52,1, Bt5=50,75, Bt10=45,62, Bt20=43,57Mpa.

A 7 jours d'hydratation, les résistances des éprouvettes de béton à ciments modifiés sont plus conséquentes que le béton (Bt0) à cause de l'effet filler de l'ajout, car rappelons-le que les finesses des ciments s'accroît de 3600 pour CM5; 3800 CM10;4100 [cm²/g] pour CM20. Ces filler tentent de rendre la structure du béton plus compacte à jeune âge.

A 28 jours, les résistances des bétons à ciment modifié sont plus faibles par rapport au béton témoin Bt0 à cause d'un manque de silice et d'alumine réactive dans les ciments modifiés [CHI 16]. Mais ça n'empêche pas les résistances dépasse est de loin la résistance souhaiter par la méthode de DREUX- GORISSE qui est de l'ordre de 25 Mpa.

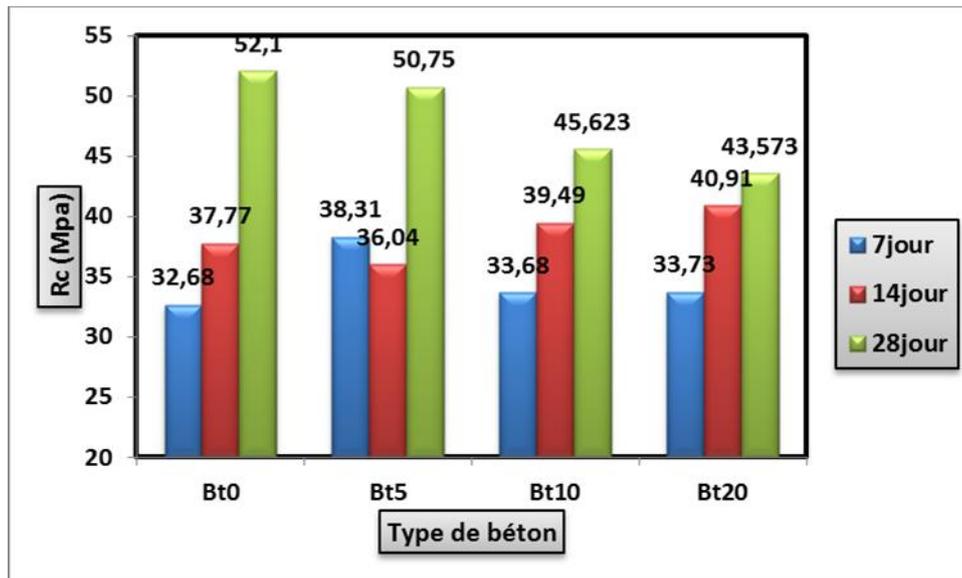


Fig.III.9:Résistance à la compression des différents bétons [Mpa]

III-5-3-Essai à ultrason: Norme NF P 18-418

Cet essai consiste à mesurer la vitesse longitudinale du son dans le béton à l'aide d'un appareil comportant une boîte de mesure, et deux têtes (une émettrice et l'autre réceptrice).

Les essais ultrasoniques ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques (10x10x40cm). Une fois l'appareil mis en marche, on peut lire le temps de propagation en micro-seconde. La vitesse de propagation est donnée par l'équation suivante : $V = D / t$

- V : vitesse de propagation en m/sec ;

- D : distance entre les têtes en (mètre) mesurée avec une précision de 1 % ; - t : temps en microseconde.



Fig. .10:Appareil ultrason.

Le tableau III.30 (Les résultats sont la moyenne de 3 essais), relate les valeurs de la vitesse ultrasonique des différents type de béton . On remarque que la vitesse de propagation du son est au-delà de 4Km/sec, ce qui nous affirment la bonne qualité de nos bétons.

Tab. .30: Evaluation de vitesse de propagation des ondes :

	Bt0	Bt5	Bt10	Bt20
A 7 jours	4113	4118	4071,67	4224,67
A 14 jours	4538,16	4252,5	4443,16	4336
A 28 jours	4507,833	4033,167	4558,167	4660

III-5-4-Le retrait :

L'essai de retrait consiste à mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur d'éprouvette prismatique (fig.III.11).



Fig.III.11:Appareil de retrait.

Cette variation relative de longueur est calculée par différence entre mesure initiale au démoulage et la mesure finale aux échéances spécifiées de trois éprouvettes. Cette variation est exprimée par micromètre par mètre, est définie par la formule suivant:

$$\frac{dL}{L}1000$$

dL: est la variation de longueur exprimée en micromètres ;

L: est la longueur de base prise égale à 160mm.

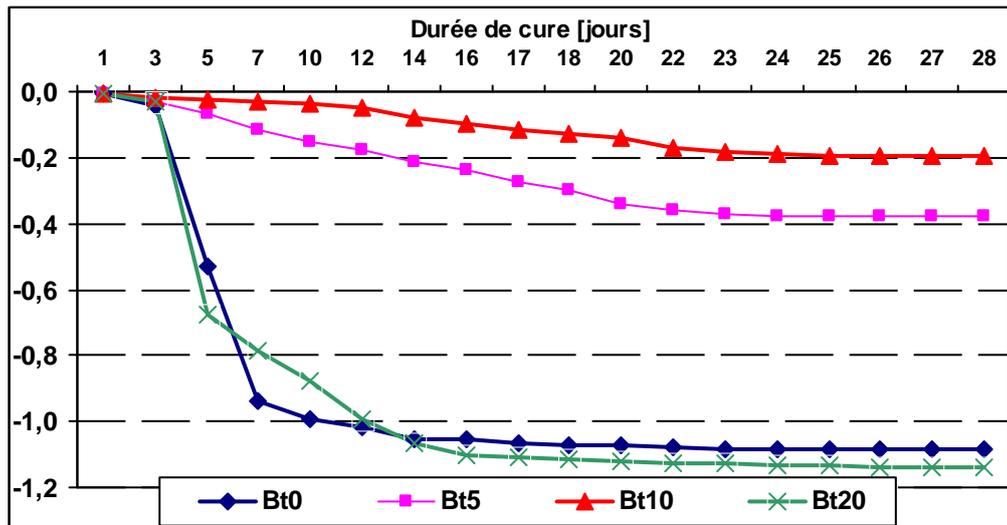


Fig.III.12: Essai de retrait [µm/mm] .

La figure III.12, montre la progression du retrait de différentes éprouvettes de bétons. On remarque que les retraits des bétons Bt5 et Bt10 sont meilleurs que les retraits des bétons Bt0 et Bt20. On constate aussi une diminution aiguë les premiers jours (7 jours) et une stabilisation après 14 jours dans presque toutes les éprouvettes.

Sous l'effet de la gravité, les particules solides s'installent au fond du moule et l'eau appelée eau de ressuage s'accumule sur la surface. Cette eau s'évapore rapidement formant un réseau de ménisque entre les grains. Au fur et à mesure de la perte d'eau, les ménisques provoquent une pression négative sur l'eau capillaire avec une contraction de la matière. Suite à ce phénomène, les pores deviennent de plus en plus petites et la concavité (ou le rayon) des ménisques est plus distincte, ce phénomène s'appelle « suction » [ARA 13] La pression capillaire a tendance à augmenter jusqu'à un seuil critique, lorsque ce dernier est dépassé les ménisques sont trop petits pour couvrir toute la surface. A cet instant, l'air pénètre à l'intérieur, en commençant par les plus grands pores.

III-5-5-L'absorption :

III-5-5-1-L'absorption totale :

L'essai d'absorption d'eau par immersion de béton est effectué à l'âge de 28 jours sur des éprouvettes de forme cubiques de dimensions $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$, qui ont été conservées à l'eau ($T = 20^\circ\text{C}$).

Le coefficient d'absorption (A) est donné par l'équation :

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_2} \times 100$$

Avec:

- A : coefficient d'absorption ;
- M_1 : poids sec du matériau ;
- M_2 : poids humide du matériau

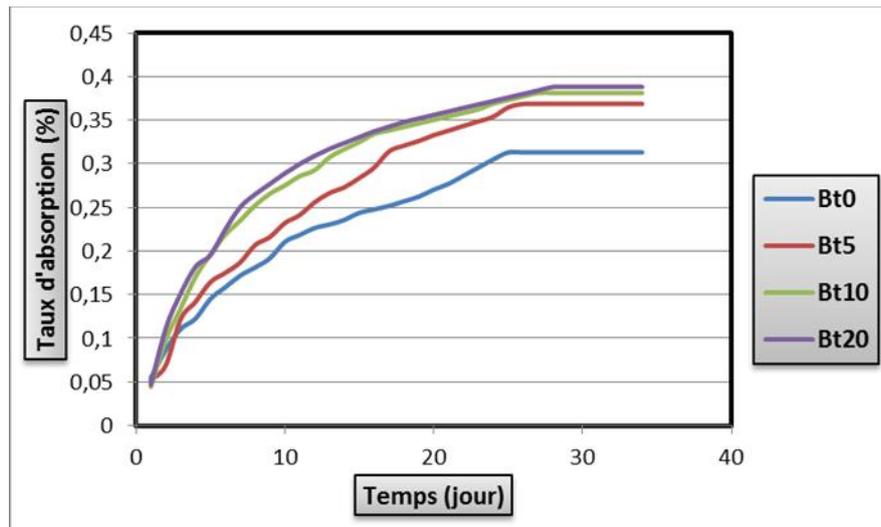


Fig.III.13: Evaluation de taux d'absorption totale.

L'analyse des résultats d'essais d'absorption pour différents types des bétons étudiés (Fig. III. 13) montrent que le béton à base de ciment sans vase calciné Bt0 présente un coefficient d'absorption, plus faible que celle des bétons à base des ciments modifiés, mais l'intervalle est très serré [0,3-0,4%].

Une quantité d'eau pouvant être liée chimiquement par le ciment Portland et une autre est liée physiquement. Cette eau est adsorbée à la surface des produits d'hydratation et s'évapore complètement dans une étuve à 105 °C. Au fur et à mesure de l'avancement de l'hydratation, de l'espace est donc libéré: ce sont les pores, ils sont vides ou remplis d'eau. Une partie de l'eau n'est donc pas liée chimiquement ni physiquement et s'installe dans ces pores d'où elle peut éventuellement s'évaporer ultérieurement. Cette formation de pores capillaires signifie un affaiblissement mécanique du béton. Suite à la diminution du ciment et le remplacement par la vase calcinée un réseau de pores c'est créé dans les bétons d'où l'augmentation de la porosité

III-5-5-2-1'absorption capillaire :

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succions capillaire des éprouvettes de béton non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

Le coefficient d'absorption capillaire AC est donné par la relation suivante :

$$AC = \frac{P}{S}$$

S: surface sciée de l'éprouvette (cm²) ;

P: le poids de l'éprouvette (g).

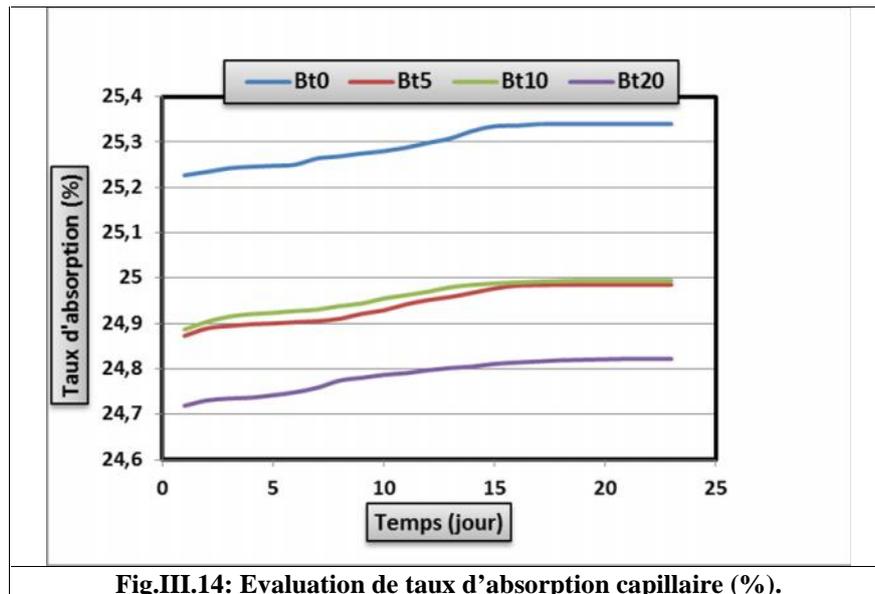


Fig.III.14: Evaluation de taux d'absorption capillaire (%).

D'après les résultats obtenus dans la figure.III.14, on remarque que l'effet de l'introduction de la vase réduit légèrement le taux d'absorption par rapport Bt0. C'est-à-dire lorsqu'on augmente le dosage de la vase calciné dans la formulation de béton jusqu'à 20% l'absorption capillaire diminue, ce que traduit par l'effet filler de la vase qui remplit les vides au niveau de la matrice cimentaire.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les objectifs fixés par l'état algérien dans le domaine du bâtiment et travaux publics, notamment dans les dernières années, demande dans les brefs délais des investissements considérables. Les usines de ciments (étatique ou privé), tournent en plein régime pour rendre ce matériau abordable. La confection du béton demande une quantité énorme de ciment de toutes sortes, ce qui conduit à une prospection farouche de matières premières comme l'argile et le calcaire, qui sont certes présente dans la nature mais, ils sont non-renouvelables à petit ou moyen terme, ce qui impose une stratégie raisonnable pour diminuer au maximum l'atteinte à l'écosystème.

En parallèle, les barrages s'ensavent considérablement en Algérie suite à la nature des roches tendres (argiles, schistes, ...) constituant la majorité des reliefs et la prédominance de fortes pentes (31% du territoire du Nord de l'Algérie a une pente de plus de 12,5%), ce qui augmente la vitesse de ruissellement.

Le barrage K'sob situé à M'sila, selon la dernière étude est ensavé de 60% ce qui réduit énormément sa capacité de stockage. Selon des études récentes, cette vase est riche en minéraux argileux comme la kaolinite et l'illite ainsi que du quartz et l'alumine, ce qui nous a incités à l'incorporer dans le béton après un traitement thermique adéquat pour éveiller le caractère pouzzolanique des argiles.

Dans ce travail, nous avons travaillé sur des mélanges de ciment (CEMI, pour écarter toute interaction avec un autre ajout) et de la vase calcinée (récupérer du barrage K'sob, séchée, broyée, tamisée et traitée thermiquement). Ces deux ingrédients sont mélangés à différents pourcentage de substitution du ciment par de la vase calcinée à hauteur de 5-10 et 20%, pour confectionner un béton ordinaire.

Après une identification expérimentale des différents bétons, on déduit quelques observations:

*Un changement de couleur de la vase calciné (du vert vers un rouge brique) suite au traitement thermique imposé, grâce au changement structurel chimique du matériau.

*l'analyse chimique des différents ciments modifiés répondent aux normes exigées.

*L'affaissement des différents bétons aux ciments modifiés, déduit par l'essai au cône d'Abrams diminue avec chaque augmentation de la substitution, car d'une part un pourcentage de ciment est réduit, d'une autre part, une partie de l'eau de gâchage est détournée par la vase calcinée.

* Une diminution de la masse volumique des différents bétons testés à différents âges 7, 14 et 28 jours suite aux réactions d'hydratations, car les composants chimiques avant et après hydratation ont des masses différentes, d'où un déficit massique et volumétrique enregistré, mais nos bétons reste dans le domaine des bétons à densité moyenne.

*A 7 jours de cure, les résistances des éprouvettes de béton à ciments modifiés, sont plus conséquentes que le béton témoin confectionné avec un CEMI, suite à l'effet filler de la vase calcinée.

*Les résistances à la compression des différents bétons à 28 jours sont acceptables et dépassent la résistance souhaiter par la méthode de DREUX- GORISSE qui était de l'ordre de 25 Mpa.

*Ces résistances à la compression des bétons à ciment modifié n'atteint pas la résistance du béton témoin Bt0, à cause d'un manque de silice réactive, ainsi l'amélioration des résistances.

*Le retrait dans le cas des bétons Bt5 et Bt10 est plus faible que les autres bétons à cause d'une structure plus dense et la formation de ménisque moins intense.

*Le taux d'absorption d'eau augmente avec l'augmentation de pourcentage de la vase calcinée mais, reste dans un intervalle serré [0,3-0,4%], suite aux vides et pores capillaires formés au sein des bétons aux ciments modifiés, ce qui a engendré la diminution des résistances mécaniques.

D'après notre modeste travail, on a constatés un réel intérêt à l'utilisation des vases dans les matériaux cimentaires notamment une résistance à la compression très satisfaisante.

Espérant que ce travail ouvre la porte à une réduction et pourquoi pas l'élimination des vases dans les barrages afin de leur redonner une seconde vie, à travers l'utilisation de ces mélanges dans la fabrication des blocs en parpaing comme perspective, ou les seconds œuvres dans la construction des bâtiments.

Bibliographie



Bibliographie

- [ABD 08]- ABDO J., « Ciments », C920, Edition Techniques de l'ingénieur, première Edition, 2008, P 4.
- [ABD 15]- SEMCHA Abd., « Valorisation De La Vase De Barrage Dans La Production D'une Brique », SÉMINAIRE, université d'Adrar, 2015.
- [AOU 12]-AOUAD G., Laboudigue A., Gineys N., Abriak N.E., « Dredged sediments used as novel supply of raw material to produce Portland cement clinker », *Cement & Concrete Composites* 34 (2012) 788-793.
- [ARA 13]-ARAIRO W. « Influence des cycles hydriques de la dessiccation et de l'humidification sur le comportement hydromécanique des géomatériaux non saturés », Thèse pour l'obtention de grade de docteur, INSA de Lyon, 2013
- [BAR 11]-BARKAT Mohamed, « Effets Des Additions Minérales Et Adjuvants Fluidifiants Sur Le Comportement Rhéologique Des Mortiers Et Bétons Frais Et Durcis À Base De Sables Des Carrières », Mémoire de Magister, Université Mohamed Kheider – Biskra, 2011/2012, P 16-17.
- [BEN 06]- BENOSMAN A. S., « Comportement mécanique et durabilité des matériaux Composites Mortier-Polymère (PET) », Mémoire de Magister, UNIVERSITE D'ORAN ES-SENIA, 2006, P 10.
- [BEN 14]- BENREDOUANE A. D. et les autres, « Elaboration d'une Pouzzolane Artificielle à Base de la Zéolithe X Synthétisée à partir de Kaolin Naturel », Laboratoire des Eco-Matériaux Fonctionnels et Nanostructurés, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2014, P 1.
- [BEN 14]-BENASLA Mohammed, « Caractérisation de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda et valorisation en tant que matériau de construction », Thèse de doctora, univarsité de oran, 2014/2015, P 48.
- [BEN A.] - Ben Allal L., Ammari M., Frar I., Azmani A., Belmokhtar N. E., « Caractérisation et valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc) *Revue Paralia*, Vol. 4, pp 5.1– 5.13.
- [BIC 05]-BICH Ch., « Contribution À L'étude De L'activation Thermique Du Kaolin : Évolution De La Structure Cristallographique Et Activité Pouzzolanique », Thèse de doctora, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005, P 41-51.
- [BOU 10]-BOUHMID Mama, « Elaboration D'Un Eco-Ciment Pouzzolanique A Base De Vase De Barrage Hydraulique Traitee Et Dechet De Brique De Construction », Mémoire Magister, univarsité de Oran, 2010/2011, P 41.
- [BOU 12]- BOUNA Lahcen, « Fonctionnalisation Des Minéraux Argileux D'origine Marocaine Par Tio2 En Vue De L'elimination Par Photocatalyse De Micropolluants Organiques Des Milieux Aqueux », thèse de doctora, université de Toulouse, 2012, P 32.
- [BUR 12]- BUR Nicolas, « Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable », THÈSE Doctorat, Université de Strasbourg, 2012, P 25.
- [CHA 10]- CHAID R., JAUBERTHIE R. et BOUKHALED A., « Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons ». *Lebanese Science Journal*, Vol. 11, No. 1, 2010.

Bibliographie

- [CHI 16]-CHIKOUCHE M.A., Ghorbel E., Bibi M. « The possibility of using dredging sludge in manufacturing cements: Optimization of heat treatment cycle and ratio replacement », *Construction and Building Materials* 106 (2016) 330–341.
- [CHO 13]-CHOUFA Nassima, « Epuration des eaux usées: l'élimination des micropolluants dans les eaux usées par un matériau argileux », *MEMOIRE DE MAGISTER*, Université Mohammed Chérif Messaadia Souk Ahras, 2013, P 03.
- [CIM 05]-COLLECTION cim béton, « Les constituants des bétons et des mortiers », Tome I, 2005.
- [DAV 11]- Davidovitch J. S., *Geopolymer Chemistry and Applications*, third ed., Institute of Geopolymer, France, 2011. p. 10.
- [DEL 08]- DELAIR Stéphanie, « Etude l'atténuation des efflorescences sur les matériaux cimentaires au moyen de produits pouzzolaniques », thèse de doctorat, l'école nationale supérieure des mines de saint-étienne, 2008, P 32.
- [DUX 07]- DUXSON P., Fernandez Jiménez A., J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, J.S.J. Van Deventer, *Geopolymer technology: the current state of the art*, *J. Mater. Sci.* 42 (2007)2933-2917.
- [FES 98]- FESTA Jean, Georges Dreux, *Nouveau Guide du Béton et de ses Constituants*, Huitième édition, Troisième tirage, Edition Eyrolles, 1998, P 25.
- [GAG 96]- GAGNON J.P., « Influence d'un superplastifiant sur l'énergie d'activation lors de l'hydratation d'un coulis de ciment », Département de chimie, mémoire de maîtrise en sciences appliquées, université de Sherbrooke, mai 1996, P 9-12.
- [GIC 18]- <https://www.gica.dz/historique/> consulter le: 05/05/2018.
- [GRI]- GRIM E. R. *Clay mineralogy*. USA ; McGraw Hill Book Company 195. p 200-202.
- [HER 16]-HERNOT François, « L'ARGILE, SON UTILISATION A L'OFFICINE », thèse de doctorat, université Angers, 2016, P41-44.
- [KER 09]- KERBOUCHE A, Mouli M., Laoufi L., Senhadji Y., Benosmane S. « Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers », Faculté des sciences, Laboratoire de Chimie des Polymères, Université d'Oran, Es-sénia, Oran, 2009.
- [MOM 14]- MOMEN mohsen, anwar youssef al-farayh, « cement manufacturing relationship between mining and cement », Al-Hussein Bin Talal University a, 2014/2015, P07.
- [NEV 00]- NEVILLE A M. « propriétés des bétons », édition Eyrolles, 2000, P 82.
- [SAL 07]-SALHI KAMEL, « Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton », Mémoire de magister, UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER BISKRA, 2007, P 5.
- [REM 03]-REMINI W., Remini B., « La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du Nord », *Courrier du savoir*, N° 04, Juin 2003, pp 65-69.
- [ZOU 11]-ZOUAI Khadidja, « Etude du mode de fabrication du ciment et effet des matières premières- Impact de l'utilisation du ciment sur l'environnement », Mémoire de Magister , Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2011, P 42.

NORME

NF P18-555 « Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables », 1990.

NF P18-598 « Granulats - Équivalent de sable »1991.

NF P 18-560 « Granulats - Équivalent de sable »1990.

NF P 18-451 « Bétons - Essai d'affaissement »1981.

NF P 18-406 « Bétons - Essai de compression »1981.

NF EN 197-1 » Ciment: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ». Part 1; 2012.

NF P18-598 « Granulats - Équivalent de sable »1991.