

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 : ZOUBIRI Walid

BETTICHE Yamina

Intitulé

*L'introduction de la boue de dragage dans
la matrice cimentaire d'un béton ordinaire*

Soutenu devant le jury composé de :

BEDDAR Miloud

Université de M'sila

Président

CHIKOUCHE Mohamad Aziz

Université de M'sila

Rapporteur

ZITOUNI Salim

Université de M'sila

Examineur

Année Universitaire : 2016/2017

Remerciement

Je ne remercie jamais assez ALLAH le tout puissante de m'avoir permis de mener a bien ce modeste travail.

Je remercie mes encadreur CHIKOUHE.M.A et BAALI.L docteurs de l'université de M'SILA qui m'ont proposé sujet de master, pour leur aide précieuse et leur disponibilité durant toute la durée de notre projet.

Je remercie également les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail.

A tous mes enseignants et à toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je dirai merci

Dedicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mon père et ma mère qui m'ont toujours soutenus durant toutes les périodes de ma vie, que dieu le tout puissante les protègent et gardent.

*Mes frères et Mes sœurs
Tous mes amis.*

*Touts les enseignants de faculté de technologie.
Toute la promotion 2017.
Tous ceux qui m'aiment et que j'aime.*

Sommaire

CHAPITRE I	3
I- INTRODUCTION :	3
I-1.LE CIMENT :	3
I-1-1. DEFINITION :	3
I-1-2.LES CONSTITUANTS DU CIMENT :	3
I-1-2-1.LE CLINKER :	3
I-1-2-2.LE GYPSE (CASO ₄) :	4
I-1-3.LES TYPES DE CIMENT :	5
I-1-3-1.LE CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL (CEM I).....	5
I-1-3-2.LE CIMENT PORTLAND COMPOSE (CEM II) :	5
I-1-3-3. CIMENT DE HAUT FOURNEAU (CEM III) :	5
I-1-3-4. CIMENT POUZZOLANIQUES (CEM IV) :	5
I-1-3-5 .CIMENT COMPOSE (CEM V) :	5
I-2.LES BETONS :	5
I-2-1.COMPOSITION DU BETON :	6
I-2-2.PROPRIETES DES BETONS:	6

I-2-3.DIFFERENTS TYPES DE BETONS :	8
I-2-3-1. BETON LEGER :	8
I-2-3-2. BETON LOURD :	9
I-2-3-3. BETON ORDINAIRE :	9
I-2-3-4.BETON AUTO PLAÇANT (BAP) :	9
I-2-3-5. BETON DE HAUTE PERFORMANCE (BHP) :	9
I-3.FORMULATION DU BETON :	9
I-4. CONCLUSION :	12
CHAPITRE II.....	13
II-1.DEFINITION :	13
II-2.CLASSIFICATION DES AJOUTS :	13
II-2-1.LES AJOUTS HYDRAULIQUES :	13
II-2-1-1.LAITIER GRANULE DE HAUT FOURNEAU :	13
II-2-1-2.CENDRES VOLANTES :	14
II-2-2.LES POUZZOLANES :	15
II-2-2-1. LA FUMEE DE SILICE :	16
II-2-3.PRINCIPAUX AJOUTS MINERAUX INERTE :	17
II-2-3-1.FILLERS CALCAIRES :	18
II-3. IMPORTANCE DES AJOUTS :	18
II-3-1. BENEFICES FONCTIONNELS :	18
II-3-2.BENEFICES ECONOMIQUES :	19

II-3-3.BENEFICES ECOLOGIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX :	19
II-4. LES ARGILES :	19
II-4-1. LES MINERAUX ARGILEUX :	19
II-4-1-1. LE KAOLIN :	19
II-4-1-2.LES ILLITES :	20
II-4-1-3. LES MONTMORILLONITES :	20
II-5. CALCINATION :	20
II-5-1.LA CALCINATION FLASH [29] :	21
II-5-2.LA CALCINATION LENTE :	21
II-6.MODES D'INCORPORATION DES ADDITIONS INTRODUITES DANS LES BETONS :	21
II-8. CONCLUSION :	22
CHAPITRE III.....	23
INTRODUCTION :	23
III-1-CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES	23
III-1-1-SABLE :	23
III-1-1-1-CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SABLE UTILISE :	23
III-1-2- GRAVIER :	29
III-1-2-1- CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES GRAVIERS UTILISES :	30
III-1-4- CARACTERISTIQUE DE LA VASE :	35
III-1-5-L'EAU DE GACHAGE :	36
III-2-ELABORATION DES BETONS ETUDIES :	36

III-2-1-ANALYSE CHIMIQUE DE LA VASE CALCINEE :	37
III-2-2-LES ANALYSE CHIMIQUE DES MELANGES POURCUMENTS MODIFIEES (5-10-20)% :	37
III-3-2-LES ESSAIS SUR LE BETON A L'ETAT FRAIS :	40
PLUS FAIBLE.	40
III-3-2-1-AFFAISSEMENT AU CONE D'ABRAMS	41
III-3-3-ESSAI SUR BETON DURCI.....	42
CONCLUSION GENERAL.....	49
REFERENCE.....	51

.

LISTE DE FIGURE

FIG . I- 1. MICROPHOTOGRAPHIE D'UN CLINKER.....	4
FIG .I-2.LES CONSTITUANTS DU CIMENT.....	5
FIG .I-3. ESSAI SUR BETON FRAIS	6
FIG. I-5. COMPARAISON DE LA DISTRIBUTION DE TAILLE DES PORES DES PATES A BASE DE CEM I ET CEM V	8
FIG.I-6. RESISTANCE A LA COMPRESSION DE QUELQUES BETON E/C=0,4	8
FIG.I-7. RESISTANCE EN COMPRESSION D'UN BAP PAR RAPPORT A D'AUTRES BETONS. ...	9
FIG. I-8 – DOSAGE EN CIMENT	11
FIG.II-1. VUE AU MICROSCOPE DU LAITIER.....	14
FIG.II-2. LA CENDRE VOLANTE	15
FIG.II-3. VUE AU MICROSCOPE D'UNE POUZZOLANE	16
FIG.II-4. RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BETONS CONSERVE DANS UNE SOLUTION DE 5% NA ₂ SO ₄	16
FIG.II-5. LA FUMEE DE SILICE.....	17
FIG. II-7. STRUCTURE DE LA KAOLINITE.....	20
Fig.II-6. La structure de l'illite.....	20
FIG. III-1. LES TAMIS D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE.....	28
FIG.III-2. PASTILLE D'ANALYSE CHIMIQUE ET SON SUPPORT.....	36
FIG.III-3. BOUE NATURELLE	37
FIG.III-4. BOUE TRAITEE.....	37
FIG.III-6. L'ESSAI AU CONE D'ABRAMS.....	41
FIG.III-7. AFFAISSEMENT DES DIFFERENTS BETONS.....	41
FIG.III-8.EPROUVETTE CUBIQUE	42
FIG.III-9.LA MACHINE DE COMPRESSION	42
FIG.III-10.RESISTANCE A LA COMPRESSION	42
FIG.III-11.EPROUVETTE CYLINDRIQUE	43
FIG.III-12.ECHELLE DE LECTURE	43
FIG.III-13.RESISTANCE A LA TRACTION.....	43
FIG.III-14.MACHINE D'ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION	44
FIG.III-15.RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION	44
FIGURE III-16.COURBE D'ANALYSE THERMIQUE DIFFERENTIELLE DES DIFFERENTS BETONS A 14 JOURS	45
FIGURE III-17.EAU NON-EVAPORABLE DES DIFFERENTS ECHANTILLONS	46
FIGURE III-18. La portlandite produite à différentes échéance	47

LISTE DES TABLEAUX

TAB. I-1. COMPARAISON DES RESISTANCES A LA COMPRESSION ENTRE UN BO ET UN BHP	9
TAB. I-2 VALEURS DE G COEFFICIENT GRANULAIRE	10
TAB. I-3. CORRECTION DU DOSAGE EN EAU SELON LE DIAMETRE, D DU MELANGE GRANULAIRE.....	11
TAB.II-1. CLASSIFICATION DES AJOUTS SELON LEUR REACTIVITE.[48].....	13
TAB.III-1. MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DU SABLE DE BOUSSAADA.....	24
TAB.III-2.MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DU SABLE DE BOUSSAADA.....	25
TABL.III-3.POROSITE, COMPACITE ET INDICE DES VIDES DU SABLE DE BOUSSAADA	25
TAB. III-4. EQUIVALENT DU SABLE DE BOUSSAADA.....	27
TAB. III-5.VALEURS PRECONISEES POUR L'EQUIVALENT DE SABLE PAR DREUX.....	27
TAB.III-6.TENEUR EN EAU DU SABLE DE BOUSSAADA	28
TAB. III-7. DEGRE D'ABSORPTION DU SABLE DE BOUSSAADA.....	28
TAB.III-8.ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SABLE.....	29
TAB.III-9. MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DU GRAVIER CONCASSE 3/8	30
TAB.III-10. MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DU GRAVIER CONCASSE 8/16	30
TAB.III-11. MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DU GRAVIER CONCASSE 16/25	30
TAB.III-12. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DU GRAVIER CONCASSE 3/8.....	31
TAB.III-13. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DU GRAVIER CONCASSE 8/16.....	31
TAB.III-14. MASSE TABLEAU III.11 MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DU GRAVIER CONCASSE16/25.....	31
TAB.III-15. POROSITE, COMPACITE ET INDICE DES VIDES DE GRAVIER CONCASSE 3/8.....	32
TAB.III-16. POROSITE, COMPACITE ET INDICE DES VIDES DE GRAVIER CONCASSE 8/16...	32
TAB.III-17. POROSITE, COMPACITE ET INDICE DES VIDES DE GRAVIER CONCASSE 16/25 .	32
TAB.III-18. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU GRAVIER 3/8 CONCASSEE	32
TAB. III-19. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU GRAVIER 8/16 CONCASSE.....	32
TAB. III-20. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU GRAVIER 16/25 CONCASSE.....	33
TAB.III-21. CARACTERISTIQUES DE CEM I(FICHE TECHNIQUE)	33
TAB.III-22.COMPOSITION CHIMIQUE DU CIMENT CEMI	34
TAB.III-23.COMPOSITION MINERALOGIQUE DU CIMENT CEMI.....	34
TAB.III-24. LES DIFFERENT INDICES CHIMIQUES	35
TAB.III-25. ANALYSE CHIMIQUE DE LA VASE BRUTE.....	36
TAB.III-26. CARACTERISTIQUE CHIMIQUE DE L'EAU.....	36
TAB.III-26.ANALYSE CHIMIQUE DE LA VASE CALCINEE	37
TAB.III-27. LES ANALYSES CHIMIQUE DES MELANGES POUR CIMENTS MODIFIEES (5-10-20)% :	37

ملخص

تلعب الخرسانة دورا هاما في متانة و سلامة بنية الهياكل وهذا منذ القدم، وأمام التطور الحاصل لحياة الإنسان أصبح البحث عن النوعية الجيدة للخرسانة من المتطلبات الهامة.

من أجل صنع الخرسانة يجب توفير الاسمنت بكميات كبيرة ، هذا ما يتولد عنه التنقيب بصفة معتبرة للكلس والصلصال التي تعتبر من الموارد الطبيعية غير المتجددة.

في هذا الصدد تلعب الإضافات الإسمنتية دور هاما في تقليص الكميات الكبيرة للاسمنت المستخدم في صنع الخرسانة ومنها على سبيل المثال : خبث الافران ، البوزلان... الخ

في المقابل السد الوحيد على مستوى ولاية المسيلة يعاني من ظاهرة التوحد بنسبة تقارب 60%. هذه الأحوال وحسب دراسات سابقة غنية بنسب متفاوتة من أنواع الصلصال كالكولين والإليت، مما أدى بنا إلى محاولة استعمالها في الخرسانة كإضافة بعدة نسب (5 - 10 - 20 %) بعد عملية حرق بدرجة حرارة 600°م لمعرفة تأثيرها على الخصائص المختلفة للخرسانة .

ما أجل الوصول إلى خاتمة البحث قسمنا الدراسة إلى ثلاث فصول بالإضافة إلى مقدمة عامة. الفصل الأول تطرقنا فيه إلى أنواع الاسمنت والخرسانة ، أما الفصل الثاني يتكلم على نوع الإضافات الموجودة والفصل الثالث عبارة عن حوصلة للتجارب المخبرية وتحليل النتائج

Résumé

Le béton joue un rôle important dans la ténacité et la sécurité des structures est ceci depuis des milliaires et avec le développement de la vie quotidienne de l'humanité la recherche de bon béton est toujours d'actualité.

Pour produire du béton en quantités énormes, du ciment doit être présent, ce qui demande de la prospection en grande échelle de calcaire et d'argile qui constituent des ressources naturelles non-renouvelable.

Dans ce contexte, les ajouts cimentaires jouent un rôle important dans la réduction des quantités des ciments, entrant dans la production du béton tels que le laitier ou les pouzzolanes. etc

En parallèle le seul barrage de la wilaya de M'sila est envasé à hauteur de 60%. Ces boues de dragage ou vase est selon des études antérieures sont riche en minéraux argileux comme le kaolin et l'illite, ce qui nous a incité à l'incorporer dans le béton à hauteur de (5-10-20%) après traitement thermique à 600°C pour apprécier son effet sur les caractéristiques du béton

Afin d'arriver à une conclusion nous avons divisé notre étude en trois chapitres plus une introduction générale. Le premier chapitre relate sur les différents ciments et bétons existants, le deuxième chapitre est consacré aux ajouts cimentaires et le troisième chapitre est une agglomération des différents essais effectués ainsi que l'analyse des résultats.

Abstract

Concrete plays an important role in the tenacity and safety of structures and this for thousands of years and with the development of the daily life of mankind the search for good concrete is still topical.

To produce concrete in enormous quantities of cement must be present, requiring large-scale prospecting of limestone and clay which constitute non-renewable natural resources.

In this context, cement additions play an important role in reducing the quantities of cements entering the production of concrete such as slag or pozzolana. etc.

In parallel, the only dam in the wilaya of M'sila is silted up to 60%. These dredging mud or sludge is according to previous studies are rich in clay minerals such as kaolin and illite, which prompted us to incorporate it in the concrete to the height of (5-10-20%) after heat treatment at 600 ° C to assess its effect on the characteristics of the concrete.

In order to arrive at a conclusion we divided our study into three chapters plus a general introduction. The first chapter describes the different cements and concretes, the second chapter is devoted to cementitious additions and the third chapter is an agglomeration of the various tests carried out as well as the analysis of the results.

Introduction générale

Introduction Général

Le montant d'investissement du présent quinquennat (2015-2019) s'élève à 262.5 milliards de dollars. Le gouvernement algérien prévoit un programme colossal afin de reconstruire le plus vite possible les infrastructures laissées à l'abandon pendant de longues années.

Le pays a dépensé des dizaines de milliards de dollars pour la réalisation de l'autoroute des Hauts-Plateaux de 1300 km et la réalisation de 10.000 km de nouvelles routes et 152 ouvrages d'art (ponts, tunnels, etc). La réalisation de 23 pénétrantes qui relieront les villes portuaires à l'autoroute Est-Ouest est aussi au programme. L'extension des aéroports et la rénovation de 36 aérodromes, ainsi que la réalisation de 2500 projets touristiques et pas moins de 1200 hôtels touristiques sont également sur la liste des priorités. La capitale se verra bientôt dotée d'un nouveau port nécessitant un investissement de 3 milliards de dollars. Sans oublier quelque 2.2 millions de logements qui sont en cours de réalisation. D'autres milliards sont dépensés dans des projets de tramway dans des wilayas diverses à côté de deux extensions pour le tramway d'Alger sans oublier la grande mosquée.

Les investissements en Algérie ou dans le monde, sont liés de près ou de loin à l'industrie cimentaire. L'utilisation de matériaux capables de lier 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 et plus tard ils ajoutaient à 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 connue un déclin général jusqu'au 18ème siècle lorsque John Smeaton mélange de la pouzzolane avec du calcaire calcinée contenant une forte proportion de matières argileuses, suivi du « ciment romain » développé par James Parker. En 1824 Joseph 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 Isaac Johnson chauffe un mélange d'argile et de craie jusqu'à clinkérisation.

La production totale mondiale de ciment en 1900 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 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. 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.

Objectif de l'étude :

Parmi les récents ajouts cimentaires on peut citer la boue de papeterie traitées 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

Introduction générale

K'sob est envaser à 60%. Après un traitement thermique à une température, 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 chapitre en plus d'une introduction et une conclusion.

*Le premier chapitre relate sur les différents types de cimentset les caractéristiques des bétons frais et durci

*Le deuxième chapitre récite les différents ajouts existant et leur utilisation dans les matériaux cimentaires.

*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 perspective

Chapitre I

I- Introduction :

Les matériaux cimentaires sont les matériaux les plus utilisés au monde. Ce sont essentiellement eux qui façonnent notre environnement. Voies de circulation, ouvrages d'art et d'assainissement, bâtiments de toute nature, édifices historiques, rien n'échappe à leur omniprésence.

Le ciment est un composant essentiel des matériaux cimentaires comme le béton. Il assure une fonction mécanique, car il lie le squelette granulaire, mais il est aussi en grande partie responsable de la tenue à long terme du matériau béton. La conception d'un béton est extrêmement liée à l'environnement dans lequel va être exposé durant sa durée de vie .[1]

I-1.Le ciment :

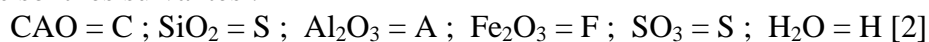
I-1-1. Définition :

Bien que déjà utilisé par les Romains, le béton a eu le développement qu'on lui connaît grâce à la découverte du ciment Portland au XIXe siècle. Celui-ci a été breveté par « Aspdin » sur la base des travaux de Louis Vicat sur les chaux hydrauliques.[2]

Le ciment est un liant hydraulique. C'est un matériau inorganique finement broyé, lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, il forme une pâte qui fait prise, durcit et conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment ordinaire anhydre est constitué de clinker Portland, de gypse et éventuellement d'additions telles que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, la fumée de silice, pouzzolanes naturelles..., etc.

Une notation cimentière a été établie pour simplifier l'écriture des phases solides. Les équivalences sont les suivantes :



I-1-2.Les constituants du ciment :

Le ciment résulte du broyage d'un certain nombre de constituants : Le clinker, le gypse et les ajouts :

I-1-2-1.Le clinker :

C'est un mélange fritté de calcaire et d'argile .Ce mélange après cuisson forme des grains dont les dimensions vont jusqu'à 40mm.

Le calcaire est composé principalement de CAO et CO₂. L'argile est constituée de diverses matières contenant surtout trois oxydes : SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃.

La matière première destinée à la production du clinker doit contenir 75 à 78% de CaCO₃ et de 22 à 25% de matière argileuse.

Les roches qui satisfont aux conditions indiquées ci dessus ne se rencontrent que très rarement. C'est ainsi que pour la production du ciment Portland sans ou avec ajout, il faut employer à coté des calcaires et des argiles, des additions que l'on appelle adjuvants, ils contiennent une grande quantité d'oxydes qui manque dans le mélange des matières premières. Parmi ces adjuvants, on peut citer le minerai de fer, argile alumineux, etc.

Les oxydes indiqués plus haut (CAO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃) ne se trouvent pas à l'état libre dans le clinker mais au cours de la cuisson du cru (calcaire + argile) quatre minéraux se forment (figure I-1) :

C ₃ S	(3CaO. SiO ₂)	Alite
C ₂ S	(2CaO. SiO ₂)	Belite
C ₃ A	(2CaO. Al ₂ O ₃)	Aluminate tricalcique
C ₄ AF.....	(4CaO. Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃)	Célite.

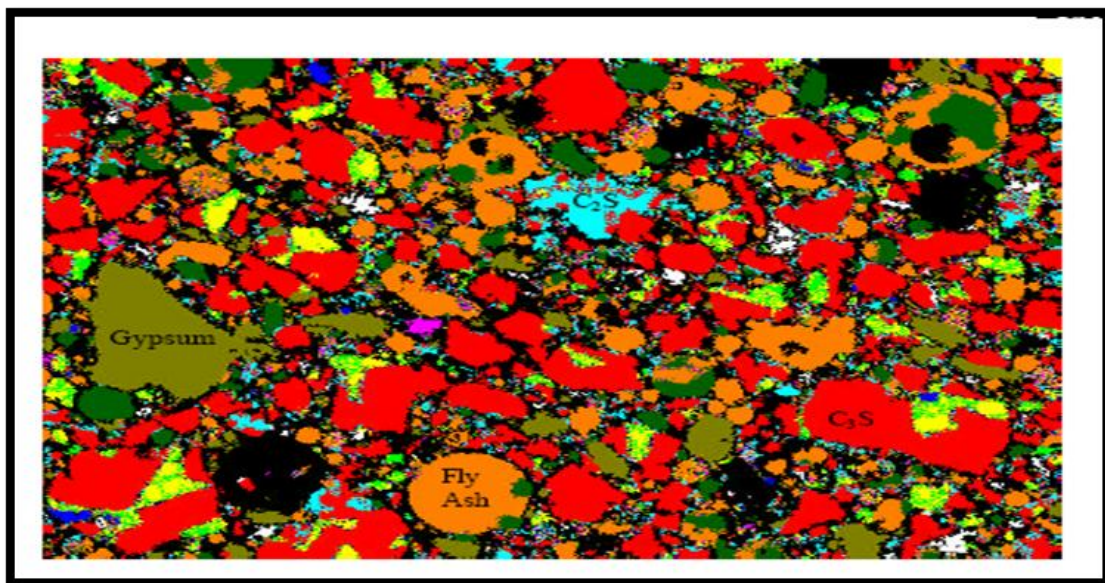
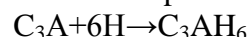


FIG . I- 1. MICROPHOTOGRAPHIE D'UN CLINKER.

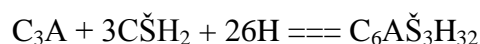
Noir = porosité; Rouge = C₃S; Bleu clair = C₂S; Vert = C₃A; Orange = C₄AF; Vert = sulfates de calcium; Jaune =K₂SO₄; Blanc = CAO.

I-1-2-2.Le gypse (CaSO₄) :

Le clinker « pur » très fin est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable. Ce fait est surtout dû à la célite (C₃A) qui s'hydrate rapidement tandis que ses hydrates deviennent rapidement compacts et se cristallisent.



Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydro aluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydro aluminate tricalcique et produit un sel insoluble l'hydrosulfoaluminate de calcium. La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en C₃A dans le liant. Lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydro aluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial.



I-1-3. Les types de ciment :

Différents types de ciment pourraient être obtenus en faisant varier les pourcentages d'ajouts (un chapitre est consacré à ce sujet). Ainsi en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciment avec des propriétés physico-mécaniques demandées ont vues le jour.

I-1-3-1. Le ciment portland artificiel (CEM I) :

C'est le produit résultant de la mouture du clinker, obtenu par la cuisson, dans des conditions de durée et de températures suffisantes, d'un mélange soigneusement homogénéisé et dosé, dont les principaux constituants sont : La silice, l'alumine, l'oxyde de fer et la chaux [3].

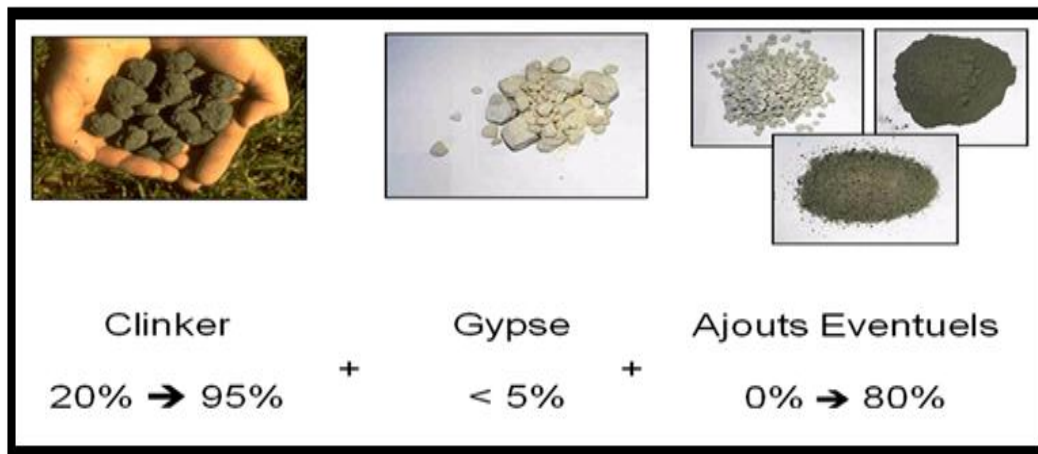


FIG .I-2. LES CONSTITUANTS DU CIMENT.

I-1-3-2. Le ciment portland composé (CEM II) :

Les ciments portland composés contiennent au moins 65% de clinker, 5% de constituant secondaires, et des ajouts avec 30%. On a, par convention [4]:

$$(\text{Clinker}) + (\text{autres constituants}) + (\text{constituants secondaires}) = 100.$$

I-1-3-3. Ciment de Haut Fourneau (CEM III) :

Constitué d'un mélange de clinker et de laitier granulé de hauts fourneaux (teneur minimale 36 %). [5]

I-1-3-4. Ciment pouzzolaniques (CEM IV) :

Constitué d'un mélange de clinker, de pouzzolane ou de cendre doit en plus satisfaire à l'essai de «pouzzolanité NF EN 196-5 ». [5]

I-1-3-5. Ciment composé (CEM V) :

Ce genre de ciment est constitué d'un mélange de clinker, de laitier granulé et d'autres constituants secondaires. [5]

I-2. Les bétons :

En 1824, un inventeur Anglais, Joseph Aspdin [9] crée un ciment portland qui est le plus utilisée à ce jour pour la production de béton. En 1849, un jardinier Parisien, Joseph Monier [10]

a inventé le béton armé à partir de l'idée de renforcer les bacs à fleurs qu'il construisait en béton en y incorporant des barres en fer.

I-2-1. Composition du béton :

Le béton est un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Composé essentiellement de granulats, et de pâte de ciment (ciment, d'eau de gâchage et adjuvants) pour améliorer ou acquérir certaines propriétés pour faire face à des situations bien définies. Chacun de ses composants joue un rôle important dans le mélange.

I-2-2. Propriétés des bétons:

On distingue deux états ou deux aspects de béton:

Le béton frais : Mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage. Divers essais peuvent être conduites sur ce type, comme exemple le cône d'Abrams, l'étalement et le comportement rhéologique (Figure 1-3).



FIG .I-3. ESSAI SUR BETON FRAIS

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité (qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage). L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité, elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais , Dans le cas de béton ordinaire [9] elle est principalement influencée par :

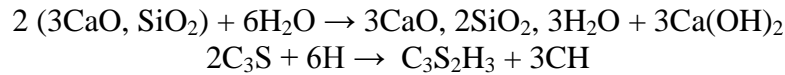
- La nature et le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité et la granulométrie.
- Le dosage en eau.

Dès le contact avec l'eau le ciment, commence sa solidification à travers plusieurs réactions chimiques [11], c'est l'ensemble de ces réactions que l'on définit comme l'hydratation.

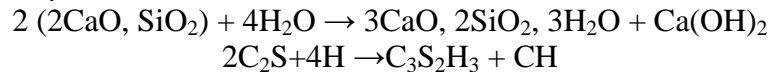
Les produits de ces réactions sont les C-S-H (hydrates de silicate de calcium) principalement à l'origine de la rigidification de la pâte de ciment, et la chaux appelée portlandite. Les réactions d'hydratation des constituants du ciment sont exothermiques, avec des vitesses d'hydratation différentes pour chaque constituant au cours du temps, les produits d'hydratation se forment en diminuant la porosité initiale. Cependant, la présence de gypse dans

le ciment a pour conséquence de remplacer cette réaction par une autre plus lente. Les constituants mineurs du ciment ne contribuent que très peu à la solidification de la pâte mais possèdent d'autres propriétés utiles à une bonne hydratation du ciment.

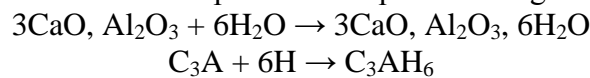
L'hydratation complète ou l'interaction du C3S avec l'eau à la température ambiante se déroule suivant le schéma [12].



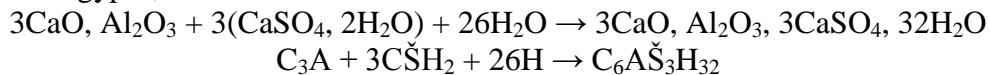
L'hydratation de C₂S-β se déroule dans les mêmes conditions suivant la réaction.



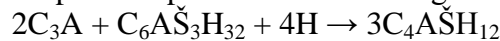
L'interaction de C₃A avec l'eau est très rapide à la température de gâchage.



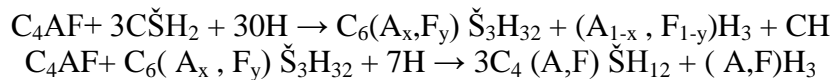
En présence du gypse, la réaction se conforme au schéma.



Le minéral naturel de même composition porte le nom d'ettringite.



L'aluminoferrite tétracalcique (C₄AF), donne avec l'eau à la température ambiante la réaction suivante.



Le béton durci : Après quelques jours à quelques semaines et des réactions d'hydratation l'état du béton devient plus solide. On parle alors des résistances mécaniques et de la durabilité qui s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques entre ses constituants (Figure I-4).



Fig. I-4. Eprouvette en béton durci

Lorsque le béton durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois. La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité

Dans les pâtes à CEM I, les distributions de taille des pores sont généralement caractérisées par des pores capillaires (macropores) au voisinage de 0.1 μm, avec une deuxième

classe d'accès de pores détectée dans les régions situées autour de $0.02 \mu\text{m}$ (micropores). A l'inverse les pâtes à CEM V ont une porosité étroite et centrée vers une microporosité ($<0.02\mu\text{m}$) comme l'indique la figure I-5 [13].

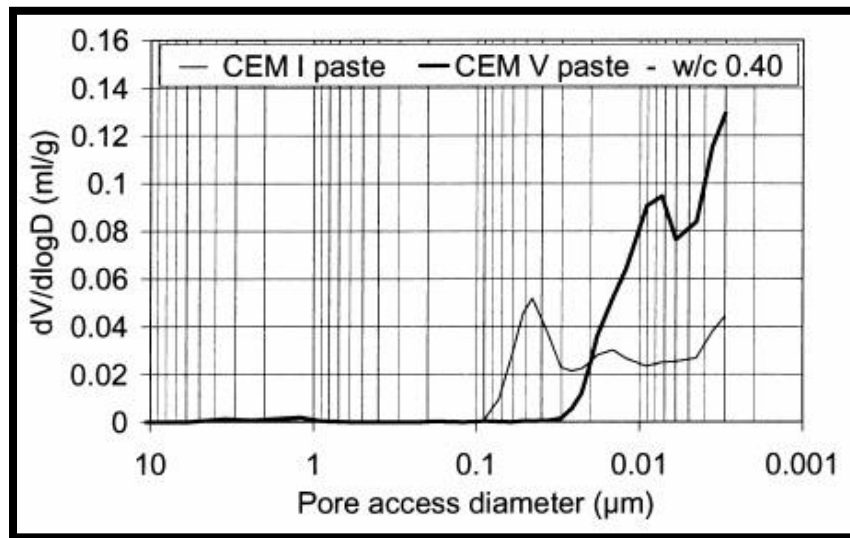


FIG. I-5. COMPARAISON DE LA DISTRIBUTION DE TAILLE DES PORES DES PÂTES A BASE DE CEM I ET CEM V.

La qualité de béton à l'état durci dépend des caractéristiques du squelette pierreux, de la pâte de ciment durci, et de l'adhérence entre les deux.

Ainsi la résistance à la compression est souvent recherchée pour le béton durci. Cette résistance est la convoitise de presque pour ne pas dire toutes les recherches (Figure I-6) [14].

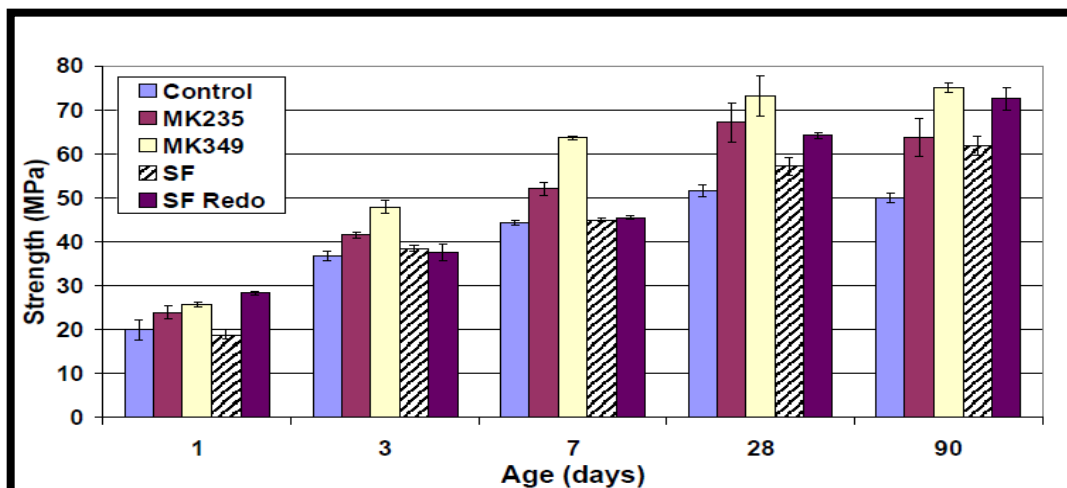


FIG. I-6. RESISTANCE A LA COMPRESSION DE QUELQUES BETON $E/C=0,4$

I-2-3. Différents types de bétons :

I-2-3-1. Béton léger :

Les bétons légers ont une masse volumique après séchage de 2100 kg/m^3 . Parmi ces bétons on peut citer les bétons de granulats légers.

I-2-3-2. Béton lourd :

C'est un béton dont la masse volumique est supérieure à 2600 kg/m³, les résistances mécaniques du béton lourd sont comparables à celles des bétons classiques et même plus élevées compte tenu des faibles dosages en eau. [15].

I-2-3-3. Béton ordinaire :

Mélange homogène composé exclusivement des constituants de base ciment, granulats, eau, avec un rapport (E/C) qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée. Le béton ordinaire est caractérisé par sa résistance à la compression qui se situe entre 20 Mpa ≤ f_{c28} ≤ 50 MPA [15].

I-2-3-4. Béton auto plaçant (BAP) :

Développé dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon, le béton auto plaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration. Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique (Figure I-7)[15].

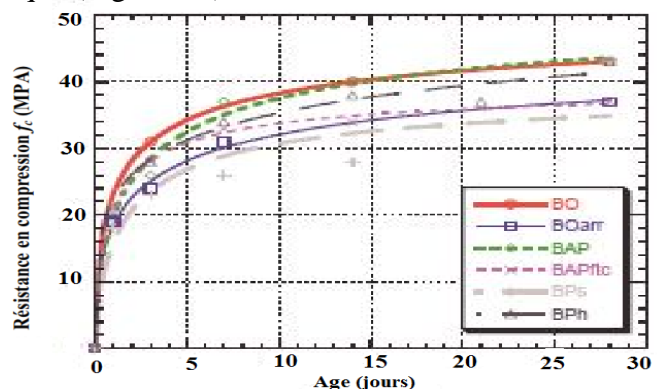


FIG.I-7. RESISTANCE EN COMPRESSION D'UN BAP PAR RAPPORT A D'AUTRES BETONS.

I-2-3-5. Béton de haute performance (BHP)

C'est un béton aux résistances mécaniques élevées à jeune âge et à 28 jours (Supérieure à 50 MPA), et un rapport pondéral (E/C) inférieur à 0,4. Leur propriété essentielle est leur grande résistance en compression qui dépasse largement le cas des bétons ordinaires. Ceci est obtenu grâce à leur faible porosité qui est diminuée en réduisant la quantité d'eau de gâchage par l'emploi d'adjuvants plastifiants et super plastifiants [15].

Tab. I-1. Comparaison des résistances à la compression entre un BO et un BHP

Classe	Béton ordinaire	BHP
R _{c28} jours [Mpa]	16 à 40	45 à 60

I-3. Formulation du béton :

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants (granulats, eau, ciment) afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (résistance, consistance).

Il existe deux méthodes pour déterminer une formulation du béton :

- Les méthodes semi-empiriques (Bolomey, Faury, Vallette)
- Les méthodes graphiques (Dreux-Gorisse)

Aucune entrée de table des matières n'a été trouvée.

C'est une méthode pratique qui simplifie la formulation du béton. Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telles que la dimension des granulats (D). Elle permet de déterminer les quantités optimales des matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton.

Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique. Il faut déterminer au préalable le rapport C/E, C et E, le mélange optimal a minimum de vides, la compacité du béton et les masses des granulats [15]

Par sécurité, la résistance visée représente une majoration de 15% de la résistance désirée. Ainsi la résistance visée :

$$f'_c = f_{c28} + 15\% f_{c28}$$

a) Dosage en ciment et en eau :

Le dosage en eau et ciment dépend de la résistance visée et de la qualité du ciment et des granulats. Ainsi, on établit une relation entre l'ensemble de ces paramètres.

$$f'_c = \sigma_c \cdot G \cdot \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

G: Coefficient granulaire donné par le (Tableau I-2), en fonction de la qualité et de la dimension maximale (D_{max}) du gravier.

Rc : Classe vraie du ciment à 28 jours, en bars. Connaissant le rapport C/E la fluidité désirée, qui est une donnée du problème, on peut déterminer le dosage en ciment d'après l'abaque (Figure I-8)

Tab. I-2 Valeurs de G coefficient granulaire

qualité des granulats	dimension des granulats D (mm)		
	Fins $D \leq 16$	Moyens $25 \leq D \leq 40$	Gros $D \leq 63$
Excellente	0.55	0.60	0.65
bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Cette relation permet de déterminer le rapport C/E :

$$\frac{C}{E} = \frac{f'_c}{\sigma_c \cdot G} + 0.5$$

Il est à observer au travers cette relation que le dosage en ciment est d'autant plus important que la résistance visée du béton soit forte. Inversement, le dosage en ciment diminue lorsque la résistance du ciment augmente. Pour une résistance visée, Il y a également moins besoin de lorsque la qualité ou la dimension des granulats augmentent.

Le dosage en eau dépend également de l'ouvrabilité désirée. Ainsi en intégrant l'ouvrabilité désirée, expérimentalement, et à partir du rapport C/E, il est possible de déterminer le dosage en ciment par l'abaque suivant :

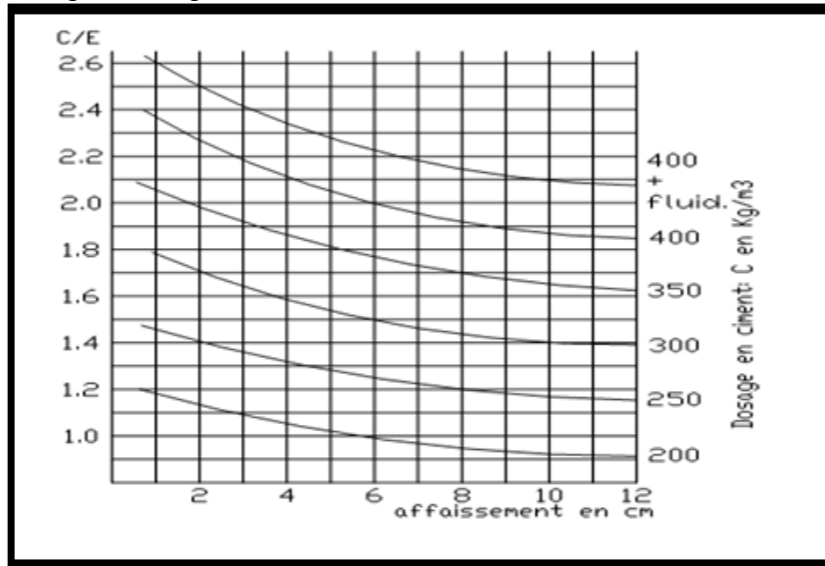


FIG. I-8 – DOSAGE EN CIMENT

La détermination du dosage en ciment s'obtient par cet abaque à double entrée. En abscisse, la valeur de l'affaissement désirée et entrée et en ordonnée le rapport, C/E. L'intersection des deux entrées, indique la sortie, la courbe donnant le dosage en ciment.

b) Détermination du dosage en eau:

Le dosage en eau est à ajuster .En effet L'eau doit pouvoir humidifier tous les grains du mélange .Or pour humidifier un grain, il faut d'autant plus d'eau que son diamètre est dosage en eau déterminer est indiqué pour mouiller tous les grains du mélange granulaire d'un diamètre représentatif maximal, D=8mm. Pour les autres diamètres, il faut majorer ou minorer ce dosage selon ce diamètre, D.

Tab .I-3. Correction du dosage en eau selon le diamètre, D du mélange granulaire

Diamètre en (mm)	10	12.5	16	20	25	31,5	40	50
Correction en (%)	+9	+6	+4	+2	0	- 2	-4	-6

Ainsi pour un mélange granulaire de diamètre, D =8mm, il faut majorer le dosage en eau de 2%.

c) Dosage en pourcentage des granulats :

On trace la courbe granulaire de référence sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR.

Il reste à déterminer le pourcentage de tamisâtes du point de brisure. Cette position dépend de proportions du mélange. Or, les proportions du mélange influent sur la compacité du béton et par conséquence sur sa résistance.

Le problème consiste donc à déterminer l'ordonnée du point de brisure qui permettra de donner la meilleure compacité au béton. Cette position est optimisée par la méthode DREUX – GORISSE. L'ordonnée optimisée du point de brisure, Y_a est déterminé par la relation suivante :

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

Cette relation prend en compte l'influence de la forme des granulats, du dosage en ciment, de la vibration de la finesse du sable et de la mise en œuvre du béton par une pompe à béton sur la compacité du micro-béton et sa facilité de mise en œuvre.

d) Dosage en masse des granulats :

La meilleure compacité est obtenue en vérifiant les proportions du mélange granulaire par un coefficient dit « γ ». Mais indépendamment de cela, elle dépend également du diamètre, D des granulats, des conditions de vibration du béton et de sa plasticité.

I-4. Conclusion :

Le béton est un matériau très demandé, son utilisation ne cesse de croître au cours des années. Afin d'assurer la croissance de ce matériau de construction indispensable, l'approche du développement durable et son évolution pour rendre la vie meilleure doit être une priorité. L'intégration de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques de formulation est toujours d'actualité.

Chapitre II

II-1.Définition :

Les ajouts sont des constituants modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques et physiques. On appelle « constituant principal », un constituant entrant dans la composition du ciment dans une proportion excédant 5% en masse.

II-2.Classification 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 II.1.[17]

Tab.II-1. Classification des ajouts selon leur réactivité.[48]

Type	Réactivité	Matériaux
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granulé-cendres volantes riche en Calcium
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement réactif	Cendres volantes pauvre en calcium,pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, trasphonolithe, terres a diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...), fibres, pigments, colorants, matières expansives, dispersions synthétique

II-2-1.Les ajouts hydrauliques :

Le phénomène de lixiviation des bétons correspond dans les grandes lignes à un lessivage des hydrates de la pâte de ciment au contact de milieux fluides. Les constituants hydrates de la pâte de ciment des bétons forment un milieu basique, le pH de leur solution interstitielle tant de l'ordre de 13. Les milieux, naturels ou pas, pouvant conduire à des phénomènes de lixiviation correspondent aux eaux pures, aux eaux douces, aux pluies acides, et aux milieux plus franchement acides (acides minéraux et organiques, eaux résiduaires). Le pouvoir lixiviation d'un milieu est proportionnel à son acidité vis-à-vis du béton.

II-2-1-1.Laitier granulé de haut fourneau :

Le laitier est un sous produit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Pour 1m³ du métal en fusion environ 280 à 340 kg de laitier est produit dans les hauts fourneaux modernes [18]. La morphologie des grains du laitier, sous microscope optique, est montrée dans la Figure II-1.

En cimenterie, seul le laitier granulé est utilisé comme ajout au ciment Portland. Le laitier ne possède par lui-même aucune vertu liante, mais sous la forme broyée et en présence d'eau, il

réagit chimiquement avec la chaux et l'eau pour former des composés possédant des valeurs liantes [19].



FIG.II-1. VUE AU MICROSCOPE DU LAITIER

Les laitiers de haut fourneau présentent des propriétés hydrauliques latentes et/ou pouzzolanique dépendamment de leur composition. Les propriétés liantes des laitiers permettent de substituer le ciment jusqu'à des taux de 95%. L'hydratation est activée par les alcalins et les sulfates, mais les résistances mécaniques se développent plus lentement qu'avec un ciment portland les 28 premiers jours.

Avec l'augmentation de la substitution du ciment par le laitier (33,3-50-66,7%) et grâce à une grande teneur en aluminates permettant une production de sel de Friedel plus importante, la résistance aux chlorures est accrue pour les bétons avec $E/C=0,55$, est ceci malgré les plus faibles résistances mécaniques à 28 jours.

Présents dans un béton, les laitiers de haut-fourneau augmentent l'ouvrabilité, abaissent la chaleur d'hydratation, améliorent la durabilité en affinant la structure porale et en diminuant la perméabilité et la diffusion d'ions chlorure, améliorent la résistance mécanique à long terme. Toutefois, massivement ajoutés, ils retardent la prise, réduisent la résistance mécanique au jeune âge, augmentent le retrait endogène et diminuent la résistance à la carbonatation.

Les bétons à 70 et 80 % de substitution massique du ciment Portland par du laitier de haut-fourneau se carbonatent, en conditions naturelles, beaucoup plus que des bétons au seul ciment Portland. Des bétons à 65 % de substitution massique du ciment Portland par du laitier de haut-fourneau se carbonatent, en conditions naturelles, entre 15 et 30 % plus que des bétons à 50 % de substitution. Les bétons à 50 % de substitution du ciment Portland par du laitier de haut-fourneau montrent la même résistance à la carbonatation naturelle que des bétons au ciment Portland. [20]

II-2-1-2.Cendres volantes :

Les cendres volantes utilisées dans les ciments et les bétons sont produites dans les centrales thermiques utilisant du charbon pulvérisé. Elles se présentent sous forme d'une poudre de couleur plus ou moins foncée suivant sa teneur en carbone et en impureté. Les cendres volantes sont sous forme de particules sphériques vitreuses, pleines ou creuses (figure II-3). Leur surface spécifique Blaine varie entre 250 et 400 m^2/kg (domaine analogue à celui des ciments) [21].

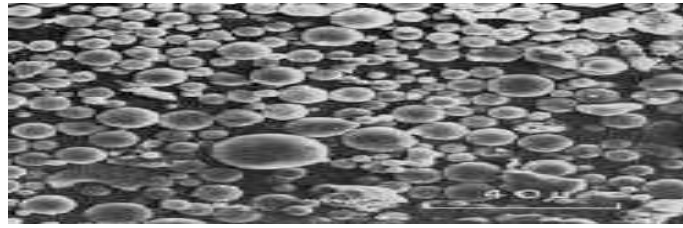


FIG.II-2. LA CENDRE VOLANTE

Les cendres volantes améliorent l'ouvrabilité du béton à l'état frais grâce à l'effet de leur morphologie. La maniabilité peut donc être conservée tout en diminuant le rapport E/C, menant à un béton de plus haute performance et aux propriétés de transfert accrues. Les taux de substitution sont typiquement de l'ordre de 25%. Leur incorporation entraîne des propriétés mécaniques au jeune âge généralement moins bonnes qu'un béton au ciment portland, même si à long terme les performances peuvent être recouvrées. La diminution de la cinétique d'hydratation entraîne aussi une diminution de la chaleur dégagée et les risques de dégradation de l'enrobage par fissuration dans les pièces massives sont ainsi diminués.

Les cendres volantes présentent une réactivité pouzzolanique, et peuvent également posséder des propriétés liantes. Les pouzzolanes réagissent avec la portlandite produite par l'hydratation du ciment pour former des C-S-H supplémentaires consolidant la structure à long terme à travers l'augmentation de sa compacité. Il en résulte un matériau aux propriétés mécaniques supérieures et moins perméable.

Les cendres volantes peuvent être ajoutées au béton à raison de 40 à 100 kg par m³ de béton, soit à l'état sec, soit à l'état humide. Il convient de bien les mélanger au béton pour obtenir une teinte uniforme.

L'action des cendres volantes permet une amélioration de l'ouvrabilité, de la plasticité et de la compacité des bétons. Elles remplissent plus facilement les coffrages et l'aspect du béton au démoulage est amélioré (cela est dû en partie à la forme arrondie des cendres brutes jouant un peu le rôle de petits roulements à billes).

Les cendres permettent de réduire la teneur en eau à ouvrabilité égale et dans ce cas de diminuer le ressuage, d'augmenter l'imperméabilité et par conséquent la durabilité. L'amélioration est d'autant plus marquée que les cendres sont plus fines.

II-2-2. Les Pouzzolanes :

Ce sont des produits naturels ou artificiels composés essentiellement de silice, d'alumine et d'oxyde ferrique. La morphologie de leurs particules, sous microscope électronique, est présentée dans la Figure II-2. Les pouzzolanes sont employées en cimenterie pour leurs propriétés « pouzzolaniques » c'est-à-dire une aptitude à fixer la chaux à une température ambiante et à former des composés ayant des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire pouvant faire prise et durcir par hydratation [22].



FIG.II-3. VUE AU MICROSCOPE D'UNE POUZZOLANE

Les résultats obtenus ont montré que la pouzzolane de Béni Saf par exemple, utilisé en remplacement d'un ciment, permet de maintenir les mêmes performances que lorsque ce ciment est utilisé seul. Ces performances sont principalement dues à la modification de la microstructure de la pâte de ciment dans le sens d'un accroissement de compacité.

Les caractéristiques des bétons pouzzolaniques après 90 jours de conservation dans un milieu plus ou moins agressif, ne sont pas affectées par les dégradations, à cause de la compacité très élevée qui empêche la pénétration des agents agressifs. Ainsi, les performances mécaniques des bétons dans lesquels elle a été incorporée restent analogues sinon meilleures à celles d'un béton témoin d'où un avantage économique considérable

D'un autre côté l'évolution du retrait a indiqué que les bétons pouzzolaniques développent un retrait de dessiccation stable est faible au cours du temps. Ainsi, la substitution du ciment par 20% de pouzzolane, mène vers la fabrication d'un béton avec peu de fissures.

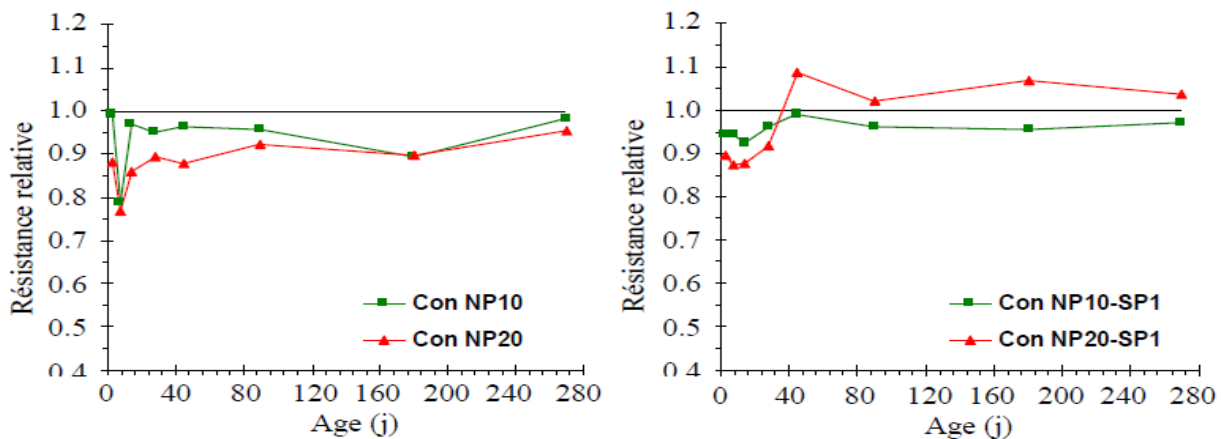


FIG.II-4. RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BETONS CONSERVE DANS UNE SOLUTION DE 5% Na_2SO_4

II-2-2-1. La fumée de silice :

La fumée de silice est un sous produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elle est formée de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de $0,1\mu m$) (Figure II-4). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principale, elle doit comporter au moins 85% (en masse) de silice amorphe et avoir une surface massique supérieure à $15m^2/g$ [21].

La fumée de silice agit de trois façons dans les bétons : action physique, physicochimique et pouzzolanique. En effet, l'action physique consiste à chasser l'eau qui se trouve entre les particules de ciment, ce qui plastifie le béton. L'action physico-chimique se manifeste par un bouchage des pores de $0,1\text{ mm}$ de diamètre à partir de 7 jours, ce qui rend le béton à fumée de

silice tout à fait imperméable. L'action pouzzolanique permet, en réagissant très vite avec la chaux libérée lors de l'hydratation, de produire un C-S-H très dense qui permet des gains de résistances en compression dès l'âge de 7 jours [23].

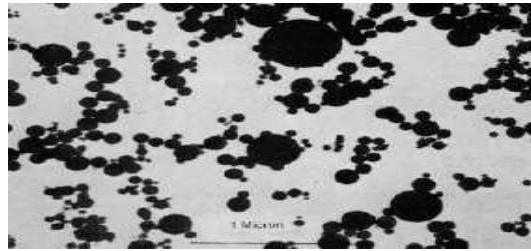


FIG.II-5. LA FUMÉE DE SILICE

Les fumées de silice sont incorporées dans les bétons jusqu'à un taux de 8%. Elles affectent considérablement la maniabilité des bétons frais si bien que l'utilisation de superplastifiant est souvent nécessaire. Ces additions présentent une très grande réactivité de par leur nature vitreuse et leur grande finesse. Il a ainsi été montré que les fumées de silice contribuent au développement des résistances au jeune âge.

Les fumées de silice sont reconnues pour densifier la matrice cimentaire à la fois physiquement, en augmentant la compacité de l'empilement granulaire, et chimiquement par réaction pouzzolanique. Les bétons ont de meilleures perméabilités aux chlorures, ce qui est attribué à l'affinement des pores, notamment à faible rapport E/C (0,3).

L'utilisation de la fumée de silice en mélange avec un superplastifiant est connue pour améliorer la résistance mécanique et la durabilité des bétons à hautes performances. Les mécanismes d'action de la fumée de silice dans le béton reposent sur des effets de nature physique et chimique. Ainsi la granulométrie des particules de fumée de silice, de dimension moyenne cent fois plus faible que celle du ciment, contribue à densifier la pâte par un effet physique de type filler qui conduit à un empilement plus compact des grains solides. Par ailleurs, la réaction chimique pouzzolanique de consommation de l'hydroxyde de calcium par la silice amorphe démarre rapidement. Elle conduit à modifier la microstructure des produits d'hydratation en réduisant la dimension des pores de la pâte hydratée. Cependant, certaines divergences subsistent parmi les chercheurs sur la nature et la localisation de l'effet bénéfique apporté par cet ajout [24].

II-2-3.PRINCIPAUX AJOUTS MINÉRAUX INERTE :

Les particules de clinker de dimension supérieure à 60 μm ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme. Pour cette raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes. Ces ajouts sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi eux on distingue les fillers calcaires et la poussière de ciment.[19]

II-2-3-1.Fillers Calcaires :

Ils sont des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation des roches carbonatées (calcite, aragonite, dolomite), ils sont composés principalement de calcite (CaCO_3) et de dolomite ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$) [20].

Les fillers calcaires sont des produits naturels obtenus par broyage de matière calcaire. Ces fines ne présentent pas de réactivité pouzzolaniques ou hydrauliques. Elles ont tout de même un effet physique.

Lorsqu'ils sont incorporés aux bétons, ces fillers permettent d'optimiser le squelette granulaire et d'améliorer la maniabilité du béton, permettant de réduire la quantité d'eau et ainsi améliorer ses performances. L'effet filler permet donc de diminuer le rapport E/C. De plus les fillers accélèrent l'hydratation du ciment en apportant des sites de nucléation aux hydrates. Ceux-ci peuvent en effet précipiter à la surface des fillers, et ainsi réduire la couche d'hydrates autour des grains de ciment.

Les fillers peuvent légèrement améliorer les propriétés de transfert des bétons en affinant la structure poreuse, mais cet effet n'est pas aussi marqué qu'avec des pouzzolanes ou des laitiers. La principale contrainte à l'utilisation de filler calcaire est la formation de thaumasite, due à l'action des sulfates en région froide.

II-3. Importance des ajouts :

Dans le domaine des travaux publics et du bâtiment, le ciment Portland artificiel sans ajout ne répond pas à lui seul à toutes les exigences (mécaniques, durabilité, coût, ...). De plus, dans une même cimenterie et pour répondre aux différentes demandes commerciales, on a tendance à ne plus fabriquer qu'un seul clinker et à le broyer plus ou moins finement avec des additions minérales de provenances diverses pour fabriquer des ciments composés (CEM II).

II-3-1. Bénéfices fonctionnels :

L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité des bétons, réduit la demande en eau tels que : les cendres volantes ou le laitier qui diminuent le ressuage et la ségrégation, en diminuant le volume des vides (à l'exception des ajouts d'une grande surface spécifique comme la fumée de silice).

En plus les ajouts améliorent les propriétés mécaniques à condition d'optimiser la quantité d'ajout ; cette augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains. Et il ne faut pas oublier, que les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates, par rapport au ciment portland, ce qui a tendance à augmenter la durabilité du béton.

Enfin il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

II-3-2. Bénéfices économiques :

La demande du marché pour le ciment a fortement augmentée au cours du 20^{ème} siècle, suivant le développement de l'industrie et les besoins de l'urbanisation croissante. Après la Seconde Guerre mondiale la consommation des pays industrialisés a été multipliée par un facteur de 6 à 8.

Or le ciment portland est le composant le plus coûteux dans la confection du béton, des produits de substitution mélangés au ciment portland en vue de ce jour, purement pour des raisons économiques mais aussi pour améliorer certaines propriétés, et comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton pour le coût du combustible.

II-3-3. Bénéfices écologiques et environnementaux :

La réduction des émissions de dioxyde de carbone CO₂ est l'un des plus grands défis lancés à l'industrie du ciment. La production d'une tonne de ciment provoque le rejet d'une tonne de CO₂. 55% de ces émissions proviennent du processus de décarbonatation et 45% de la combustion. L'industrie cimentière, a infléchi sa propre consommation d'énergie d'environ 30 % au cours des 20 dernières années, soit approximativement 11 millions de tonnes de charbon par an. Elle a également fortement investi dans diverses techniques d'élimination des poussières en réduisant de 90 % ses émissions.

La valorisation du laitier de haut fourneau, cendres volantes des centrales thermiques, pouzzolanes naturelles et du calcaire utilisés en tant que matières premières pour la production de clinker, a permis de protéger les ressources naturelles non renouvelables. Grâce à cette valorisation, l'industrie cimentière contribue à résoudre certains problèmes des déchets (sans compter les avantages qui en résultent au niveau des émissions de CO₂).

II-4. Les argiles :

L'argile se définit comme une terre grasse et molle contenant un ensemble de particules fines (<2µm), constituées essentiellement de minéraux à structure en feuillets et présentant une plasticité à l'état humide.

Curieusement, les argiles sont les roches qui ont résistées le plus longtemps à l'analyse et à la compréhension des hommes. Ce ne sont que les outils modernes de la minéralogie qui ont permis de pénétrer les secrets de ces matériaux utilisés empiriquement depuis des millénaires.

II-4-1. Les minéraux argileux :

Les minéraux argileux sont en général en forme de feuilles, d'où leur nom de phyllites. Ils appartiennent, comme les micas, au groupe des phyllosilicates. Chaque cristal ou phyllite, dont l'épaisseur se mesure en micromètres, est composé de quelques centaines de feuillets empilés, qui se mesurent en nanomètres. Chaque feuillet est composé de deux, trois ou quatre couches planes associées. De ses variations viennent les différentes espèces de minéraux argileux, parmi elles :

II-4-1-1. Le kaolin :

La kaolinite se forme comme produit résiduel météorologique ou comme minerai sédimentaire, dans les sols. Elle est formée dans les conditions de pression et de température de la surface de la terre (c.-à-d., 25–30°C et de pression atmosphérique).

Associe dans son feuillet, une couche de tétraèdres à cœur de silicium et une couche d'octaèdres à cœur d'aluminium. La distance de la surface d'un feuillet à l'autre est de 0,74 nm (Figure II-7). [25]

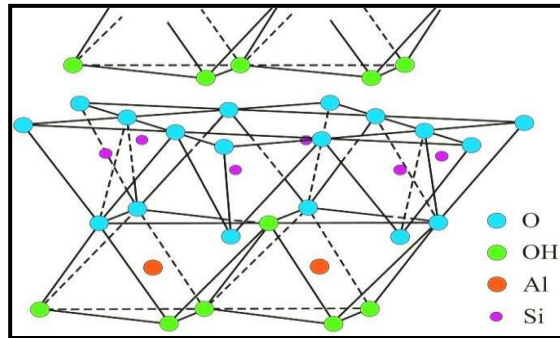


FIG. II-7. STRUCTURE DE LA KAOLINITE.

II-4-1-2. Les illites :

Ce minéral est le plus répandu des minéraux argileux dans les sédiments et les sols (Figure II-5). Il est construit sur le modèle du mica blanc, mais avec une structure plus désordonnée et moins de potassium dans les espaces interfoliaires. Il est très fréquent dans une foule de roches détritiques comme matrice ou comme ciment. [26]

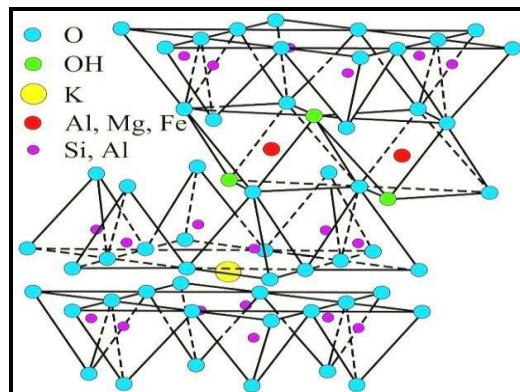


FIG. II-6. LA STRUCTURE DE L'ILLITE

II-4-1-3. Les montmorillonites :

Les montmorillonites peuvent être détritiques, par héritage des sols ou des sédiments plus anciens qui les contiennent. Elles peuvent être néoformées en milieu alcalin à partir des autres silicates ou à partir des verres volcaniques. (Figure II-6) [25]

II-5. Calcination :

La calcination est une technique de préparation d'échantillon utilisée en chimie analytique qui permet de prendre en compte ce phénomène. Elle consiste à chauffer l'échantillon sous air à haute température (typiquement 500 à 1000°C) pour provoquer des réactions physiques et chimiques et mettre ainsi l'échantillon dans un état de référence [27].

II-5-1. La calcination flash [29] :

La calcination flash, est une calcination très rapide d'un solide, généralement sous forme fine en suspension dans un gaz. La représentation de l'évolution de la température en fonction du temps permet d'obtenir l'historique thermique des particules.

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 changements sont cinétiquement bloqués et les produits incomplètement déshydroxylés si le temps d'exposition est trop court.

II-5-2. La calcination lente :

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 un degré suffisamment long (une voir plusieurs heures). [28]

Dans le cas du kaolin, la complexité des transformations que subit le produit façonné, dépend de la composition chimique et minéralogique de la matière première et de la nature et la quantité des impuretés présentes. Le départ de l'eau de constitution s'effectue dans l'intervalle 400-800°C. Ce départ d'eau entraîne une déformation du réseau cristallin, ce qui rend par exemple la kaolinite moins stable et la formation de la métakaolinite. Au cours de la montée en température cette phase cristalline se dégrade de plus en plus pour devenir pratiquement amorphe vers 950°C. La déshydroxylation peut être précédée par un stade de prédéshydroxylation par délocalisation progressive des protons. Cette modification à l'intérieur des couches octaédriques n'entraîne aucune perte de masse du minéral.

Le carbonate de calcium se décompose en chaux vive CaO lors de la cuisson avec dégagement de gaz carbonique CO₂ aux environs de 800°C. Ce gaz se dégage plus ou moins facilement suivant la texture du produit à cette température et il peut maintenir une pression au cœur du produit, retardant ainsi le retrait. La nature des phases minérales issues de la composition de la calcite en CaO dépend de la nature de la température de cuisson, de la distribution en taille des grains de calcite et de sa concentration.

II-6. Modes d'incorporation des additions introduites dans les bétons :

Dans le cas où seule la résistance à 28 jours est recherchée, les additions remplacent une partie du ciment. Alors que dans les bétons spéciaux (bétons à hautes performances, bétons autoplaçant, ...), les additions sont utilisées pour augmenter les résistances mécaniques ou rhéologiques, sans changer le dosage en ciment. En effet, ces additions contribuent à la diminution de la porosité du matériau durcie et donc à l'amélioration de ses résistances et de sa durabilité. D'autre part, l'ensemble de ces additions (laitiers, cendres, fumée de silice, pouzzolanes, calcaires) participent aux réactions d'hydratation.

Dans le cas de la vase calcinée, les chercheurs se focalisent sur le pouvoir pouzzolanique des minéraux argileux constituant la vase ou la boue de dragage.

Certains s'intéressent aux particules de vase calcinés à une température inférieure à 800°C et montrant des structures amorphes qui réagissent avec la chaux pour donner des CSH de même type que ceux des réactions pouzzolaniques .

La substitution d'un certain pourcentage de pouzzolane calcinée au ciment Portland qui va réagir avec la chaux libérée lors de son hydratation, permet d'obtenir des résistances égales voire meilleures que le ciment seul.

Dans un autre cas la vase calcinée a été introduites dans le BAP ou les chercheurs ont constatés qu'elle joué un double rôle : l'effet filer pour épaissir la pâte autoplaçante dans un premier temps avant hydratation du ciment et un rôle de liant hydraulique latent (pouzzolanique)

après libération de portlandite par hydratation du ciment. Les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP ont été améliorées à la fois

Dans un autre contexte la vase a été sujet d'un mortier de réparation d'un béton endommagé [29]. Où les chercheurs après confection d'éprouvettes cylindriques de béton qui ont été endommagées extérieurement sur une épaisseur de 1,5 cm. Les dégradations obtenues sont réparées à l'aide d'un mortier à base de vase calcinée et de ciment. Un chemisage des éprouvettes endommagées, a servi pour les réparer dans des moules cylindriques.

II-8. CONCLUSION :

Suite a la demande accrue en matière premier de béton, les matières premiers entrants dans la confection de ce dernier se trouve farouchement exploitées suit à sa, les ajouts cimentaires en vue le jours ils entrent dans différents niveaux, a partir de l'élaboration du clinker jusqu'à la fabrication des ciments. Dans un autre niveau les ajouts cimentaires peuvent être incorporés dans les bétons tels que le fumée de silice ou le bordj Khalifa est le meilleur exemple.

Introduction :

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

Le choix des matériaux s'est porté, tout d'abord, sur leur disponibilité dans la région de M'SILA afin de produire un béton local, car à savoir que tous les ingrédients sont disponibles dans la région.

Les matériaux utilisés sont :

*Le sable de rivière fin d'origine silicique (0/5) de la région de BOUSAADA (OUED MAITER) ;

*Le gravier d'origine calcaire de carrière COSIDER.

*Le ciment de CEM I de la cimenterie de Hammam Dalaâ (Wilaya de M'sila) ;

*Et l'eau potable du laboratoire.

III-1-Caractérisation des matériaux utilisés

III-1-1-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 physiques du sable utilisé :

Le sable a été soumis à plusieurs essais au laboratoire de Génie civil de l'université de M'sila, selon les normes françaises AFNOR.

a) Masse volumique (absolue) (NF P 18-555) [30]:

Cet essai a pour but la permission de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons (tableau 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 un matériel courant du laboratoire.

La masse volumique absolue est la masse de l'unité de volume de la substance, 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 de masse 300g.

*On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000 ml et on y verse 150 ml 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 : $V_1 = V_e - 150$ (ml)

La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule:

$$\rho = \frac{M}{V_1}$$

Résultats obtenus :

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

N° d'essai	M (g)	V_e [g]	V_1 [g]	ρ [g/cm ³]	ρ_{moy} g/cm ³
1	300	150	266	2.586	2.58
2	300	150	266	2.586	
3	300	150	266	2.586	

On remarque que la masse volumique de sable est entre 2.4 et 2.8 ce qui est acceptable.

b) Masse volumique apparente (NF P 18-555)[30] :

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 tableau III-2.

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.

*On pèse le récipient vide M_1 .

*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 M_2 ce poids.

*Volume de récipient $V_r = 900 \text{ cm}^3$.

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

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

Résultats obtenus :

Tab.III-2.Masse volumique apparente du sable de Boussaâda.

N° d'essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	ρ_{app} (g/cm ³)	$\rho_{app\ moye}$ (g/cm ³)
01	114.33	1468.97	1.505	1.504
02	114.33	1463.96	1.499	
03	114.33	1472.72	1.509	

c) Porosité : (NF P 18-555)[30] :

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

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

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

Pour le sable de Boussaâda : **P= 47.30%**

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.

La compacité donnée par la formule :

$$C = (\rho_a / \rho_{ab}) = 100 - P$$

Pour le sable de Boussaâda : **C = 52.7%**

e) L'indice des vides :

L'indice des vides est le rapport entre le volume du vide et le volume de solide.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = P / (100 - P)$$

Pour le sable de Boussaâda : **e = 0.89%**

Les résultats de la porosité, la compacité et l'indice de vide sont regroupés dans les deux tableaux suivants (tableau III-3):

Tab.III-3.Porosité, compacité et indice des vides du sable de Boussaâda

Porosité P%	Compacité C%	Indice des vides e
47.3	52.7	0.89

Pour les sables courants on admet que la compacité en vrac est de l'ordre de 50% à 70%. C'est à dire que la porosité est de 30% à 50%. On constate que la porosité du sable à l'état lâche et de 47% et plus grande que 30%, donc ce sable est considéré acceptable du point de vue de porosité.

f) Equivalent de sable : NF P 18-598[33] :

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les flocules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable quantifiant la propreté de celui-ci, comme indiquer au tableau III-4.

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

$$ESV = \frac{h_1}{h_2} * 100\% \quad ESP = \frac{h'_2}{h_1}$$

Mode opératoire :

- *Tamiser une quantité de sable (masse 300 g), et Prendre une pesée de 150 g.
- *Remplir l'éprouvette de solution la vante jusqu'au premier repère (10cm).
- *A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (150g) 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, et 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, et lire la hauteur h_1 du niveau supérieure du floculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règlette.
- *Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

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

- *Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.

*Introduire le réglet dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston. Soit h'_2 la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

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

Résultats obtenus :

Tab. III-4. Equivalent du sable de Boussaâda.

N° d'essai	h_1 (cm)	h_2 (cm)	ESV (%)	h'_2 (cm)	ESP (%)
1	12.2	11.12	91.14	9.7	79.51
2	11.2	9.66	86.25	9.5	84.82
3	11.3	10	88.49	9.8	86.72

$$(ESV)_{moy} = 83.68\%$$

$$(ESP)_{moy} = 88.62\%$$

Notre sable est très propre, avec une absence totale de fines argileuses qui entraînent un défaut de plasticité du béton comme indiqué au tableau III-5.

Tab. III-5. Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX.

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
65<ES<75	65<ES<70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75≤ES≤85	70≤ES≤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.

g) Teneur en eau (NF P 18-555)[30] :

Le sable a la capacité de retenir une quantité d'eau très grande (elle peut atteindre 20 à 25 % de son poids), si son humidité est comprise entre la limite de 0 à 3%, on l'appelle sec. La teneur en eau est représentée au tableau III-6.

Mode opératoire :

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

*Peser l'échantillon de nouveau, soit M_s son poids. La teneur en eau du sable est :

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

Où :

- M_h : Poids du sable humide en (g). M_s : Poids du sable sec en (g).

*Résultats obtenus :***Tab.III-6.Teneur en eau du sable de Boussaâda**

N° d'essai	M _h (g)	M _s (g)	W (%)	W _{moy} (%)
1	300	294	2	1.33
2	300	290	1	
3	300	297	1	

h) Degré d'absorption d'eau : NF P 18-555 [30] :

Elle est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau, elle est définie en pourcentage d'après la formule suivante, la moyenne est reportée au tableau III-7

$$D_{ab} = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100 [\%]$$

Où :

- M₁ : La masse du matériau sec en (g).
- M₂ : La masse du matériau saturé d'eau superficiellement sec en (g).

*Résultats obtenus :***Tab. III-7. Degré d'absorption du sable de Boussaâda.**

N° d'essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	D _{ab} (%)	D _{ab(Moy)} (%)
1	500	507	1.4	1.26
2	500	506	1.2	
3	500	506	1.2	

i) Analyse granulométrique : (NF P 18-560)[36] :

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau (tableau III-8), en utilisant une série de tamis (figure III-1).

**Fig. III-1. Les tamis d'analyse granulométrique.**

Mode opératoire :

*Prélever (2 kg) de matériau (sable sec).

*Peser 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.

*Peser 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 R_1 du tamis 1. Et reprendre l'opération pour chaque tamis inférieur.

*Ajouter le refus obtenu sur le sixième tamis à R_1 , soit R_2 la masse du refus cumulé du tamis 2 ($R_2=R_1$ +Refus partiel sur tamis).

*Poursuivre l'opération avec le reste des tamis pour obtenir les masses des différents refus cumulés R_3, R_4, \dots

*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-8.Analyse granulométrique du sable**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0,00	0,00	0,00	100,00
2.5	85,67	85,67	4,28	95,72
1.25	133,61	219,28	10,97	89,03
0.63	116,85	336,13	16,81	83,19
0.315	319,72	655,85	32,80	67,20
0.165	987,23	1643,08	82,17	17,83
0.08	339,44	1982,52	99,15	0,85
Fond	17,05	1999,57	100	0,00

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 des tamis de mailles : [0.16-0.315-0.63-1.65-2.5 et 5 (mm)] sur 100 et calculé par la relation suivante :

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

Où : R_c : Refus cumulé.

Dans notre cas : $M_f = 2.46$, ce qui est entre 2.2 et 2.8 ça veut dire un sable normale

III-1-2- Gravier :

Ce sont des granulats provenant du concassage des pierres et dont les grains ont une certaine angularité. Ils sont issus du concassage des roches calcaires.

Le gravier utilisé dans la confection du béton est obtenu, par concassage de la roche d'une carrière située à 25Km de M'sila, en allant vers B.B.A (carrière COSIDER).

III-1-2-1- Caractéristiques physiques des graviers utilisés :**a) Masse volumique absolue :****Mode opératoire :**

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique absolue du sable, les différentes moyennes sont illustrée aux tableaux III-9-10-11.

Résultats obtenus**Tab.III-9. Masse volumique absolue du gravier concassé 3/8**

Graviers	N° d'essai	$M_1(g)$	$V_e(cm^3)$	$V(cm^3)$	$\rho_{abs}(g/cm^3)$	$\rho_{moy}(g/cm^3)$
3/8	1	300	300	424	2.42	2.44
	2	300	300	421	2.48	
	3	300	300	424	2.42	

Tab.III-10. Masse volumique absolue du gravier concassé 8/16

Graviers	N° d'essai	$M_1(g)$	$V_e(cm^3)$	$V(cm^3)$	$\rho_{abs}(g/cm^3)$	$\rho_{moy}(g/cm^3)$
8/16	1	300	300	415	2.61	2.47
	2	300	300	426	2.38	
	3	300	300	424	2.42	

Tab.III-11. Masse volumique absolue du gravier concassé 16/25

Graviers	N° d'essai	$M_1(g)$	$V_e(cm^3)$	$V(cm^3)$	$\rho_{abs}(g/cm^3)$	$\rho_{moy}(g/cm^3)$
16/25	1	300	300	418	2.54	2.49
	2	300	300	420	2.5	
	3	300	300	423	2.44	

b) Masse volumique apparente :

Idem à l'essai sur sable, les résultats figurent dans les tableaux III-12-13-14.

Mode opératoire :

*Sécher le matériau jusqu'au poids constant et peser le récipient à l'état vide (M_1).

*Poser le récipient sur une table et à l'aide d'une pelle le remplir de 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 aux environs de 10cm.

*Peser de nouveau le récipient plein de gravier. Soit M_2 ce poids.

La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\gamma = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

Où :

V : Volume du récipient.

M_1 : Le poids du récipient à l'état vide. M_2 : Le poids du récipient plein de gravier.

Résultats obtenus :**Tab.III-12. Masse volumique apparente du gravier concassé 3/8**

Gravier	N° d'essai	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{app(Moy)}$ (kg/l)
3/8	1	2.921	12.561	1.377	1.38
	2	2.921	12.649	1.389	
	3	2.921	12.558	1.376	

Tab.III-13. Masse volumique apparente du gravier concassé 8/16

Graviers	N° d'essai	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{app(Moy)}$ (kg/l)
8/16	1	3.466	16.771	1.330	1.368
	2	3.466	17.350	1.388	
	3	3.466	17.333	1.387	

Tab.III-14. Masse Tableau III.11 Masse volumique apparente du gravier concassé 16/25

Graviers	N° d'essai	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{app} (kg/l)	$\rho_{app(Moy)}$ (kg/l)
16/25	1	7.292	28.217	1.410	1.172
	2	7.292	28.337	1.052	
	3	7.292	28.357	1.053	

c) Porosité, compacité et indice des vides : NF P 18-555[30] :

Le mode opératoire est semblable à celui effectué pour le sable, les résultats sont illustrée aux tableaux III-15-16-17.

On calcule la porosité selon la formule :

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

La compacité donnée par la formule :

$$C = (\rho_a / \rho_{ab}) = 100 - P$$

L'indice des vides est donné par la formule suivante :

$$e = \frac{P}{(100 - P)}$$

Résultats obtenus

Tab.III-15. Porosité, Compacité et Indice des Vides de gravier concassé 3/8

fraction de gravier	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
3/8	43.41	56.59	0.767

Tab.III-16. Porosité, Compacité et Indice des vides de gravier concassé 8/16

fraction de gravier	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
8/16	44.7	55.3	0.808

Tab.III-17. Porosité, Compacité Et Indice des vides de gravier concassé 16/25

fraction de gravier	Porosité (%)	Compacité (%)	l'indice de vide
16/25	59.24	40.76	1.45

d) Analyse granulométrique :

Les résultats obtenus de chaque fraction du gravier, sont regroupés dans les tableaux ci-dessous (Tableau III-18-19-20):

Résultat obtenus

Tab.III-18. Analyse granulométrique du gravier 3/8 concassée.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
8	37,00	37,00	1,23	98,77
6,3	749,40	786,40	26,22	73,78
5	986,40	1772,80	59,10	40,90
4	784,10	2556,90	85,24	14,76
3,15	330,20	2887,10	96,24	3,76
2,5	84,60	2971,70	99,06	0,94
Fond	28,10	2999,80	100,00	0,00

Tab. III-19. Analyse granulométrique du gravier 8/16 concassé

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
16	138,74	138,74	4,32	95,68
12.5	1512,52	1651,26	51,36	48,64
10	1157,80	2809,05	87,38	12,62
8	344,64	3153,69	98,10	1,90
6.3	56,89	3210,58	99,87	0,13
5	1,22	3211,79	99,90	0,10
Fond	3,10	3214,89	100,00	0,00

Tab. III-20. Analyse granulométrique du gravier 16/25 concassé

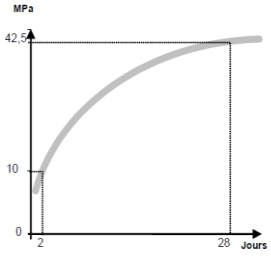
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
25	262,00	262,00	5,21	94,79
22.4	465,00	727,00	14,47	85,53
20	1500,00	2227,00	44,31	55,69
18	1571,00	3798,00	75,57	24,43
16	760,50	4558,50	90,71	9,29
12.5	455,50	5014,00	99,77	0,23
Fond	11,50	5025,50	100,00	0,00

III-1-3- Caractéristiques du ciment CEMI :

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-21. Caractéristiques de CEM I(Fiche technique)

Composition	Standard de conformité
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Clinker $\geq 95\%$ ▪ Constituant secondaire $\leq 5\%$ ▪ 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 séléniteux. ▪ 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 $SO_4 \geq 1500$ mg/l ou dans les sols ayant des teneurs en ions SO_4 Travaux à la mer $\geq 1,2$ %. ▪ 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
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sulfates (SO_3) ▪ Chlorures (Cl) ▪ Perte au feu (P.F.) $\leq 3,0\%$ ▪ Résidu insoluble (R.I.) $\leq 0,1\%$ ▪ Magnésie (MgO) $\leq 3,0\%$ ▪ Souffre à l'état de sulfure S $\leq 0,75\%$ ▪ Alumine (Al_2O_3) $\leq 0,2\%$ ▪ Aluminate tricalcique (C3A) $\leq 8,0\%$ ▪ $C_4AF + 2 C_3A$ $\leq 3\%$ ▪ C_3A $\leq 20\%$ ▪ $C_4AF + 2 C_3A$ $\leq 23,5\%$ ▪ $C_3A + 0,27 C_3S$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 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 (Tableau III-22) satisfait aux exigences de la norme EN 197-1 [33], tels que la perte au feu avec moins de 5%, le trioxyde de soufre SO_3 moins de 3.5% .

Tab.III-22.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	TiO ₂	CL	Perte au Feu
ciment	19,88	4,29	4,98	63,11	1,24	2,48	0,51	0,27	0,22	0,042	3

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 (tableau III-23):

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

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

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

$$*C_4AF = 3.04 \times Fe_2O_3$$

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.

Tab.III-23.Composition minéralogique du ciment CEMI

Indice de Bogue	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CEMI	69,82	4,30	2,95	15,14

c)Indices chimique

Le ciment doit répondre à certains exigences chimique calculé sur la base de l'analyse chimique (Tableau III-24) tels que:

$$* \text{Facteur de saturation en chaux (LSF)} = CaO / (2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3)$$

$$* \text{Module Hydraulique de Michaelis (HM)} = CaO / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)$$

$$* \text{Module Silicique (SM)} = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$$

$$* \text{Indice Hydraulique de Vicat (VHI)} = (SiO_2 + Al_2O_3) / (CaO + MgO)$$

$$* \text{Module Alumino-Ferrique (AFM)} = Al_2O_3 / Fe_2O_3$$

$$*(Na_2O)_{eq} = Na_2O + 0.658 K_2O$$

Le module de silicique ($1.5 < SM < 3.5$), l'indice hydraulique de Vicat ($0.4 < VHI < 0.5$) et le module hydraulique de Michaelis ($1.7 < HM < 2.3$) sont corrects. Les alcalis peuvent réagir avec les granulats et, par conséquent affecter considérablement la durabilité des bétons. L'alcali équivalent devrait être inférieur à 0.6%.

Tab.III-24. Les différent indices chimiques

HM	SM	AFM	IHV	LSF
2,17	2,14	0,86	0,38	0,99

III-1-4- Caractéristique de la vase :

La vase prélevée dans la zone de rejet est convenablement préparée et a subit une transformation chimique 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.

a) Analyse Chimique de la vase brute :

Les teneurs des composants chimiques de la vase sont regroupées dans le tableau III-25. Sa masse volumique absolue est de 2,63 g/cm³, avec une surface spécifique Blaine est de 7000 cm²/g.

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 porte échantillon avec du scotch de carbone double face puis métallisée avant d'être introduite dans la chambre du MEB.

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



Fig.III-2. Pastille d'analyse chimique et son support

Tab.III-25. 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	TiO ₂	CL	perte au feu
la vase	40,28	9,19	3,93	20,55	1,99	0,23	1,17	0,4	0,54	0,052	21,63

La vase est composée d'élément majeur de silice à hauteur de 40% et d'oxyde de calcium avec 20% et d'éléments mineurs comme MgO et SO₃, les chlorures sont à hauteur de 0.052 et une perte au feu de 21,63 indiquant la présence d'humidité et des groupes hydroxydes.

III-1-5-L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisé est une eau potable du laboratoire de département de génie civil.

a)Caractéristique chimique de l'eau utilisée :

La composition chimique de l'eau du laboratoire de département de génie civil est établie en 2015 par le laboratoire de département de chimie (M'sila) (tableau III-26).

Tab.III-26. Caractéristique chimique de l'eau.

La mesure	Teneur en (mg / l)
Degré de température	25.0
PH	7.71
Conductibilité	1745
Chlore Cl^-	236.3
Sulfate SO_4^-	349.6
Magnesium Mg^{2+}	115.3
Sodium Na^+	/
Calcium Ca^{2+}	269.5
Sédiment sec	1403
rééligibilité d'oxydation en eau	1029

III-2-Elaboration des bétons étudiés :

La gestion des déchets est depuis quelques années, l'une des préoccupations des organismes publics. Le recyclage en les intégrant dans des matériaux de construction peut être une solution au problème ce qui a pour conséquence la réduction, voir même la suppression à long terme de la mise en décharge.

Dans la présente étude, on tentera dans un premier temps d'obtenir une pouzzolane artificielle à partir de la boue de dragage du barrage K'sob par l'intermédiaire d'un traitement thermique,[34] La deuxième étape consiste dans l'incorporation de cette argile calcinée à côté du ciment, pour déduire leurs effets sur les bétons.

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

Dans cette étape la remarque essentielle est la diminution de la perte au feu comme indiquer au tableau III-26 qui passe de 21% pour la vase brute à 16 % pour la vase calcinée, ceci est dû au traitement thermique appliqué qui est de l'ordre de 600°C, ainsi qu'un changement de couleur, comme le montre la figure III-3 et figure III-4.

Tab.III-26.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	TiO ₂	CL	perte au feu
Vase calciné	43,22	10,35	4,28	20,92	2,07	0,27	1,31	0,68	0,59	0,050	15,95



Fig.III-3. Boue naturelle



Fig.III-4. Boue traitée.

III-2-2-Les analyse chimique des mélanges pour ciments modifiées (5-10-20)% :

On remarque que le taux de silice et l'alumine augmente ainsi que la perte au feu (Tableau III-27). 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.

Tab.III-27. Les analyses chimique 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	TiO ₂	CL	P a F	Finesse [cm ² /g]
CM5%	21,05	4,59	4,95	61,00	1,28	2,37	0,55	0,29	0,24	0,04	3,65	3604
CM10%	22,21	4,91	4,90	58,87	1,33	2,27	0,59	0,31	0,26	0,05	4,86	3797
CM20%	24,55	5,50	4,84	54,67	1,41	2,04	0,67	0,35	0,29	0,05	5,59	4172

III-3-Confection des bétons :

Dans ce qui suit, les vases calcinées seront substituées au ciment CEMI dans la confection des bétons, en gardant le même rapport E/C.

III-3-1-Composition des bétons selon la méthode « Dreux-Gorisse »

Cette méthode est choisie pour sa souplesse lors d'un travail au laboratoire avec une certaine rigueur dans les mesures (Figure III-5).

a) Détermination de la résistance moyenne à viser :

$$f_c = f_{c28} + 15\%$$

$$f_c = 25 + (0.15) \times 25 = 28.75 \text{ MPa}$$

b) Détermination du rapport C/E

$$f_c = GF_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

$G = 0,5$ (Les granulats sont de bonne qualité et $25 \leq D \leq 40 \text{ mm}$) [tableau1]

$$34.5 = 0,5 \times 48 \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \Rightarrow \frac{C}{E} = 1.6979 \quad \Longrightarrow \quad \boxed{\frac{C}{E} \approx 1.7}$$

c) Détermination du dosage en ciment

D'après l'abaque de la figure I, on trouve pour $C/E = 1,7$ et $A_f = 7cm$, un dosage un ciment $\boxed{C = 350Kg/m^3}$

d) Détermination du dosage en eau

On : $\frac{C}{E} = 1,7$, $C = 350kg/m^3$

Donc : $\boxed{E = 205.88kg/m^3}$

e) Traçage de la courbe granulométrique de référence

➤ En abscisse

$D > 20$ mm (Pour notre cas $D = 31,5$), l'abscisse X_a est situé au milieu du segment limité par le module 38 (5 mm) et le module correspondant à D.

$$\boxed{X_a = 12.5}$$

➤ En ordonnée

$$y_a = 50 - \sqrt{25} + k$$

D'après le tableau 2(vibration normale, gravier concassé, sable roulé), on obtient : $k = -2$

$$\boxed{y_a = 50 - \sqrt{31.5} - 2 = 42,38}$$

*Observation :

Le terme correcteur (k) n'a pas à intervenir dans ce cas, puisqu'il s'agit de sable un peu trop fin ($1.8 < M_f < 2$) et d'un béton normalement dosé et vibré (vibration normale).

f) Détermination des pourcentages des granulats

D'après la courbe granulométrique. On trouve les pourcentages des granulats suivants :

- Sable 0/5 = 30%
- Gravier 3/8 = 8.5%
- Gravier 8/15 = 15.5 %
- Gravier 15/25 = 46%

g) Détermination du coefficient de compacité \mathcal{V}

Avec un béton plastique, la vibration normale et dimension maximale de granulats

$$D_{\max} = 31.5mm. \quad \rightarrow \quad \boxed{\mathcal{V} = 0,830}$$

Terme correctif en fonction de l'angularité des granulats (sable roulé et gravier concassé) :
Alors $\mathcal{V} = 0,820$

- Le volume absolu total : $1000 \times 0.820 = 820 \text{ l}$
- Le volume du ciment : $350 / 3.1 = 112.90 \text{ l}$
- Le volume des granulats : $820 - 112.90 = 707.1 \text{ l}$

h) Détermination des quantités nécessaires en ciment, en eau, en sable et gravillon (secs) pour réaliser 1 m^3 de béton.

- Le sable : $707.1 \times 0.30 \times 2.58 = 547.295 \text{ kg/m}^3$
- Gravier 3/8: $707.1 \times 0.085 \times 2.44 = 146.65 \text{ kg/m}^3$
- Gravier 8/15: $707.1 \times 0.155 \times 2.47 = 270.71 \text{ kg/m}^3$
- Gravier 15/25: $707.1 \times 0.46 \times 2.49 = 809.91 \text{ kg/m}^3$
- Ciment: 350 kg/m^3
- Eau: $E = 205.88 \text{ kg/m}^3$

i) Densité théorique :

$$\Delta_0 = 2337.92 \text{ kg/m}^3$$

Ce béton est un béton ordinaire avec une masse volumique entre 2200 kg/m^3 et 2400 kg/m^3 .

j-Détermination des quantités des divers matériaux (+15% de pertes) pour la fabrication de 9 éprouvettes cylindriques 16×32 , 9 éprouvettes prismatiques $07 \times 07 \times 28 \text{ cm}$ et 9 éprouvettes cubiques $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$

Volume totale :

$$V_T = 0.03353316 \text{ m}^3$$

$$V_T + 15\% = 0.18353316 \text{ m}^3$$

Les quantités

- Le sable : **63.32 kg**
- Gravier 3/8: **16.97 kg**
- Gravier 8/16: **31.32 kg**
- Gravier 16/25: **93.70 kg**
- Ciment: **40.50 kg**
- Eau: **23.82 kg** (vérifier l'affaissement **7 cm**)

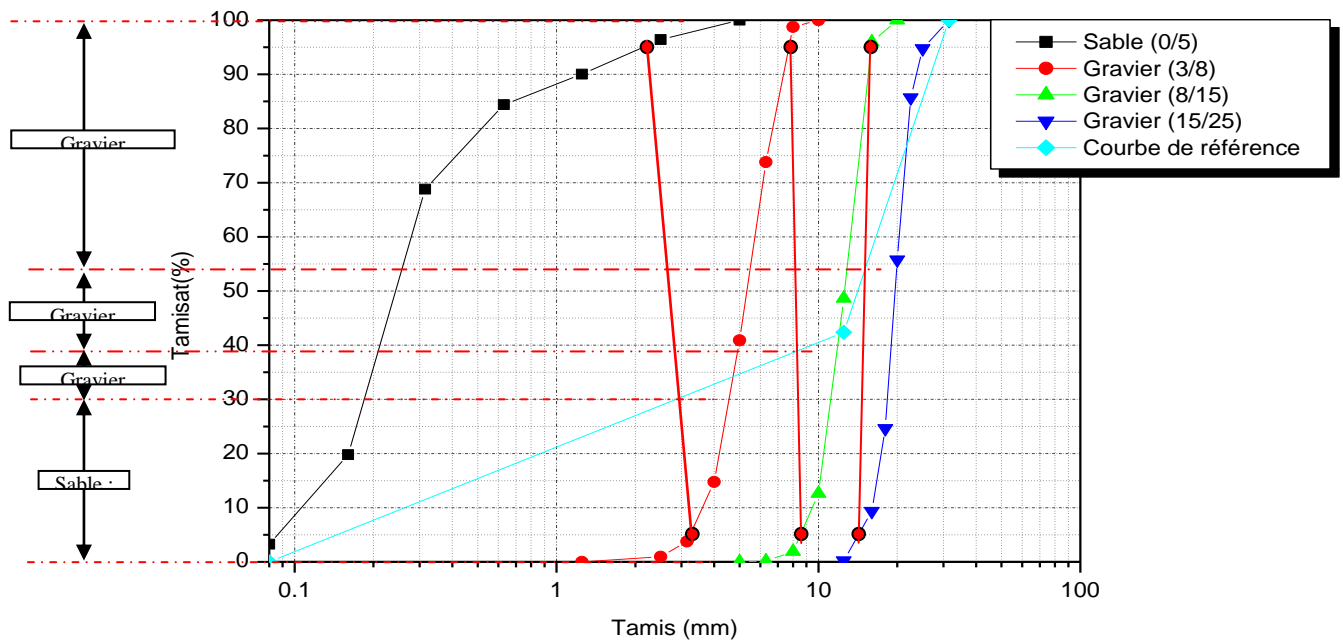


Fig.III-5. La courbe granulométrique des différents fractions

III-3-2-Les essais sur le béton à l'état frais :

Au contact de l'eau, les silicates se dissolvent sous forme d'ions. Ceux-ci interagissent alors entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite (Ca(OH)₂). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C₂S, la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de portlandite formée est plus faible.

III-3-2-1-Affaissement au cône d'Abrams (NF P18 451) [35]

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre, il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40mm, il est réalisé par ordre suivant (Figure III-6):

- *Introduire le béton dans le moule légèrement humidifié et huilé en trois couches d'égales.
- *Piquer chaque couche 25 coups avec une tige de $\Phi = 16\text{mm}$.
- *Araser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur de moule.
- *Démouler le cône et mesurer l'affaissement à l'aide d'un portique et arrondi au centimètre

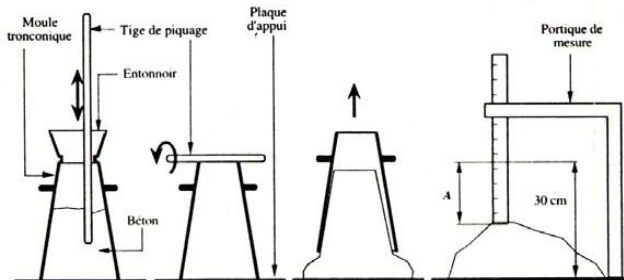


Fig.III-6. L'essai au cône d'Abrams

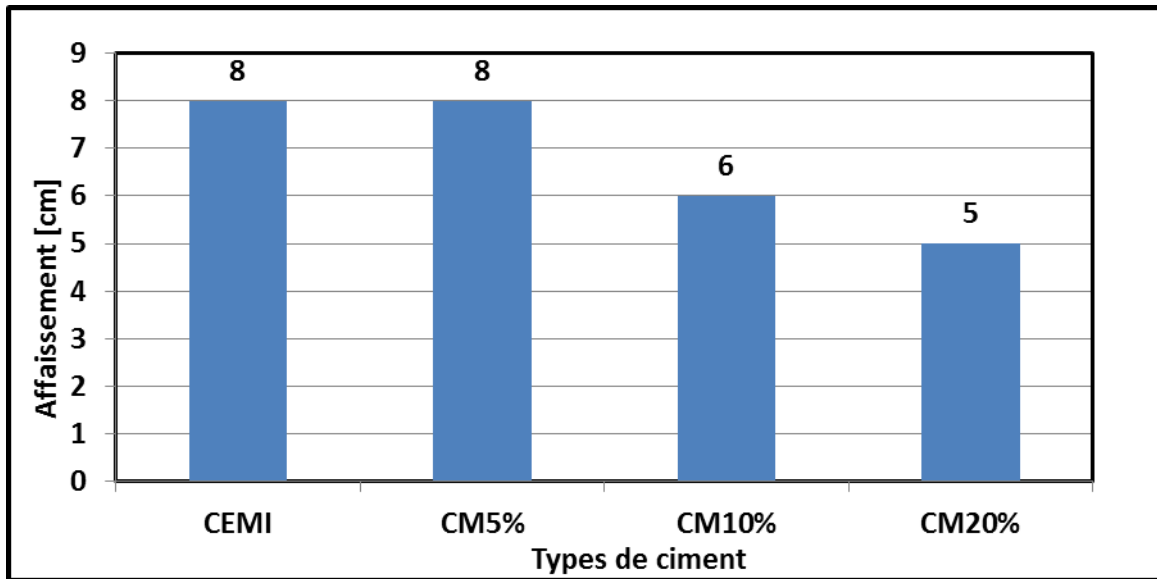


Fig.III-7. Affaissement des différents bétons

On remarque que l'affaissement des bétons confectionnés diminue avec l'augmentation du pourcentage de vase calcinée introduites (figure III-7). Cette diminution est visible dans les bétons élaborés avec du CM10% et CM20% à hauteur de 6 et 5cm, ceci est due au pouvoir d'absorption de la vase calcinée, qui demande elle aussi une certaine quantité d'eau destiné à l'hydratation du liant.

III-3-3-Essai sur béton durci :

Lorsque la concentration en ions Ca^{+2} et OH^- de la solution devient critique, elle induit la précipitation de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (ettringite, portlandite, C-S-H). La consommation brutale d'ions OH^- par la formation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ accélère la dissolution de tous les constituants du clinker. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer permettant alors la création d'un solide rigide.

a)Essai de la résistance à la compression : NF P 18- 406 [36]

Cet essai a été effectué sur une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et cela conformément à la norme décrite ci-dessus (figure III-8-9).

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 carrée.



Fig.III-8.Eprouvette cubique



Fig.III-9.La machine de compression

On remarque (figure III-10) que la forme des courbes est identique avec une préférence au ciment modifié. A court terme (7 jours) la résistance à la compression des bétons à base de ciments modifiés est plus conséquente qu'un béton à CEMI, elle est à hauteur de 14 Mpa pour un CM20% jusqu'à 24Mpa pour un CM5% qui est la plus grande valeur, ceci est dû au pouvoir filler des ajouts qui augmente la compacité du mélange. A long terme (28jours) les résistances à la compression des bétons à ciments modifiés (CM5% et CM10%) sont plus grandes qu'un béton à CEMI, au contraire le béton à CM20% la résistance est en premier lieu au-dessous de la résistance visée par la méthode Dreux-Gorisse (25Mpa) et deuxièmement elle est au-dessous des autres bétons ceci est dû au manque d'eau pour l'hydratation de ce type de ciment, car rappelons-le que le rapport E/C est fixe et est égale à 0.6.

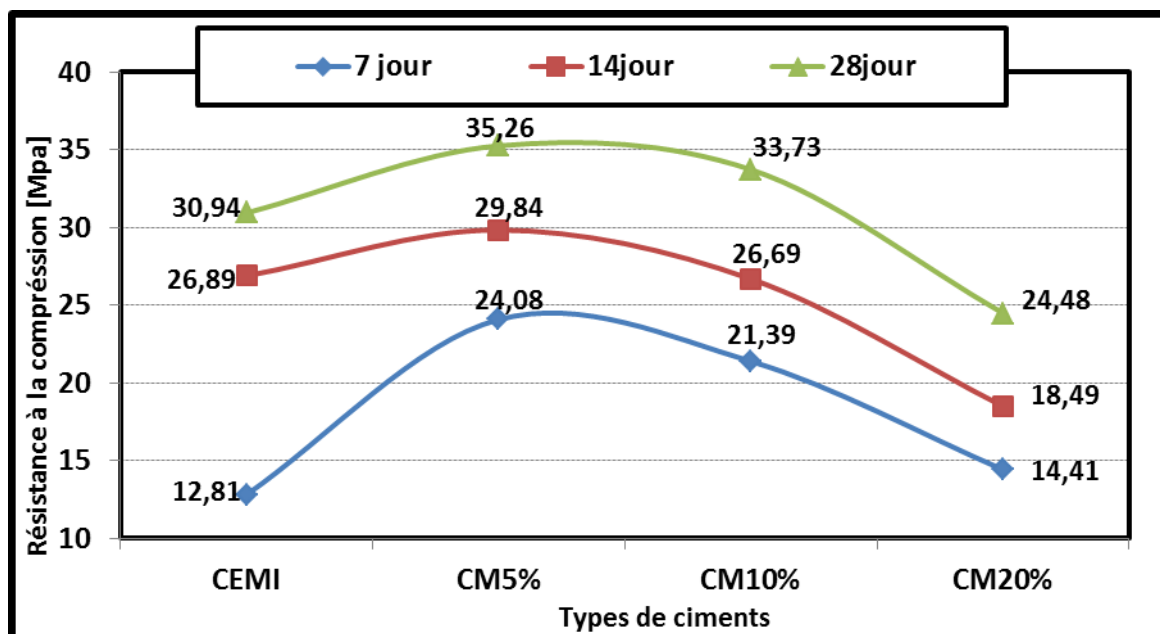


Fig.III-10.Résistance à la compression

b) Essai de résistance à la traction par écrasement latéral (Brésilien) NF P18 – 408 [37]

L'essai brésilien détermine la résistance à la traction par écrasement latéral des échantillons de béton (figure III-11-12). Cet essai a été effectué sur les tous les bétons conventionnels, et ce pour la même raison décrite précédemment. Trois cylindres par échéance et par mélange ont été utilisés pour évaluer les différents mélanges. Les cylindres sont de dimension (16 x 32) cm², la relation suivante permet de calculer la résistance :

$$(2P)/(\pi dh)$$



Fig.III-11.Eprouvette cylindrique



Fig.III-12.Echelle de lecture

Dans cet essai on constate que la résistance à long terme des bétons à base de CM5% et 10% sont plus distinct que un béton à CEMI, ceci est dû à la réaction pouzzolanique qui tente de remplir les vides entre les granulats ainsi l'amélioration des pores inter granulaires par un approvisionnement des CSH de la réaction pouzzolanique (Figure III-13).

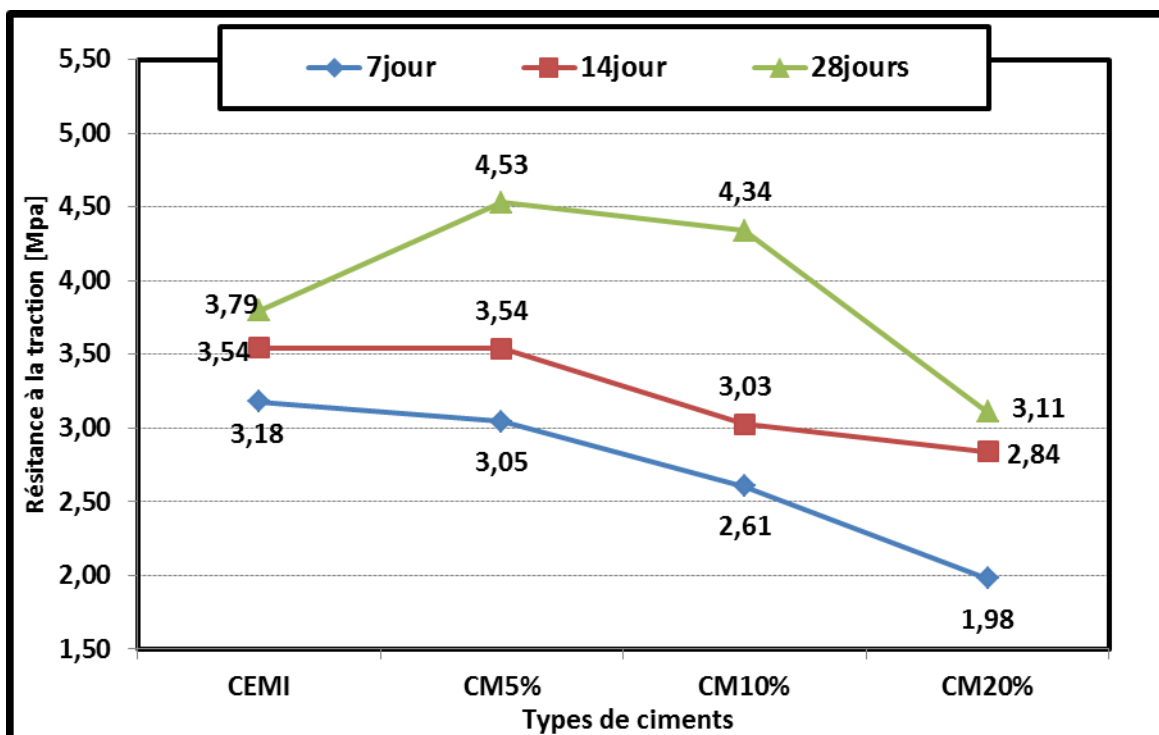


Fig.III-13.Résistance à la traction

c) Essai de la Traction par flexion NF P 18-407 [38]

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7 x 7 x 28 cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée (figure III-14).

Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes, munie d'un banc de flexion à 3 points pour une charge totale P, le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est : $M = P \times a / 2$ et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est $f_{tj} = 6M / a^3$, la relation suivante permet de calculer la résistance :

$$f_{tj} = 1.8P/a^2$$



Fig.III-14. Machine d'essai de traction par flexion

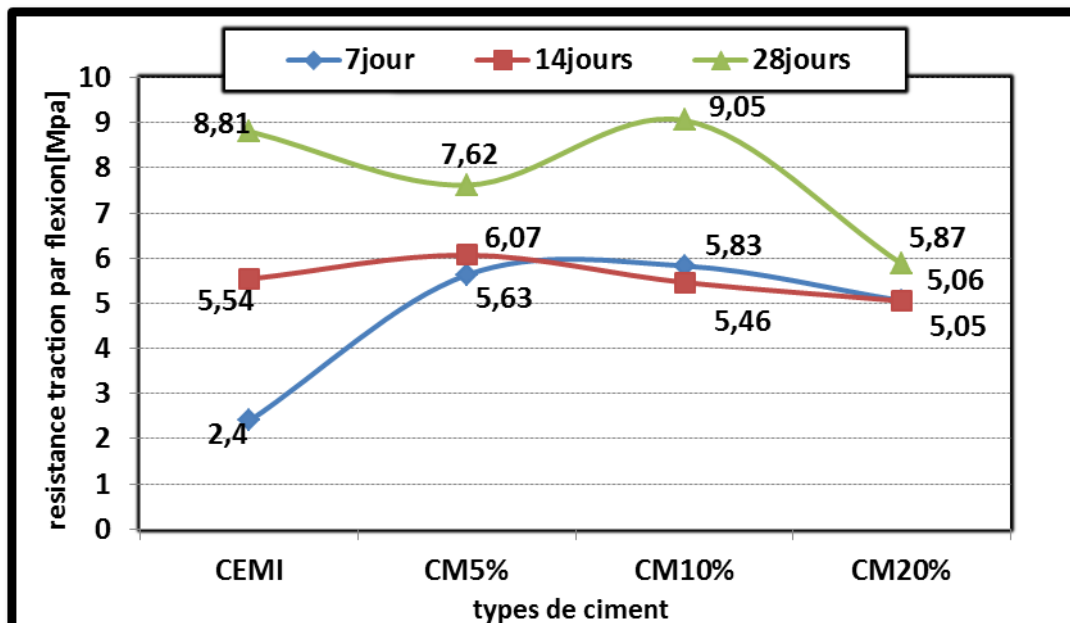


Fig.III-15. Résistance à la traction par flexion

Pour les bétons de toutes sortes, la résistance à la traction (figure III-15) est une résistance secondaire, car dans les sections sollicitées, les efforts dans les structures seront

repris par un ferrailage adéquat.

d) Mesures thermique

L'analyse thermique différentielle (ATD) est une technique mesurant la différence de température entre un échantillon et une référence (matériau inerte thermiquement) en fonction du temps ou de la température, lorsqu'ils sont soumis à une programmation de température, sous atmosphère contrôlée. Avec la méthode ATD, toute transformation est détectable pour toutes les catégories de matériaux.

La thermogravimétrie est une technique mesurant la variation de masse d'un échantillon lorsqu'il est soumis à une programmation de température, sous atmosphère contrôlée. Cette variation peut être une perte de masse (émission de vapeur) ou un gain de masse (fixation de gaz, oxydation...).

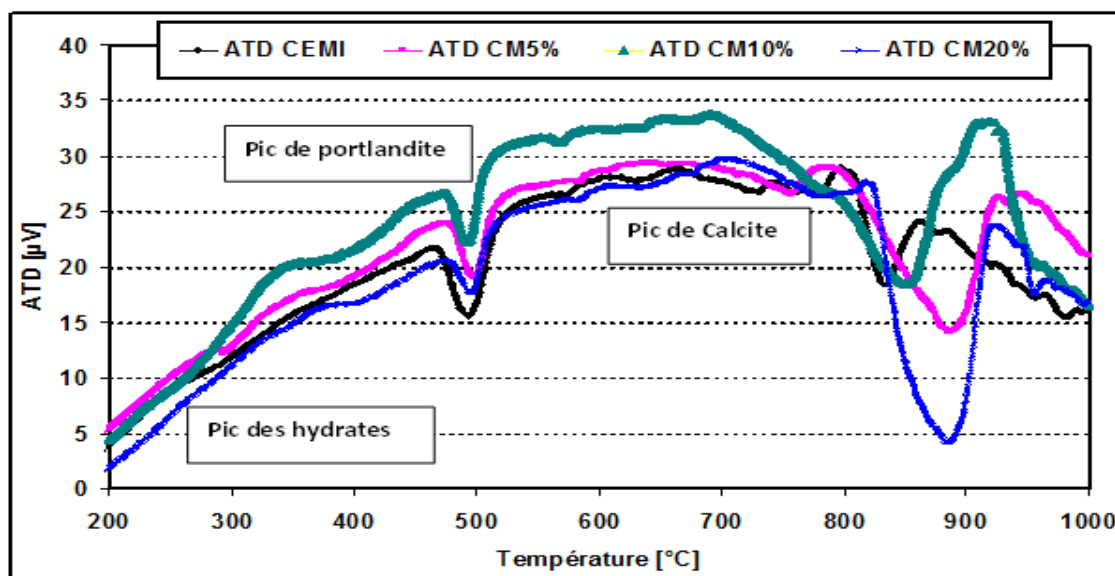


Figure III-16. Courbe d'analyse thermique différentielle des différents bétons à 14 jours

*Détermination de la quantité d'eau non-évaporable ENE :

D'après l'analyse thermique différentielle (ATD) on remarque l'existence de différents pics : le pic d'hydrates situé au-dessous de 200°C, le pic spécifique de la portlandite entre 400°C et 600°C, ainsi que le pic spécifique de la silice entre 570°C et 575°C.

Au-dessous de 200°C le chevauchement des pics d'hydrates (ettringite, gel CSH) rend leurs distinctions très difficiles.

Après chaque essai de destruction et la connaissance de la résistance à la compression on a procédé au prélèvement d'un échantillon et l'analyse thermogravimétrique est établie. L'eau présente dans le ciment est classée comme eau non évaporable et évaporable. Le premier type représente l'eau liée chimiquement à la formation des hydrates et l'eau adsorbée ou l'eau inter-feuillet des CSH. Le départ de cette eau nécessite le maintien à haute température des produits cimentaires. Le deuxième type (évaporable) comprend l'eau dans les pores et l'eau dans les capillaires qui gèle à des températures plus basses mais, aussi l'eau adsorbée sur la surface externe des hydrates.

Pour déterminer cette eau non-évaporable, on a appliqué la formule 5 [39].

$$ENE [\%] = \frac{W_{105^{\circ}C} - W_{45^{\circ}C}}{W_{45^{\circ}C}} \times 100$$

Dans la figure (figure III-17) ci-dessous en remarque d'une part que l'eau non évaporable du béton à CEMI est supérieure aux autres bétons, d'un autre côté l'eau non-évaporable des bétons à ciment modifié est proportionnelle à l'augmentation de la quantité d'ajout suite à la réaction pouzzolanique, mais sans oublier la grande chaleur d'hydratation dû à la finesse des ciments.

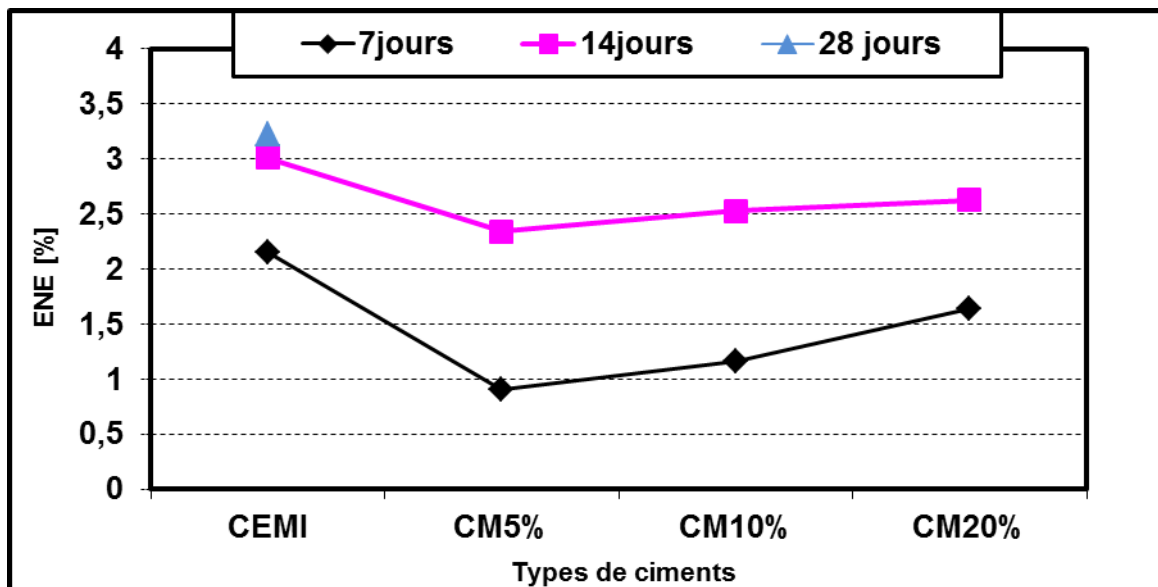


Figure III-17. Eau non-évaporable des différents échantillons

*Détermination de la quantité de portlandite produite

En utilisant le test thermogravimétrique, les échantillons de béton utilisés lors de l'essai de résistance sont broyés afin de déterminer la portlandite produite. Elle est exprimée par la formule suivante [34].

$$Ca(OH)_2 [\%] = \frac{\frac{74Dm_1}{18} + \frac{74Dm_2}{44}}{M_e + Dm} \text{ [gramme de portlandite par gramme de ciment]}$$

Dm_1 : Perte de masse de la Portlandite.

Dm_2 : Perte de masse de la Calcite.

Dm : Perte de masse globale entre 20°C et 1000°C.

M_e : Masse de l'échantillon.

44: Masse molaire de CO_2 [g]

18: Masse molaire de H_2O [g]

74: Masse molaire de $Ca(OH)_2$ [g]

La figure III-18, illustre le contenu de portlandite produite par les ciments en fonction du temps de durcissement. On remarque que la teneur en portlandite produite par les ciments

modifiés augmente au fur et à mesure de l'augmentation des proportions d'ajout, ce qui reflète le caractère pouzzolanique.

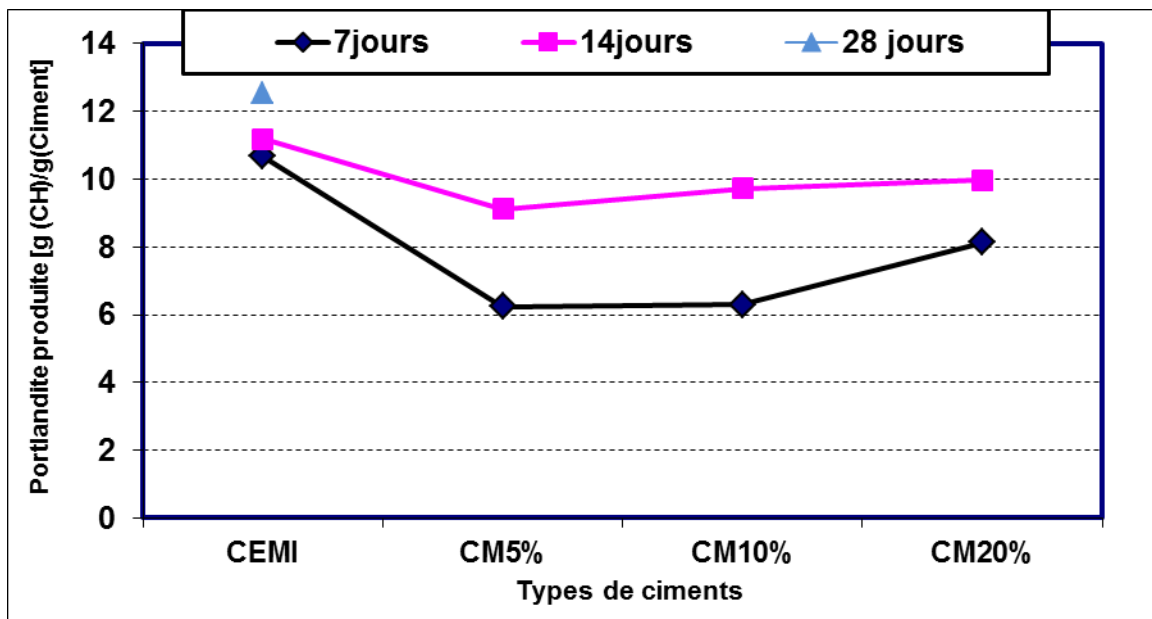


Figure III-18. La portlandite produite à différentes échéance

Conclusion générale

Conclusion général

Suite au programme d'investissement de l'état algérien, une grande quantité de ciments doit être injecté dans le domaine. 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 serte présente dans la nature mais ils sont non-renouvelables à petit ou moyen terme.

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 et selon la dernière étude est ensavé de 60% ce qui réduit énormément sa capacité de stockage. Selon des études antérieures 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 cette recherche nous avons travaillé sur des mélanges de ciment et de vase calciné (pouzzolane artificiel) avec différents pourcentage de substitution à hauteur de 5-10 et 20% dans le béton ordinaire.

Après une identification expérimentale des différents pourcentages de béton on a 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 chimique à l'intérieur.

*la finesse des ciments modifiés augmente à cause de la finesse de la vase traitée qui est de l'ordre de $7000 \text{ cm}^2/\text{g}$.

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

*l'affaissement déduit par le cône d'Abrams diminue avec chaque augmentation de la substitution car la l'ajout demande plus d'eau pour s'hydrater.

*A 7 jours les résistances des bétons avec ciment modifiés sont supérieures au béton avec CEMI grâce à l'effet filler.

*Les résistances à la compression des différents bétons à 28 jours sont acceptables sauf le cas du CM20% avec une résistance inférieure à celle visée (24Mpa)

*Les bétons confectionnés avec les ciments modifiés CM5% et CM10% enregistrent une résistance à la compression supérieure au CEMI à tout âge avec une légère préférence au CM5%.

*L'eau non-évaporable est influencée par l'ajout des vase calcinée au ciment pour la fabrication des bétons, serte en à trouver une réduction lors de l'incorporation des ajouts mais il faut pas oublier l'empreinte de la chaleur d'hydratation qui tente de réduire cette eau.

Conclusion générale

*La portlandite produite par les bétons à ciment modifié est inférieure au béton à ciment CEMI résultat d'une réaction pouzzolanique qui tente de réduire la portlandite pour alimenter le béton par des silicates de calciums hydratés.

Après ces constatations ce genre de béton peut être utilisé dans des structures à sollicitations modérées et amélioré à travers l'augmentation de la finesse des ajouts ou l'augmentation du rapport E/C.

Référence :

- [1]. CHIHAOUI Ramdane : Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2008).
- [2]. J. P Olivier : livre de " Durabilité des bétons ." (A.NONAT :chapitre2 ; V. BAROGHEL-BOUNY, B. CAPRA, S. LAURENS : chapitre9 ; A. CARLES-GIBERGUES, H.HORNAIN :chapitre11 ; G. ESCADEILLAS, H. HORNAIN: chapitre 12) .(Edition :Presse de l'école nationales des ponts et chaussées -2008).
- [3]. Libra- J. BROCARD, « Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment », Tome I, irie Aristide Quillet, 1972, P 813,815.
- [4]. J. BARON, JP. OLLIVIER et J C. WEISS, « Les bétons, bases et données pour leur formulation », Edition Eyrolles,Troisième tirage, 1999, P 3-12.
- [5]. C. KIRPACH, Ciments Luxembourgeois, Séminaire- Béton2001: Journée d'information technique, 23 novembre 2001, P 7-21.
- [6]. Françoise Choay, L'urbanisme, utopies et réalités : Une anthologie, Paris, Éditions du Seuil, 1979. 104p.
- [7]. Barjot, Dominique et Marie-Pierre : Histoire économique de la France au XIXe siècle. Paris, Nathan, 1995. 352 p.
- [8]. Cyrille Simonnet : « Le béton armé : origine, invention, esthétique».Thèse de doctorat Paris, EHESS, 1994.
- [9]. Dennis Sharp : Histoire visuelle de l'architecture du xxe siècle, Mardaga, Liège, 1972.
- [10]. G. H. Tattersall : The rheology of fresh concrete. pitman books limited, 1983.
- [11] Dreux. G : Nouveau guide du béton. Edition Eyrolles, Paris 1979, 201p.
- [12] J.P. GAGNON, « 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 appliquée, université de Sherbrooke, mai 1996, P 9-12.
- [13] Gallé C. **Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry : A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. Cem Concr Res 2001 ;31 :1467-1477.**
- [14] M. Justice Joy « **Evaluation of metakaolins for use as supplementary cementitious materials** », Thèse pour l'obtention de M. Sc., **Giorgia institute of technology, 2005, p103**
- [15] Baron .J et Sauterey . R : Le béton hydraulique Connaissances et Pratique, Presses,1982.
- [16] Dreux.G. : Nouveaux guide du béton, Ed. Eyrolle, 1979, 121p.
- [17]. Zurich., (1978) Liant minéraux. SociétéSuisse des Ingénieurs et Architect. Norme SIA 215.
- [18].V.M. Malhotra, (1987) Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton. Publié par le centre canadien de la technologie et de l'énergie, Ottawa, Canada
- [19].M.ChicouheH, (2008) Influence de l'ajout pouzzolnique(argile cuite) sur les caractéristique physico-chimiques des ciments.Université de Mohamed Boudiaf Msila
- [20].D. Viehland ., (1996),Mesostructure of calcium silicate hydrate(CSH) gels in Portland cementpaste: Shortrangeordering, Nanocrystallinity, and Local CompositionalOrder". J. Am. Ceram. Soc. 79: p. 1731-1744.
- [21].F. Norman , Macleod., (2005) Synthèse des données sur l'emploi"ajouts cimentaires dans le revêtement de chaussée en béton exposés aux cycles de gel dégel et au produits chimiques de déglacage "Cément association of canada", ing. P 10-12.
- [22]. Dreux G., (1979) Nouveau guide du béton », Edition Eyrolles ,2ème edition. P 17.
- [23.]A. Younsi « Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales », Thèse pour l'obtention du grade de Docteur, Université de La Rochelle, 2011, p 22, 42.

- [24].D. Benamara . « Vers un béton de haute performance élaboré de matériaux locaux « BHP » », Courrier du savoir N° 10, 2010, pp. 09-14
- [25]. N.S.SORO, « Influence des ions fer sur les transformations thermiques de la kaolinite », thèse pour l'obtention d'un grade de docteur, spécialité sciences des matériaux céramiques et traitements de surfaces, université de Limoges, 2003, P 16-19,34
- [26]-G.LUCAS, P.CROS, J.LANG, « Les roches sédimentaires, étude microscopique des roches meubles et consolidées », Tome 2, édition DOIN, 1976, P 38
- [27].U.CHINJE MELO, N.BILLONG, «Activité pouzzolanique des déchets de briques et tuiles cuites», African Journal of Science and Technology (AJST), Science and engineering Séries Vol.5, N°1, June 2004, P 92-100.
- [28] Venuat M., (1976) La pratique des ciments et des bétons, Edition du Moniteur, Paris, p. 75-224
- [29] A.Semcha,B.Mekerta,H.Maaroufe,M.Abbou<< utilisation des propriétés pouzzolaniques des sédimentaires du barrage pour leur valorisation>>,12SM ?Montreal,2016,Canada.
- [30]. NF P18-555 « Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables », 1990
- [31]. NF P18-598 « Granulats - Équivalent de sable »1991.
- [32.]NF P 18-560 « Granulats - Équivalent de sable »1990.
- [1] [33] NF EN 197-1: Ciment: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. Part 1; 2012.
- [34].M. A. Chikouche, E. Ghorbel, M. Bibi « 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.
- [35]. NF P 18-451 « Bétons - Essai d'affaissement »1981.
- [36]. NF P 18-406 « Bétons - Essai de compression »1981.
- [37]. NF P 18-408 « Bétons – Essais traction par fendage »1981.
- [38] .NF P 18-407 « Bétons – Essais de traction par flexion »1981.
- [39].S. Boualleg, M. Bencheikh,L. Belagraa, A. Daoudi, M. A. Chikouche « The combined effect of the initial cure and the type of cement on the natural carbonation, the Portlandite content, and nonevaporable water in blended cement », Advances in Materials Science and Engineering Volume 2017, <https://doi.org/10.1155/2017/5634713>.