

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE IBN KHALDOON DE TIARET



FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

Présenté par :

KHORCHEF RANIA

MEHDI YASMINE

Sujet du mémoire

**Incorporation d'une argile calcinée dans un béton
ordinaire**

Soutenu devant le jury composé de: 13/06/2024

Dr. RENNAK ZohraPrésident
Dr. DRAOUI AichaEncadreur
Dr. SERBAH BoumedieneExaminateur
Dr. BEKKI HadjExaminateur
Dr. KHARROUBI LamiaExaminat

Promotion 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le toute puissant et miséricordieux, qui nous donné la force et la puissance d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu nous voudrions présenter nos remerciements à notre encadreur

Mme « DRAOUI Aicha ».

Nous voudrions également lui témoigner nos gratitudees pour sa patience et son soutien qui ont été précieux afin de mener notre travail à bon port.

Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche acceptons d'examiner notre travail et de

l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A celui qui s'est changé la nuit en jour pour m'assurer les bonnes conditions,
mon cher père

« Nedjadi »

A la plus perle du monde, qui m'a donné l'amour, la patience, et le soutien et le
courage...ma tendre mère « Alia ».

A mon cher frère : Ahmed.

A mes chères sœurs : Kheira et Mebarka.

A toute ma famille.

Et à tous mes amis et mes collègues.

Pour leur amour et soutien inconditionnel.

Leur patience et encouragements.

Yasmine

Dédicace

Celui qui a dit que j'étais elle "l'a compris".

Le voyage n'a pas été court et n'aurait pas dû l'être.

Le rêve n'était pas proche et la route n'était pas encombrée d'installations, mais je l'ai fait et je l'ai eu.

Remerciez Dieu pour l'amour, les remerciements et la gratitude, grâce auxquels aujourd'hui je regarde un rêve tant attendu qui est devenu une réalité dont je suis fier.

À mes anges purs, ma force après Dieu, mon premier et éternel soutien "grand-mère et ma mère" Je vous dédie cette réalisation qui, sans vos sacrifices, n'aurait pas existé, je suis reconnaissante que Dieu vous ait choisie pour moi parmi les êtres humains en tant que mère et grand-mère du meilleur soutien et compensation.

À ceux qui m'ont infiniment soutenu et m'ont donné gratuitement un "grand-père".

A ceux qui ont dit: "Nous vous fortifierons avec votre frère.

" À mes mains et à mes épaules inflexibles" mes frères."

Je tiens à remercier mes amis pour leur présence et leurs encouragements, en particulier la "bibliothèque Ibn Khaldun".

À mes professeurs pour leur précieux enseignement et leurs sages conseils.

Ce travail est pour vos efforts conjoints, et je vous en suis profondément reconnaissant.

Rania

Résumé

Une bonne résistance à la compression est la performance le plus souvent recherchée pour un béton durci. Afin d'améliorer les propriétés mécaniques, particulièrement la résistance à la compression, l'utilisation de quelques pouzzolanes a été rapportée par plusieurs chercheurs, par l'addition de quelques matériaux pouzzolaniques (fumée de silice, pouzzolane ou cendres volantes, argile calcinée...etc.) au ciment, plusieurs propriétés du béton peuvent être améliorés à savoir les propriétés mécaniques. La présente étude a pour but d'évaluer expérimentalement l'influence de la substitution d'une partie de ciment par argile calcinée dans le béton sur les propriétés mécaniques (la résistance à la traction par flexion et la résistance de compression). D'autre part leurs utilisations ont pour objectifs de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement. Cette étude expérimentale consiste à préparer un béton, en remplaçant un certain pourcentage de ciment (5%, 10%, 15% et 20%) par l'ajout d'une argile calcinée sous un température de 850C°.

Mots clés : béton, ciment, argile calcinée, la résistance de traction par flexion, la résistance de compression.

Abstract

Good compressive strength is the most sought-after performance for hardened concrete. In order to improve the mechanical properties, especially the compressive strength, the use of some pozzolan has been reported by several researchers, by the addition of some pozzolan materials (silica, pozzolan, calcined clay, etc.) to cement, several properties of concrete can be improved namely mechanical properties. The present study aims to evaluate experimentally the influence of the substitution of a part of cement by calcined clay in concrete on mechanical properties (bending tensile strength and compressive strength). On the other hand, their uses aim to reduce clinker consumption, contributing in a simple and economical way to solve environmental problems. This experimental study consists in preparing a concrete, replacing a certain percentage of cement (5%, 10%, 15% and 20%) by the addition of calcined clay under a temperature of 850C°.

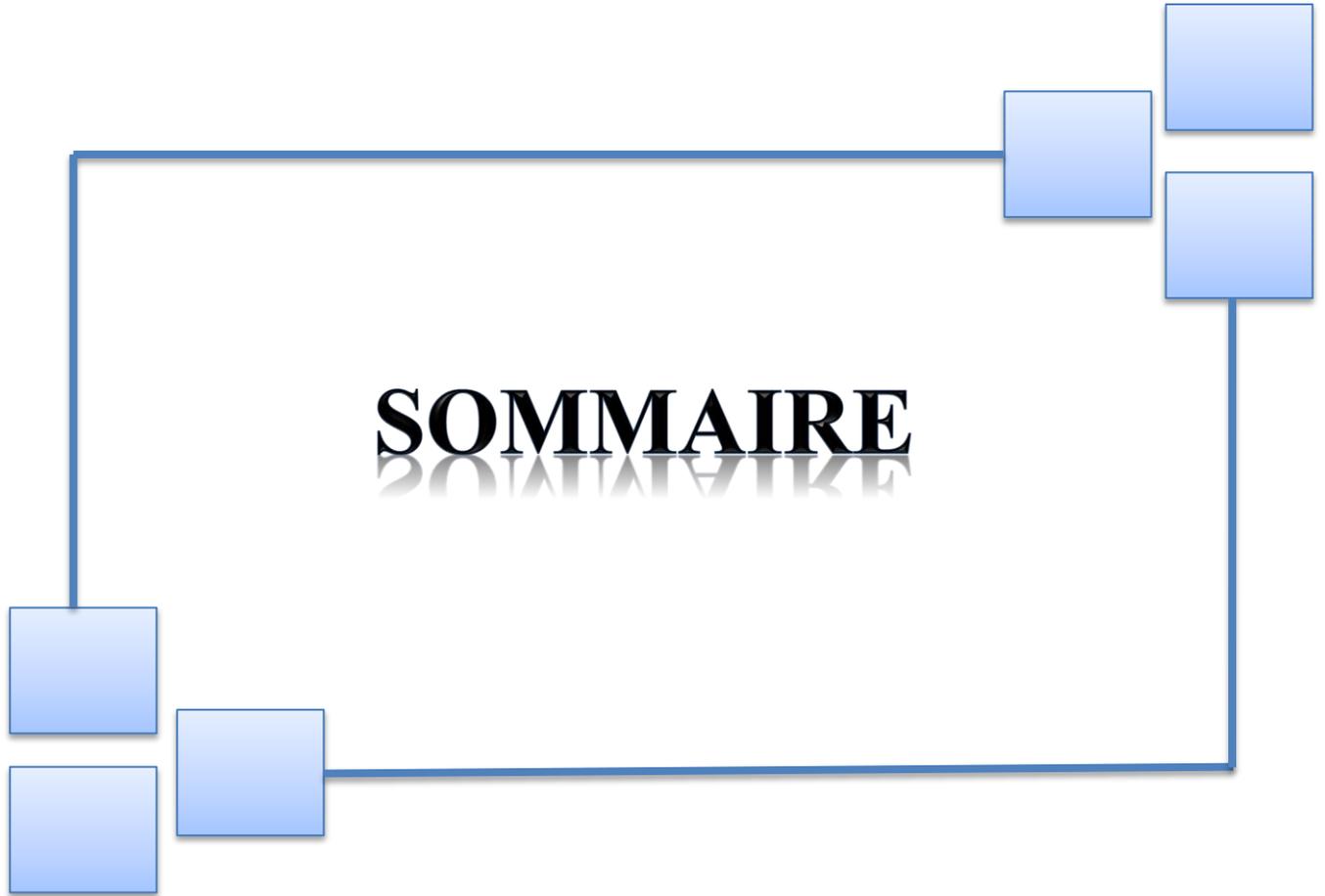
Keywords: concrete, cement, calcined clay, bending tensile strength, compressive strength.

المخلص

قوة الضغط الجيدة هي الأداء المطلوب في أغلب الأحيان للخرسانة المتصلبة. من أجل تحسين الخواص الميكانيكية، وخاصة مقاومة الضغط، تم اللجوء الى استخدام بعض البوزولان من قبل العديد من الباحثين، وذلك عن طريق إضافة بعض المواد البوزولانية (دخان السيليكا، البوزولان أو الرماد المتطاير، الطين المكلس، وغيرها) مع الإسمنت، ومن خلالها يمكن تحسين العديد من خصائص الخرسانة، وأبرزها الخواص الميكانيكية. الهدف من هذه الدراسة هو التقييم التجريبي لتأثير استبدال جزء من الإسمنت بالطين المكلس في الخرسانة على الخواص الميكانيكية (قوة الشد الانحناء وقوة الضغط). ومن ناحية أخرى، تهدف استخداماتها إلى تقليل استهلاك الكلنكر، مما يساهم بطريقة بسيطة واقتصادية في حل المشكلات المرتبطة بالبيئة. تتمثل هذه الدراسة التجريبية في تحضير الخرسانة، وذلك باستبدال نسبة معينة من الإسمنت (5%، 10%، 15%، 20%) بإضافة الطين المكلس عند درجة حرارة 850 مئوية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، الإسمنت، الطين المكلس، قوة شد الانحناء، قوة الضغط.

SOMMAIRE



Sommaire

Remerciement.....	iii
Dédicace	iv
Résumé	vi
Liste des tableaux	xii
Liste des figures.....	xii
Introduction générale	01

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE BETON

I.1.Introduction	03
I.2.Historique	03
I.3.Définition du béton.....	03
I.4. Domaines d'Application Du Béton	04
I.5.Les Avantages et les Inconvénients de l'Emploi du Béton.....	04
I.6.Sélection les éléments pour bétons.....	04
I.7.L'eau de gâchage.....	13
I.8.Propriétés du béton:	13
I.10.Classification du béton	15
I.11.Les adjuvants.....	17
I.12.Comportement mécanique.....	18
I.13. Comportement chimique	19
I.14. Conclusion.....	19

CHAPITRE II : ARGILE CALCINÉE

II.1 Introduction.....	21
II.2 Définition	21
II.3 Domaines d'utilisation des argiles	22
II.4 Propriétés des argiles	22
II.5 Les grandes familles de minéraux argileux	23
II.6 Classification des argiles	23
II.7 Différents types d'argile	23
II.8 Les argiles calcinées comme ajouts cimentaires.....	27
II.9 Objectifs de la calcination de l'argile	32
II.10 Domaine d'utilisation	32
II.11 Rôle de l'argile calcinée.....	34
II.12 La réaction pouzzolanique	34

II.13 Conclusion	37
CHAPITRE III : METHODES EXPERIMENTALE	
III.1.Introduction.....	39
III.2.Caractéristique des matériaux.....	39
III.3.Formulation de béton.....	57
III.4 Conclusion.....	67
CHAPITRE IV : RESULTATS INTERPRETATION	
IV.1 Introduction	69
IV.2 Résultats	69
IV.3 Conclusion.....	73
CONCLUSION GENERALE.....	75
REFERENCE BIOGRAPHIQUE.....	77
ANNEXES	82

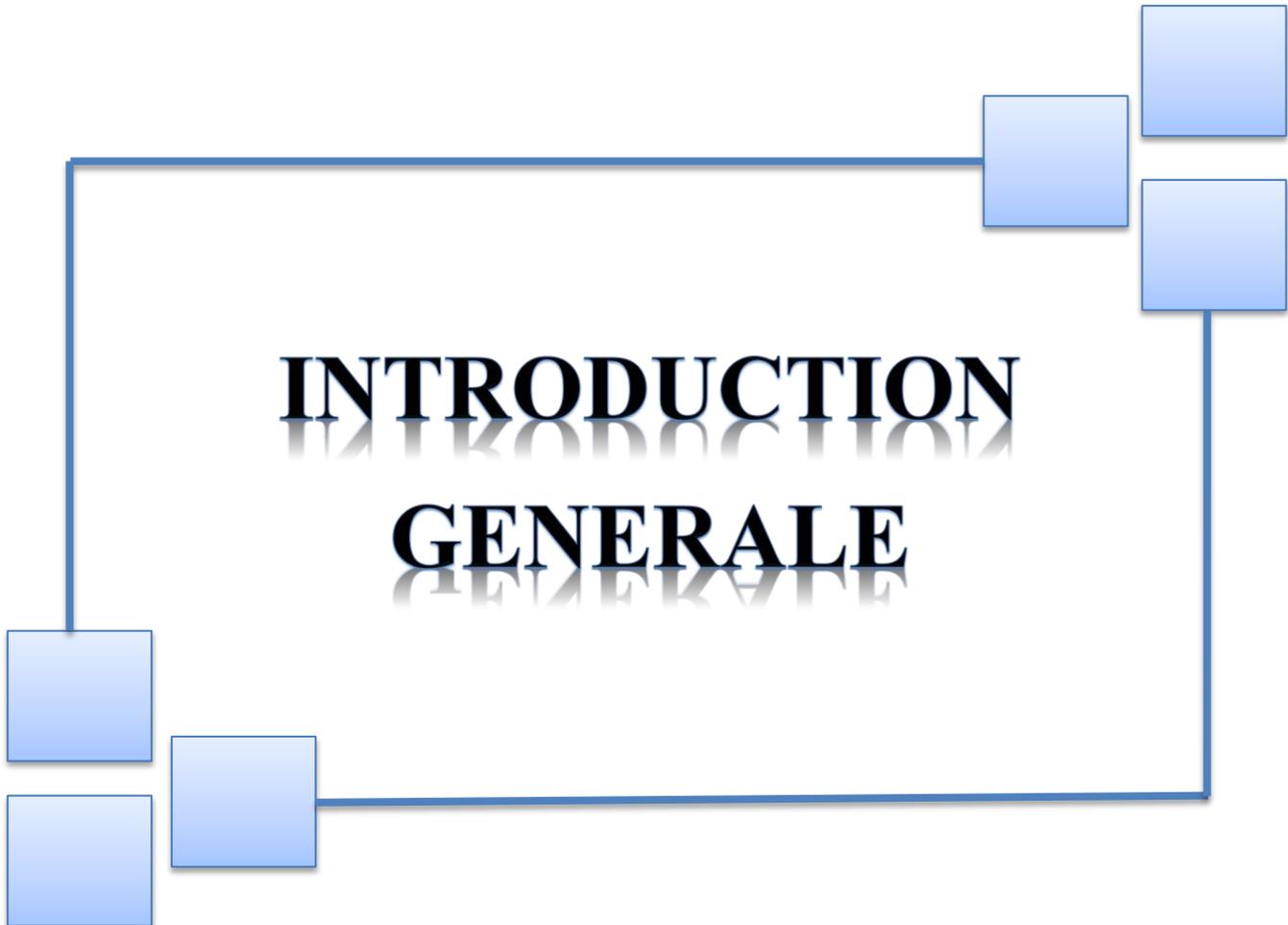
Liste des Tableaux

Tableau I.1: Classe de résistance de ciment.	09
Tableau I.2: Vibration recommandée en fonction de l'ouvrabilité du béton. [NET 1]	14
Tableaux I.3: Classe de résistance de béton	16
Tableau I.4: Classes de consistance.....	16
Tableau I.5: Des différents adjuvants	17
Tableau II.1: Classification des phyllo silicates.	26
Tableau III.1: Les résultats d'essais de prise	42
Tableau III.2: Masse volumique apparente du sable	44
Tableau III.3: Résultats de la masse volumique absolue « sable ».....	45
Tableau III.4: L'analyse granulométrique du Geulta.	46
Tableau III.5: Résultats d'essais d'équivalentes de sable naturel.	49
Tableau III.6: Les valeurs d'équivalent de sable indiquant la nature et qualité du sable.	50
Tableau III.7: Masse volumique apparente du gravier utilisée.	51
Tableau III.8: Résultats de la masse volumique absolue « gravier ».....	52
Tableau III.9: Résultat de l'analyse granulométrique de gravie (3/8).....	53
Tableau III.10: Résultat de l'analyse granulométrique de gravie (8/15).....	54
Tableau III.11: Composition de mélange pour une éprouvette cylindrique (16× 32) d'un béton ordinaire.....	62
Tableau III.12: Composition de mélange pour 3 éprouvettes cylindrique d'un béton à base d'argile calcinée.....	62
Tableau III.13: Composition de mélange pour éprouvettes prismatique (10×10×40) cm^3 d'un béton ordinaire.....	63
Tableau III.14: Composition de mélange pour 3 éprouvettes prismatique (10×10×40) cm^3 , d'un béton à base d'argile calcinée.....	63
Tableau IV.1 : Résistance de compression du béton ordinaire et béton à base d'argile calcinée	70
Tableau IV.2 : Résistance de compression du béton ordinaire et béton à base d'argile calcinée	72

Liste des figures

Figure I.1: Constituants de Béton.	03
Figure I.2: Désignation d'un ciment courant.....	09
Figure I.3: Série des Tamis en (mm).	11
Figure I.4: Photos des différents types de granulats.	12
Figure I.5: test du cône d'Abrams.	14
Figure I.6: Affaissement au cône d'Abram	16
Figure II.1: Domaines d'études des argiles.	22
Figure II.2 : Minéraux argileux de type 1 :1.....	24
Figure II.3: Minéraux argileux de type 2:1.....	24
Figure II.4: Minéraux argileux de type 2:1:1.	25
Figure II.5: Minéraux argileux inter stratifiés régulier et irrégulier.	25
Figure II.6: Minéraux argileux fibreuses.....	26
Figure II.7: Représentation d'un four flash pour la production du méta kaolin.....	28
Figure II.8: Principe de fonctionnement de four rotatif.....	29
Figure II.9: Courbes d'analyse thermo-différentielle de minéraux argileux communs et de la gibbsite.....	32
Figure II.10: Schéma réactionnel de la réaction pouzzolanique (adapté de Scrivener et al).	34
Figure II.11: Montage expérimental de l'essai Chapelle modifié.....	36
Figure III.1: les matériaux.....	39
Figure III.2: le ciment utilisé CEM I/A 42,5.....	40
Figure III.3: Essai de prise.....	41
Figure III.4: Appareil de Vicat.	42
Figure III.5: La masse volumique apparente (labo de génie civil).....	43
Figure III.6: La masse volumique absolue.	44
Figure III.7: Essai de l'analyse granulométrique du sable.	45
Figure III.8: Analyse granulométrique du sable.	46
Figure III.9: Principe de l'essai d'équivalente de sable.....	48
Figure III.10: Machine d'agitation (mouvement rectiligne horizontale).....	49
Figure III.11: Éprouvette pour l'essai de l'équivalent de sable (ES).	49
Figure III.12: Essai de la masse volumique du gravier 3/8.	51
Figure III.13: Essai de la masse volumique du gravier 8/15.	51
Figure III.14: Éprouvette pour l'essai de l'équivalent du gravier 3/8 et 8/15.	52

Figure III.15: Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	53
Figure III.16: Analyse granulométrique du gravier 8/15.....	54
Figure III.17: argile brut.	55
Figure III.18: La calcination de l'argile.....	55
Figure III.19 : Le Diffractogramme de l'échantillon calciné et brute.	56
Figure III.20: Composition du béton selon la méthode de GREUX GORISSE.....	59
Figure III.21: Préparation d'éprouvette cylindrique (Labo de génie civil TIARET).	62
Figure III.22: Malaxage du béton.	64
Figure III.23: Affaissement au cône d'Abrams.	64
Figure III.24: Moulage des éprouvettes cylindriques et prismatiques.....	65
Figure III.25: Conservation des éprouvettes (cylindriques et prismatiques).....	65
Figure III.26: Machine pour essai de compression simple.....	66
Figure III.27: Essai de traction.	67
Figure III.28: Machine pour essai de traction par flexion.	67
Figure IV.1: Éprouvettes cylindriques conservées pendant 28 jours.	69
Figure IV.2: Éprouvettes cubique conservées pendant 28 jours.	69
Figure IV. 3: Effet de calciné sur la résistance à la compression.....	70
Figure IV.4: Effet de calciné sur la résistance à la traction.	72



INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale :

Le béton est un matériaux de construction les plus utilisés au mode, et il est employé en grandes quantités pour la réalisation d'ouvrages de toutes sortes.

Sa simplicité de fabrication et de mise en œuvre, son coût relativement bas, ses performances mécaniques et sa durabilité en font un matériau de choix pour la réalisation des travaux les plus divers, notamment les bâtiments, les logements, les ponts, les routes et les barrages.

Le béton est constitué de ciment, d'eau, sable et gravier, c'est donc un matériau composite par excellence.

Le béton compact d'argile calcinée est un béton caractérisé par l'incorporation d'argile calcinée pour former un nouveau matériau ou béton offrant un comportement plus uniforme et durable.

Le but de nos travaux est réalisé une étude comparative entre le béton ordinaire et le béton dans le quel différents pourcentages d'argile calcinée ont été ajoutés (5%, 10%, 15%, 20%), afin de déterminer l'effet du pourcentage d'argile calcinée sur le béton en termes de propriétés mécaniques.

Nous avons divisé ce travail en deux parties, une partie théorique et une partie pratique :

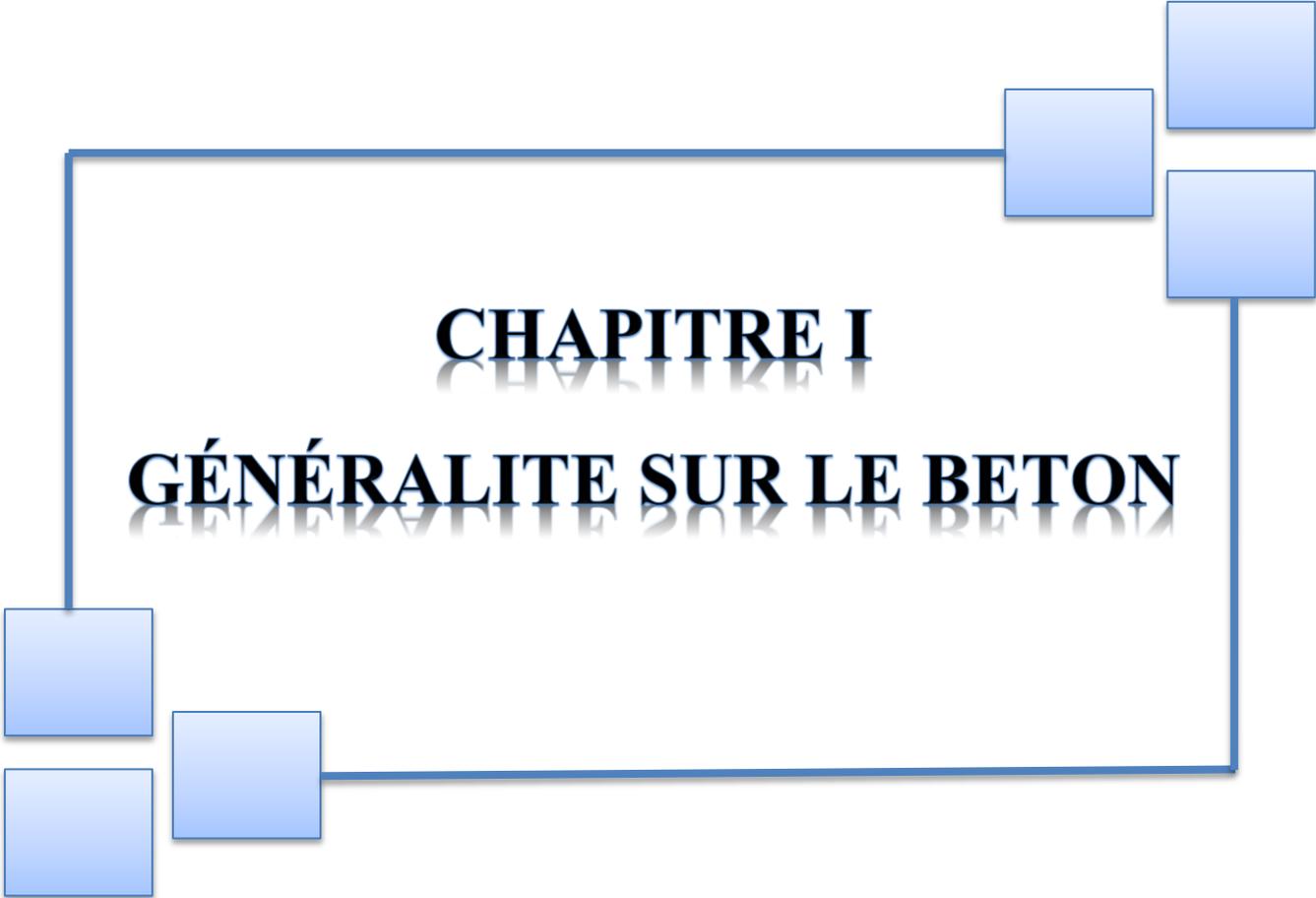
La première partie est une étude biographique divisée en deux chapitres, **le premier chapitre** est intitulé généralité sur le béton, et **le deuxième chapitre** est l'argile calcinée.

La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale composée de troisième et quatrième chapitre.

Dans **le troisième chapitre** nous avons mené un ensemble d'expérimentations sur le béton et leur composants (gravier, sable).

Le quatrième chapitre se concentre sur la comparaissant on entre le béton ordinaire et le béton avec d'argile calcinée, compression et flexion des mains.

Ce chapitre présente également les résultats obtenus dans le cadre de l'étude. Nous terminons ce travail par une conclusion.



CHAPITRE I
GÉNÉRALITE SUR LE BETON

I.1.Introduction:

Le béton est un matériau de construction largement utilisé dans le monde entier en raison de sa durabilité, de sa résistance et de sa polyvalence. Il est composé principalement de ciment, d'eau, de granulats (le sable et le gravier) et parfois d'adjuvants pour améliorer les propriétés du mélange. Le béton est utilisé dans de nombreuses applications, telles que la construction de bâtiments, routes, ponts, barrages, tunnels, fondations et d'autres infrastructures. Il peut être façonné et coulé pour s'adapter à une grande variété de formes et de designs, ce qui en fait un matériau de construction polyvalent. Son utilisation continue à se développer en raison de son efficacité, de sa rentabilité et de sa durabilité.

I.2.Historique:

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

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

I.3.Définition du béton:

Le béton est un matériau composite résultant d'un mélange de plusieurs composants: ciment, eau, granulats et plus souvent, d'adjuvants, qui constituent un ensemble homogène; après le durcissement il devient un matériau pierreux. [2]

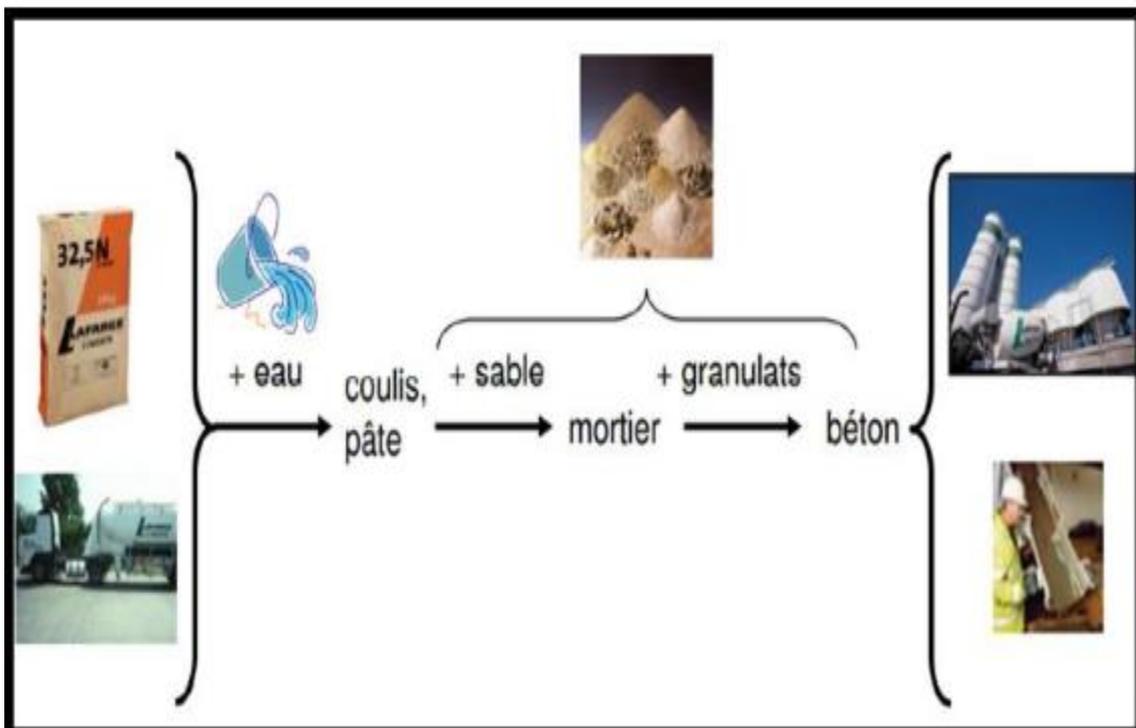


Figure I.1: Constituants de Béton.

I.4. Domaines d'Application Du Béton:

Le béton se trouve généralement armé ou non, précontraint, désigné en abrégé par les lettres **NA** (non armé), **BA** (béton armé) ou **BP** (béton précontraint). Le béton comme matériau de construction est actuellement utilisé dans divers domaines d'application et avec divers procédés tels que : les bâtiments, travaux publics, les ponts, les tunnels, les routes rigides, etc. [3]

I.5. Les Avantages et les Inconvénients de l'Emploi du Béton:**✓ Les avantages de béton :**

- Se moule, épouse toutes les formes, des plus massives aux plus délicates.
- Peu coûteux, facile à fabriquer, peu d'entretien.
- Devient solide comme de la pierre.
- Résiste bien au feu et aux actions mécaniques habituelles.
- Associé à l'acier, il offre des possibilités de constructions très vastes.

✓ Les inconvénients de béton :

- Faible résistance à la traction.
- Faible isolation thermique.
- Coffrages nécessaires pour sa mise en œuvre.

Sa destruction entraîne un coût élevé (en cas de démolition) et n'est pas ou peu recyclable. [4]

I.6. Sélection des éléments pour bétons:

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomerat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci. [1]

I.6.1. Ciment :

Le ciment est un liant hydraulique constitué de poudre minérale. On l'emploie en effet pour fabriquer le béton qui est le matériau de construction le plus utilisé au monde. La raison en est son faible coût, sa facilité de mise en œuvre et sa disponibilité pratiquement universelle. Il suffit, en effet, de mélanger un peu de poudre avec de l'eau, du sable et des graviers pour obtenir, à température ambiante et en quelques heures, un matériau dur [5].

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... [6]

En chimie des ciments, on a l'habitude d'utiliser une nomenclature particulière pour écrire les transformations chimiques ; celle-ci utilise l'initiale des oxydes en place des symboles chimiques classiques :



➤ **Ainsi les principaux constituants du ciment Portland s'écrivent:**

- Silicate tricalcique, Ca_3SiO_5 ou $3\text{CaO}, \text{SiO}_2 : \text{C}_3\text{S}$;
- Silicate dicalcique, Ca_2SiO_4 ou $2\text{CaO}, \text{SiO}_2 : \text{C}_2\text{S}$;
- Aluminate tricalcique, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ou $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}_3\text{A}$;
- Alumino ferrite Tetra calcique, $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_{10}\text{Fe}_2$ ou $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{C}_4\text{AF}$. [5]

I.6.1.1. Composition chimique et minéralogique du ciment :

Les liants sont constitués par un mélange en proportions convenables de corps suivants:

- Oxyde de calcium CaO
- Silice SiO_2
- Alumine Al_2O_3
- Oxyde ferrique Fe_2O_3
- Magnésie MgO
- Anhydride sulfurique SO_3
- Sulfate de calcium CaSO_4

I.6.1.2. Le clinker (K) :

Le clinker, commun à tous les ciments courants, est un mélange de 95% de calcaire (calcaire, craie) et de 20% d'éléments secondaires. Le clinker est composé de 4 phases cristallines principales :

➤ **C_3S Ou l'alite** : silicate tricalcique de composition chimique $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ qui donne de la résistance mécanique au matériau au jeune âge. L'alite constitue entre 60% et 65% du clinker. L'hydratation du silicate tricalcique est une réaction exothermique conduisant à la formation de silicate de calcium hydraté et d'hydroxyde de calcium. Elle se résume par



A l'inverse de la composition de l'hydroxyde de calcium (CH ou Portland ite) qui est un composé cristallin bien défini, la composition des silicates de calcium n'est pas bien définie et est généralement notée C-S H. L'alite est le principal composé du clinker et les hydrates formés lors de sa réaction avec l'eau de gâchage sont à la fois impliqués dans la résistance à court et moyen termes du matériau.

➤ **C₂S ou la bélite:** silicate bi calcique de composition chimique 2CaO.SiO₂ qui permet au matériau d'atteindre des résistances mécaniques plus importantes à moyen et long termes.

La bélite constitue entre 5% et 20% du clinker. L'hydratation du silicate bi calcique est également une réaction exothermique qui conduit à la formation de silicate de calcium hydraté et d'hydroxyde de calcium. Elle se résume par

- **L'équation (2):** $2C_2S + 5H \rightarrow C_3S_2H_4 + CH_2$ (2).

La formation des hydrates est beaucoup plus lente que celle issue de la réaction de l'alite avec l'eau de gâchage, ces hydrates permettent d'assurer la résistance à long terme

➤ **C₃A ou la célite:** aluminat tricalcique de composition chimique 3CaO.Al₂O₃ qui participe principalement au phénomène de prise des bétons mais qui ne présente que de faibles résistances mécaniques et chimiques. La célite constitue entre 4% et 12% du clinker. Le processus d'hydratation de l'aluminat tricalcique se déroule en deux temps.

Tout d'abord, en présence de sulfate, l'hydratation de C₃A engendre la formation d'ettringite.

- **l'équation (3):** $C_3A + 3CSH_2 + 26H \rightarrow C_6AS_3H_{32}$ (3). Ensuite, quand la teneur en sulfate diminue, l'ettringite réagit avec le reste de célite pour former du mono-sulfo-aluminat hydraté.
- **l'équation (4):** $C_6AS_3H_{32} + 2C_3A + 4H \rightarrow 3C_4ASH_{12}$ (4). De part sa forte réactivité avec l'eau de gâchage, la célite a un rôle majeur dans la rhéologie de la pâte et la résistance à court terme du matériau.

➤ **C₄AF ou la ferrite:** aluminoferrite tétracalcique de composition chimique 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃, Le C₄AF constitue entre 1% et 5% du clinker.

I.6.2. Hydratation du ciment:

Le ciment est un liant hydraulique, il se combine à l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. La réaction chimique d'hydratation du ciment conduit donc à la formation d'une pâte qui, après prise, durcit progressivement à l'air ou dans l'eau.

Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été mis en lumière, dès la fin du siècle dernier, par Henri Le Chatelier. Il a notamment décrit les trois phénomènes concomitants qui concourent au phénomène de prise [7] :

- la dissolution des constituants du ciment dans l'eau.

- la formation de solutions sursaturées par rapport aux différents hydrates.
- la précipitation et la cristallisation de ces hydrates dans les vides inters granulaires.

I.6.2.1. Hydratation des silicates de calcium, C₃S et C₂S:

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (C₃S) et les silicates bicalciques (C₂S) se dissolvent sous forme d'ions Ca²⁺, OH⁻ et H₂SiO₄²⁻. Qui interagissent 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 [8]. À titre indicatif, les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire :

Pour le C₃S: $2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH.$

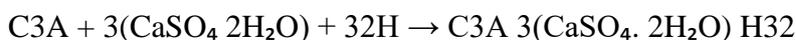
Pour le C₂S: $2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH.$

I.6.2.2. Hydratation des aluminates de Calcium, C₃A et C₄AF :

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme de gypse au clinker pour contrôler ces réactions [9]

I.6.2.3. Hydratation de l'aluminate tricalcique C₃A :

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse (CaSO₄ 2H₂O). En l'absence du gypse, la réaction de C₃A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C₃A réagissent d'abord pour former le trisulfo-aluminate hydraté (Ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale (figure 1.). La réaction est donnée par:



Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en éttringite.

Il apparaît donc secondairement un monosulfo-aluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales [10]. La réaction est donnée par :



Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée [9].

I.6.2.4. Hydratation de l'alumino-ferrite tétracalcique C4AF :

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

Dans la première étape de la réaction, le C4AF produit une forme élevée de sulfo-aluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C4AF pour donner une basse forme de sulfo-aluminate. Ces sulfo-aluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte.

La réaction du C4AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance [11]. L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

I.6.3. Les type du ciment:

La composition du ciment peut **varier** en fonction des différents types de besoins, ce qui le divise en **plusieurs catégories** :

- Le CEM I (ciment Portland) est un ciment adapté pour la conception de béton armé ou précontraint car il offre un niveau de résistance élevé.
- Les CEM II A ou B (ciment Portland composé) ont pour particularité d'être très maniables. Ils sont donc utilisés dans les travaux d'usage courant tels que pour les chapes traditionnelles ou bien pour les enduits simples.
- Les CEM III A, B ou C (ciment de haut-fourneau) sont adaptés à des environnements difficiles, ils sont réputés pour être durables.
- Les CEM IV A ou B (ciment de type pouzzolanique) sont également adaptés à un milieu agressif, idéals pour des structures hydrauliques. Absents en France.

Les CEM V A ou B (ciment composé) ont les mêmes propriétés physiques que les CEM III mais pas les mêmes constituants. [4]

I.6.3.1. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale:

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes «R» sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge élevées.

Ces classes sont notées:

- ✓ Classe 32.5;
- ✓ Classes 42.5;
- ✓ Classe 52.5.

Tableau I.1: Classe de résistance de ciment. [12]

Résistance à la compression (en MPa)				
Désignation de la classe de résistance	Résistance à court terme		Résistance courante	
	à 2 jours	A 7 jours	A 28 jours	
32.5 L	-	≥12.0	≥32.5	≤52.5
32.5 N	-	≥16.0		
32.5 R	≥10	-		
42.5 L	-	≥16.0	≥42.5	≤62.5
42.5 N	≥10	-		
42.5 R	≥20	-		
52.5 L	≥10	-	≥52.5	-
52.5 N	≥20	-		
52.5 R	≥30	-		

- Désignation et marquage:

La désignation complète d'un ciment courant est décrite dans la norme **NF EN 197-1**; voir l'exemple [**CEM II / A – LL 32,5 R CE CP2 NF**].

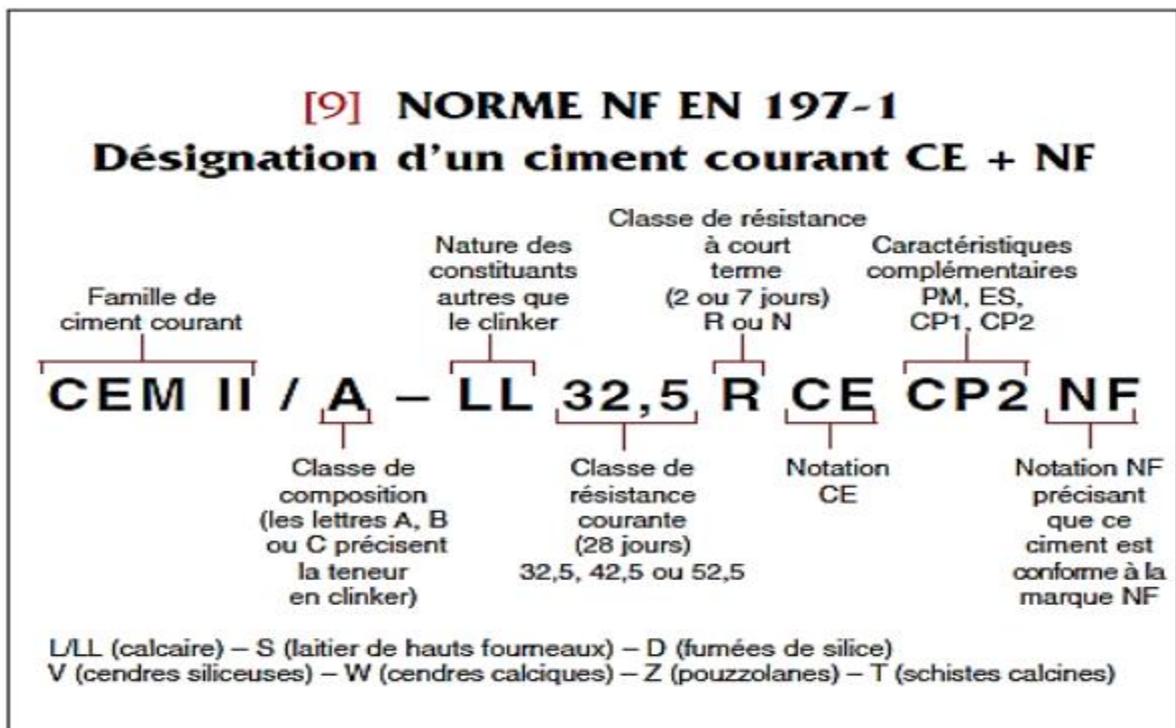


Figure I.2: Désignation d'un ciment courant. [13]

I.6.4. GRANULATS:**I.6.4.1. Généralités sur les granulats utilisés dans le béton:**

La construction de l'habitat et l'aménagement de l'environnement font appel à trois grands secteurs d'activités, qui sont les industries de carrière et matériaux de construction, le bâtiment et les travaux publics. Tous les travaux liés à ces secteurs d'activités utilisent des matières premières naturelles en tant que morceaux de roches ou alluvionnaires (sous forme de sables et graviers), soient obtenues artificiellement par traitement de roches naturelles ou des déchets industriels et parfois l'utilisation des déchets inertes. Leur nature et leur forme varient en fonction des gisements et des techniques de production. Elles sont destinées à être mises en œuvre sans aucun apport de liant pour les solidariser (ballast des voies de chemin de fer, couche de fondation des routes, remblais...) soient agglomérées à l'aide d'un liant (ciment pour le béton, bitume pour les enrobés). [14]

I.6.4.2. Définition:

On appelle granulats des matériaux pierreux de petites dimensions, produits par l'érosion ou le broyage mécanique (concassage) des roches. Ce sont des matériaux inertes entrant dans la composition des bétons et mortiers. Ils constituent le squelette du béton et ils représentent, environ 80 % du poids total du béton. Ils sont constitués de sables (Gros et Fin) et de gravier. [4]

I.6.4.3. Classification des granulats :

Les granulats sont classés en fonction de leur grosseur déterminée sur les tamis à mailles carrées dont la dimension inférieure est exprimée en millimètre. On appelle «tamisât» la partie des granulats qui est passée à travers le tamis et « refus » la partie qui est restée sur le tamis. Le terme « Granulats d/D » est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de «d» pour le petit élément à «D» pour les gros éléments. La norme **P18-540** précise les appellations de différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles :

- les fillers ou fines 0/D (D <2mm et 70% <0,063mm),
- les sablons 0/D (D <1mm et 70% <0,063mm),
- les sables 0/D (1mm < D <6,3mm),
- les graves 0/D (D > 6,3mm),
- les gravillons d/D (d > 1mm et D <125mm).
- ballast d/D (d > 25 mm et D < 50mm).

Avec:

D: dimension supérieure du granulat.

d: dimension inférieure du granulat.

La classe des granulats est définie par tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles ont les dimensions suivants en mm:

0.063 – 0.08 – 0.10 – **0.125** – 0.16 – 0.2 – **0.25** – 0.315 – 0.4 – **0.5** – 0.63 – 0.8 – **1** – 1.25 – 1.6 – **2** – 3.15 – **4** – 5 – 6.3 – **8** – 10 – 12.5 – 14 – **16** – 20 – 25 – **31.5** – 40 – 50 – **63** – 80 – 100 – **125**.

Les tamis dont les dimensions sont soulignées en gras correspondent à la série de base préconisée par le CEN (NF EN 933-2); de ce fait. Lors d'une étude granulométrique, ils doivent être utilisés en plus de tout autre tamis nécessaire à l'établissement de la courbe. [4]



Figure I.3: Série des Tamis en (mm)

I.6.4.4. Les différents types de granulats :

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle ou recyclée :

- « Naturels », lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ;
- « Artificiels », lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais ;
- « Recyclés », lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés.

[15]

a) LES GRANULATS NATURELS : Les granulats naturels, proviennent de deux sources : les carrières de roches massives et les gisements alluvionnaires. Géologiquement, les granulats naturels proviennent de trois natures de roches :

- Éruptives : granites, basaltes porphyres,

- Sédimentaires : calcaires, grès, quartzites,
- Métamorphiques : gneiss, amphibolites.
- Les compositions minéralogiques font apparaître trois familles: les roches calcaires, les roches siliceuses les silico-calcaires. [15]



Figure I.4: Photos des différents types de granulats.

b) Les granulats artificiels :

Dans cette catégorie se rangent des granulats provenant de la transformation thermique de roches, de minerais et de sous-produits industriels transformés.

c) Les granulats recyclés :

Le granulat recyclé est le granulat résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction.

Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, le fraisât d'enrobés bitumineux...

I.6.5. Les sable:

I.6.5.1 Définition :

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80 μ m et 05 μ m ; il s'agit d'une définition globale dont les bornes varient d'une classification à une autre, c'est un matériau dont le diamètre maximal est inférieur à 6.3mm et dont le passant à 80 μ m n'excède pas 30% Dans le sens le plus courant, on entend par « sable » les éléments de dimension 0 à 5mm.les fines. [16]

I.6.5.2. Origine des sables:

Les sables rencontrés sont le résultat d'une décomposition chimique ou d'une désintégration Mécanique des rochers, suivie par un processus de transport qui est à l'origine de leurs caractéristiques physico-chimiques ; les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation. Ils comportent, à des degrés

divers une décomposition sur place, des différentes roches, suivie d'un transport fluvial et parfois éolien. [16]

1) **Sable de rivière** : il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau. Il doit être dur et propre pour qu'on puisse l'utiliser dans les bétons. [17]

2) **Sable de mer** : il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel. [17]

3) **Sable de carrière** : Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants. Il est donc à proscrire. [17]

4) **Sable artificiel** : il est obtenu par concassage des roches (calcaires durs, gré ...).

Il est souvent plein de filler. Pour qu'il soit utilisable dans les bétons, il faut limiter le pourcentage des fines. [17]

5) **Sable de dune** : c'est une variété des sables de mer. Il est donc très fin. Les sables de dune se trouvent dans les régions sud du pays. Ils sont situés en zone présaharienne. Les sables retenus sont ceux issus des dunes continentales. Ces dunes sont constituées des nombreux amas de sables fins accumulés dans certaines régions spécifiques du Sahara. [17]

6) **Sable recyclé** : Obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments [17]

I.7.L'eau de gâchage:

L'eau de gâchage est un élément indispensable lors de la conception du béton. Elle permet d'hydrater le ciment, ce qui libère ses capacités de liant, et rend également plus facile l'application du béton. L'eau utilisée doit être propre! (Évitez d'utiliser de l'eau de mer) et prenez garde à ne pas l'ajouter avec excès sous risque d'altérer les performances de votre béton. En effet, cela pourrait diminuer sa résistance et sa durabilité. [18]

I.8.Propriétés du béton: [NET 1]

- **Mouillable**, c'est-à-dire qu'on peut lui faire prendre facilement des formes volumiques assez simples, une grande variété des formes qu'il peut épouser c'est la Maniabilité ;
- **Durcit**, avec le temps le béton doit devenir un matériau dur et relativement indéformable c'est-à-dire mécaniquement résistant ;
- **Compacité**, la résistance à la compression d'un béton contenant suffisamment de liant croît avec sa compacité.

Maniabilité et résistance mécaniques sont deux (02) objectifs contraires :

- Eau en excès bonne maniabilité, mauvaise résistance ;
- Granulat roulé bonne maniabilité, mauvaise résistance;
- Granulats concassés mauvaise maniabilité, bonne résistance.

Pour réaliser un béton qui réponde aux deux critères, il faut optimiser tous les facteurs.

I.8.1 Béton frais:

Ouvrabilité (ou maniabilité): qualité du béton; qui se traduit par la capacité du béton de bien remplir tous l'espace du coffrage et d'assurer un bon enrobage des armatures. L'ouvrabilité d'un béton est couramment appréciée par le test du cône d'Abrams, ou le béton est mis dans un moule conique, l'affaissement du béton une fois le moule enlever donne une appréciation sur sa maniabilité. La mise en place du béton dans le moule se fait en 4 couches d'épaisseurs égales, piquer à l'aide d'une tige à raison de 25 coups pour chaque couche. Le cône est ensuite enlevé doucement sans secousses.

xd

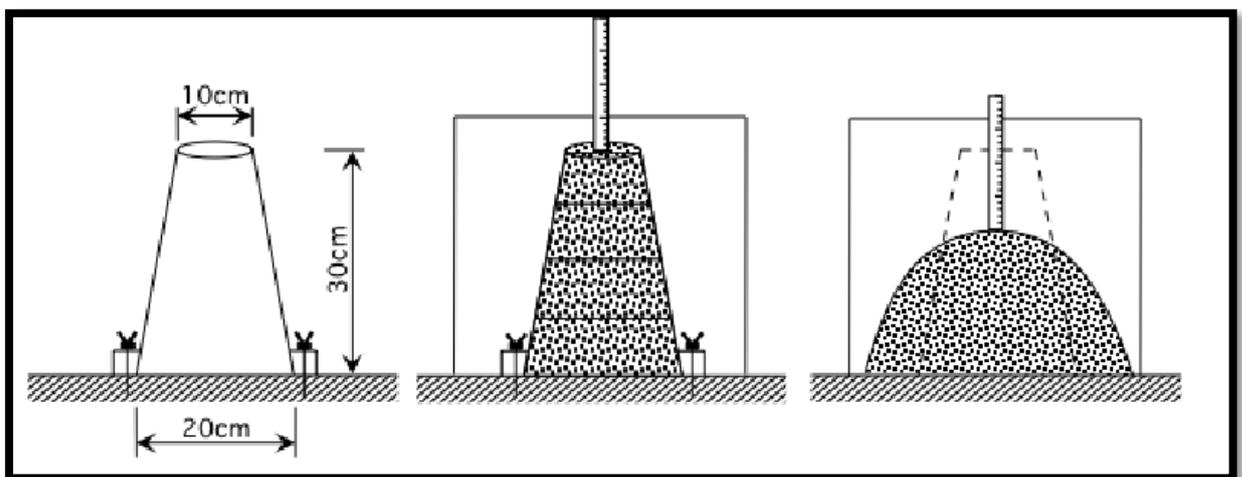


Figure I.5: Test du cône d'Abrams.

En fonction de l'affaissement mesuré, la maniabilité du béton est appréciée et une manière de sa mise en œuvre est recommandée.

Tableau I.2: vibration recommandé en fonction de l'ouvrabilité du béton. [NET 1]

Affaissement	Béton	Mise en œuvre
0 – 2cm	Très ferme	Vibration puissante
3 – 5cm	Ferme	Bonne vibration
6 – 9cm	Plastique	Vibration courante
10 – 13cm	Mou	Piquage
>13cm	Très mou	Leger piquage

I.8.2. Béton durci: [NET 1]

Résistance mécanique: La résistance mécanique la plus importante pour le béton étant la résistance à la compression, elle est couramment mesurée sur des éprouvettes cylindriques 16x32cm (16cm de diamètre et 32cm de hauteur).

Le béton reste toujours avec leurs inconvénients tels que: Temps de durcissement relativement long, une exécution peu précise et difficulté de reprise des ouvrages en cas de transformations.

Le Béton de ciment présente une excellente résistance à la compression, mais une faible résistance à la traction, et donc aussi à la flexion a peu près 1/10 de sa valeur de compression.

I.9. Formulation du béton: [NET 2]

Le choix des proportions des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent, basées sur des considérations théoriques diverses, ont été proposées et plusieurs d'entre elles sont appliquées en pratique.

La méthode "Dreux" est en fait une synthèse de celles qui ont abouti à des résultats favorables, est une méthode simplifiée qui est à la portée de tous les petits utilisateurs, car elle utilise des abaques pour déterminer les quantités des matériaux.

I.10. Classification du béton:**1) Selon la masse volumique:**

Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories. En général le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique:

- Béton très lourd: $>2500 \text{ kg/m}^3$. (pour la protection contre les rayons radioactifs).
- Béton lourd (béton courant): $1800\text{-}2500 \text{ kg/m}^3$.
- Béton léger: $500\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$. (la résistance est élevée).
- Béton très léger: $<500 \text{ kg/m}^3$. (pour répondre aux problèmes d'isolation). [12]

2) Selon la nature de liant:

- Béton de ciment (le ciment),
- Béton silicate (la chaux),
- Béton de gypse (le gypse),
- Béton asphalte. [12]

3) Selon la résistance à la compression:

La norme EN 206 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au tableau:

- $f_{ck_{cyl}}$: est la résistance caractéristique (fractale 5 %) en compression du béton déterminée par essais sur éprouvettes cylindriques à 28 jours en N/mm^2 .
- $f_{ck_{cube}}$: est la résistance caractéristique (fractale 5 %) en compression du béton déterminée par essais sur éprouvettes cubiques à 28 jours en N/mm^2 .

Les valeurs soulignées sont les valeurs recommandées:

Classe	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/45	C45/55	C50/60
$f_{ck_{cyl}}$ (Mpa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck_{cube}}$ (Mpa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60

- **Selon la classe de consistance:** Il existe 5 classes de consistance des bétons (S1 à S5).

La mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide du cône d'Abrams. [2]

Classes de consistance	S1	S2	S3	S4	S5
Affaissement (mm)	10-40	50-90	100-150	160-210	>220

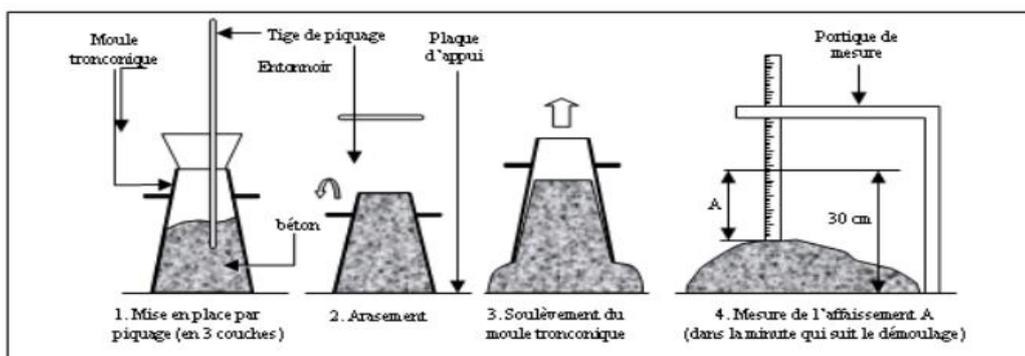


Figure I.6: Affaissement au cône d'Abram.

Les consistances peuvent également être spécifiées par d'autres essais, temps VEBE, indice de serrage ou diamètre d'étalement.

I.11. Les adjuvants:

Les adjuvants sont des **produits chimiques** ajoutés lors du malaxage du béton et **faiblement dosés** lors de la préparation (moins de 5% de la masse du béton). Ces produits offrent la possibilité **d'améliorer certaines caractéristiques** du béton telles que son temps de prise ou son étanchéité. Très répandus aujourd'hui, il existe **différents types** d'adjuvants qui vous permettront d'obtenir le béton de vos rêves... [4]

Tableau I.5: Des différents adjuvants. [4]	
Nature	Effets
Prise et durcissement	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Accélérateur de prise: diminue le temps de prise du béton. ✓ Accélérateur de durcissement: accélère le temps de durcissement du béton. ✓ Retardateur de prise: ralentit le temps de prise du béton sans l'altérer
Ouvrabilité du béton	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Plastifiant: améliore la maniabilité du béton sans l'altérer. ✓ Plastifiant réducteur d'eau: réduit la teneur en eau dans le but d'augmenter la résistance du mélange, tout en ayant une bonne maniabilité. ✓ Superplastifiant: <ul style="list-style-type: none"> • Fonction fluidifiant: (dosage en eau normal) améliore la maniabilité mais diminue la résistance. • Fonction réducteur: (très faible dosage en eau) entraîne une forte réduction en eau dans le mélange tout en conservant une bonne maniabilité.
Modification de certaines propriétés	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Entraîneur d'air: permet la formation de petites bulles d'air réparties de manière homogène. Ce qui augmente la maniabilité et la résistance au gel du béton à l'état solide. ✓ Hydrofuge: améliore l'imperméabilité du béton en obturant les pores. ✓ Les pigments: offrent la possibilité de modifier la couleur du béton.
Les produits de cure	Produits appliqués à la surface du béton frais, ils ont pour rôle de protéger le béton contre d'éventuels risques de dessiccation.

I.12. Comportement mécanique:**I.12.1. Résistance à la compression:**

Le béton seul est un matériau naturellement résistant à la compression, d'autant plus s'il est armé, c'est donc sous ce type de charge qu'on essayera de le soumettre au maximum plutôt qu'à la traction. C'est pour cette raison que le béton n'est que très rarement utilisé seul, mais qu'il est plus souvent armé avec des barres en acier qui, elles, vont reprendre les efforts de traction. Peu importe le béton que vous choisirez, il sera donc particulièrement adapté pour construire des éléments soumis à la compression.

La classe de résistance du béton nous donne directement sa résistance à la compression, en effet la classe de résistance du béton est notée C X/Y où X représente la résistance à 28 jours d'une éprouvette cylindrique béton alors que Y représente la résistance à 28 jours d'une éprouvette rectangulaire. Ces valeurs normées seront donc des plus utiles pour choisir votre béton en fonction des charges qu'il devra supporter. Les bétons classiquement utilisés sur les chantiers ou pour votre maison sont des C25/30 ou C30/37 alors que les classes de résistance. [18]

I.12.2. Résistance à la traction:

Quand on évoque béton et traction ensemble, c'est généralement pour parler d'un accident de construction plutôt que pour évoquer les grandes capacités du béton à reprendre ces types d'efforts. En effet, la traction n'est vraiment pas le domaine d'application favori du béton. S'il n'est pas armé, le béton peut être même cassant comme du verre lorsqu'il est soumis à de la traction. C'est une des raisons pour laquelle le béton armé a été développé.

L'acier étant très résistant à la traction, c'est pour cette raison que Joseph Louis Lambot a décidé d'associer ces deux matériaux en vue de récupérer leurs deux caractéristiques principales et ainsi d'obtenir le matériau parfait. [19]

L'utilisation de béton seul pour résister à des efforts de traction est donc impossible, car les méthodes de calcul du BAEL ou même des Euro code négligent complètement la résistance à la traction du béton pour des problèmes de sécurité.

Il faudra donc faire bien attention lors de la conception de vos constructions à ce qu'un minimum d'éléments en béton (comme des suspentes) soit en traction et surtout à bien dimensionner les armatures en acier qui vont reprendre ces efforts. Plus vous aurez de tractions, plus vous devrez ferrailer vos éléments et plus le prix de votre construction sera élevé. [18]

I.13. Comportement chimique:

La durabilité d'un béton est de pouvoir conserver sa résistance et de continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile pas à une durée indéfinie, il en résulte que le béton doit résister aux mécanismes de dégradation auxquels il peut être exposé, tels que les cycles de gel-dégel et certaines formes d'attaques chimiques. [6]

La mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du béton, les actions peuvent être mécaniques, physiques ou chimiques, Ces dernières sont causées par les réactions alcali-silice et alcali-carbonate, les attaques chimiques externes sont causées par la présence d'ions agressifs tels que les chlorures, les sulfates et les gaz carboniques ainsi que de nombreux gaz et liquides d'origines naturelles ou industrielles. [6]

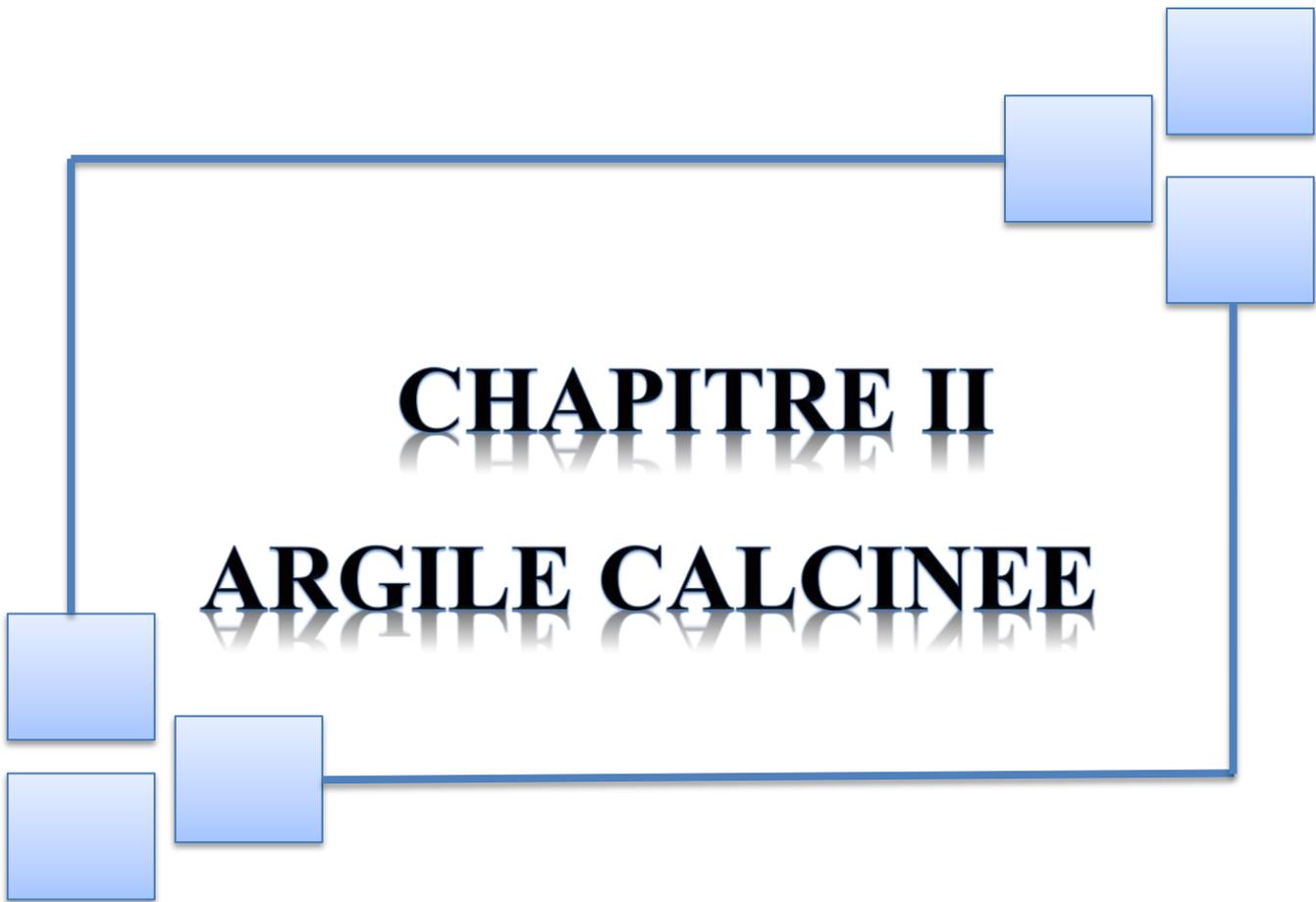
La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau béton. Cette propriété est définie (dans un cadre très général) par la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Le paramètre régissant la durabilité est bien entendu la perméabilité. Plus cette dernière n'est réduite et mieux sa durabilité en sera augmentée. [6]

Pour évaluer la durabilité «potentielle» d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations. [6]

I.14. Conclusion:

Les bétons, par leurs propriétés et leurs caractéristiques, répondent aux exigences de tous les types d'ouvrages, notamment par leur grande maniabilité. En effet, ils ont une stabilité statique et dynamique, une bonne inertie thermique, une bonne résistance au feu...

Le béton peut également satisfaire les plus grandes exigences en termes d'esthétiques ou seulement assurer la stabilité d'une structure dans le cas où l'esthétique ne serait pas requis.



CHAPITRE II
ARGILE CALCINEE

II.1 Introduction :

L'argile est une matière première utilisée depuis longtemps dans les différentes activités de la vie humaine. Le mot argile provient du mot grec « Argos » ou de latin « argilo » qui veut dire blanc.

Les argiles sont des roches constituées d'une variété de minéraux très fins, plus ou moins bien définis, et dont la forme est généralement aplatie. Ils sont constitués par des minéraux spécifiques dits : argileux, mais on trouve aussi des espèces dont les plus fréquentes sont la silice, des silicates non phylliteux, des oxydes, des hydroxydes cristallisés ou amorphes et des carbonatés. [20]

II.2 Définition:

Les argiles sont constituées essentiellement de silice, d'alumine et de fer et constituent par là même le complément indispensable du calcaire. Elles peuvent être classées de plusieurs manières. On distingue ainsi : - Les argiles résiduelles provenant de la décomposition sur place de roches existantes, du fait d'agents physico-chimiques.

Les argiles transportées et déposées sous l'effet des mers, des cours d'eau, des glaciers, du vent.

Du point de vue physico-chimique on peut classer les argiles en différents groupes :

- Groupe kaolin: formule générale: $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
- Groupe halloysite: formule générale: $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$
- Groupe montmorillonite: formule générale: $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$.
- Groupe des minéraux argileux micacés: (ex: séricine).
- Groupe des minéraux argileux magnésiens: (ex: sépiolite)

Les argiles utilisées en cimenterie sont des argiles communes qui peuvent être constituées par des mélanges des groupes énumérés. De plus les argiles résiduelles contiennent souvent des fragments des roches qui leur ont donné naissance et qui risquent de les rendre impropres à la fabrication du ciment (silex, quartz, sous forme de nodules, de sable,....etc.). Là encore les impuretés telles que magnésie, soufre, soude, potasse, doivent être en quantité très limitée. D'une manière générale, le coût de la préparation des matières premières croît avec le nombre de constituants à mélanger. Il faut donc s'efforcer d'avoir un nombre de constituants aussi réduit que possible. Ces constituants doivent être faciles à broyer, peu coûteux à sécher s'il s'agit de voies humides et faciles à combiner lors de la clinkerisation. [21]

II.3 Domaines d'utilisation des argiles :

Selon sa variété, l'argile se révèle être un minéral très utile. On peut ainsi faire des tuiles et briques, des poteries en jouant sur sa capacité de modelage une fois mélangé à l'eau. L'argile sert aussi à la fabrication du ciment. Les argiles apportent aux géologues des informations sur les conditions environnementales (source, condition de formation, diagenèse...). Les ingénieurs pétroliers déduisent les conditions thermiques des gisements (degré de maturation).

Les ingénieurs en génie civile s'intéressent aux propriétés des argiles en tant que matériel industriel (réfractaires, matériaux de construction). Les agronomes analysent les propriétés d'hydratation et d'adsorption des argiles pour concevoir les fertilisants (Figure II.1). [22]

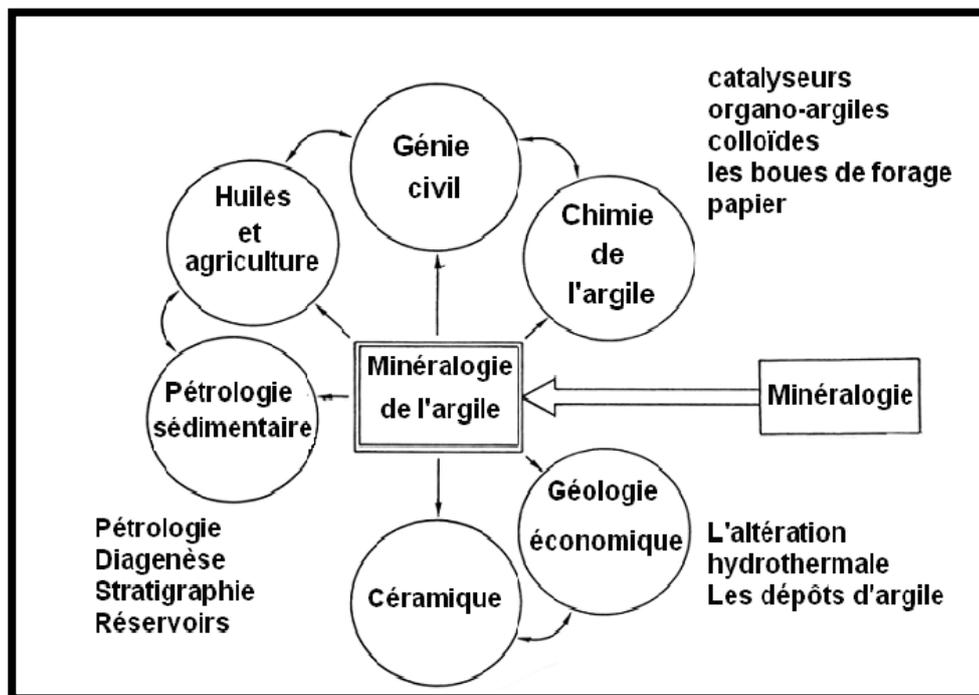


Figure II.1: Domaines d'études des argiles.

II.4 Propriétés des argiles:

Argile est une substance naturelle composée de minéraux en majorité bien cristallisés, ses propriétés principales:

- Incluent sa capacité à absorber l'eau, sa plasticité.
- Capacité à durcir sous l'action de la chaleur.
- Capacité à adhérer à d'autres matériaux et ses propriétés antibactériennes.

L'argile est utilisée de nombreuses applications notamment en cosmétique, en médecine, en construction et en poterie.

II.5 Les grandes familles de minéraux argileux:

Les minéraux de l'argile se répartissent principalement en quatre grandes familles [23], qui sont:

- famille du kaolin $Al_4 [(OH)_8 Si_4 O_{10}]$.
- famille des micas: di octaédrique $K_2 Al_4 [Si_6 Al_2] O_{20} (OH)_4$ tri octaédrique $K_2 Mg_6 [Si_6 Al_2] O_{20} (OH)_4$.
- famille de la montmorillonite $Al_2 [(OH)_2 Si_4 O_{10}] .xH_2O$.
- famille des chlorites : entre deux feuillets de type talc se place un feuillet de type brucite $Mg(OH)_2$, d'où des formules du type $(Mg, Al)_3 [(OH)_2 AlSi_3 O_{10}] Mg_3(OH)_6$.

II.6 Classification des argiles:

Les argiles sont des roches constituées de variétés de minéraux très fins auxquels viennent s'ajouter des minéraux non argileux tels que le quartz, minéraux lourds, matières organiques... Du point de vue chimique, ces minéraux sont des silicates d'alumine qui se présentent sous forme de feuillets. L'empilement de ces feuillets constitue le grain dont la dimension est généralement inférieure à 2 μm [24].

Les argiles sont classées en différents groupes de minéraux selon l'épaisseur de leurs feuillets:

- **Minéraux à 7 Å:** Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Son épaisseur est d'environ 7 Å ;
- **Minéraux à 10 Å:** Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Son épaisseur est d'environ 10 Å ;
- **Minéraux à 14 Å:** Le feuillet est constitué de couches octaédriques interfoliaires [25].

II.7 Différents types d'argile:

L'argile est classée selon le nombre, le placement et le vide entre ces feuillets.

II.7.1 Minéraux argileux type 1:1 «TO»: constitués d'un feuillet tétraédrique surplombant une couche octaédrique. Ils présentent typiquement une taille de 7 Å (TO + interfeuillet). La nature du feuillet octaédrique permet de distinguer les argiles TO à feuillet dioctaédrique (feuillet type brucite, $Mg(OH)_2$ et les argiles TO à feuillet trioctaédrique (feuillet de type gibbsite). [26]

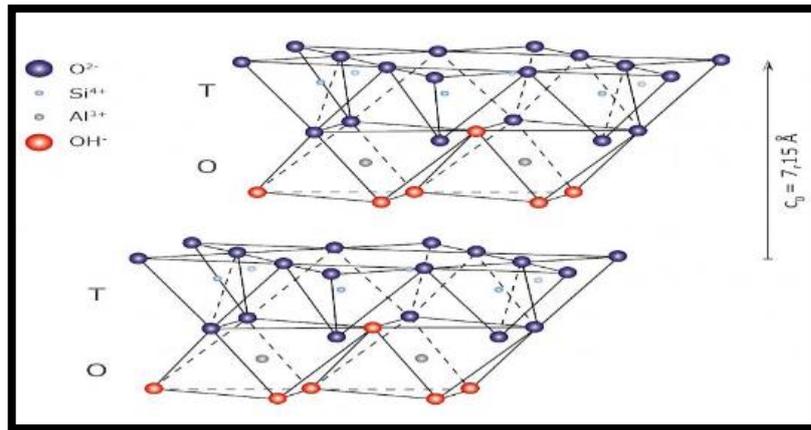


Figure II.2: Minéraux argileux de type 1:1.

II.7.2 Minéraux de type 2:1 (ou T-O-T):

Ils correspondent à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques. L'équidistance caractéristique varie de [9,4 à 15 Å], selon la dimension de l'espace inter foliaire (espace entre deux feuillets consécutifs). A ce type correspondent les groupes du talc, des smectites, des vermiculites et des micas.

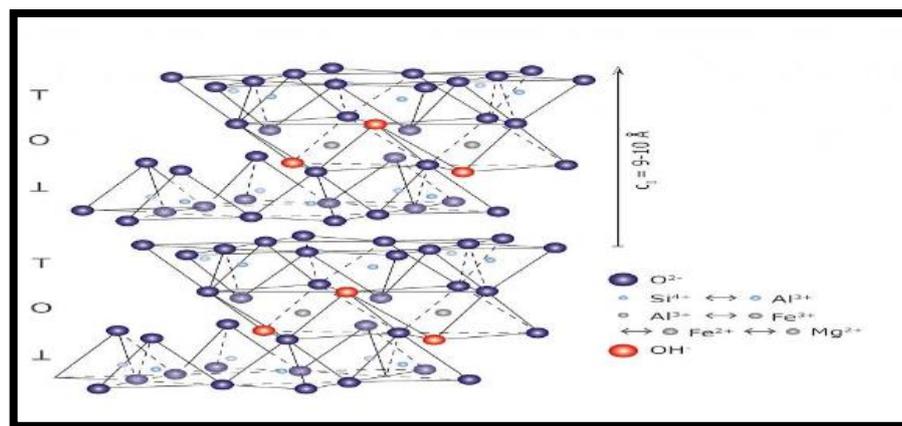


Figure II.3: Minéraux argileux de type 2:1.

II.7.3 Minéraux argileux dits 2:1:1 ou TOTO: ils ont une couche octaédrique encadrée par deux couches tétraédriques, l'espace interfoliaire étant occupé par une couche d'octaèdres. Ce groupe de minéraux argileux exhibe une équidistance d'environ 14 Å.

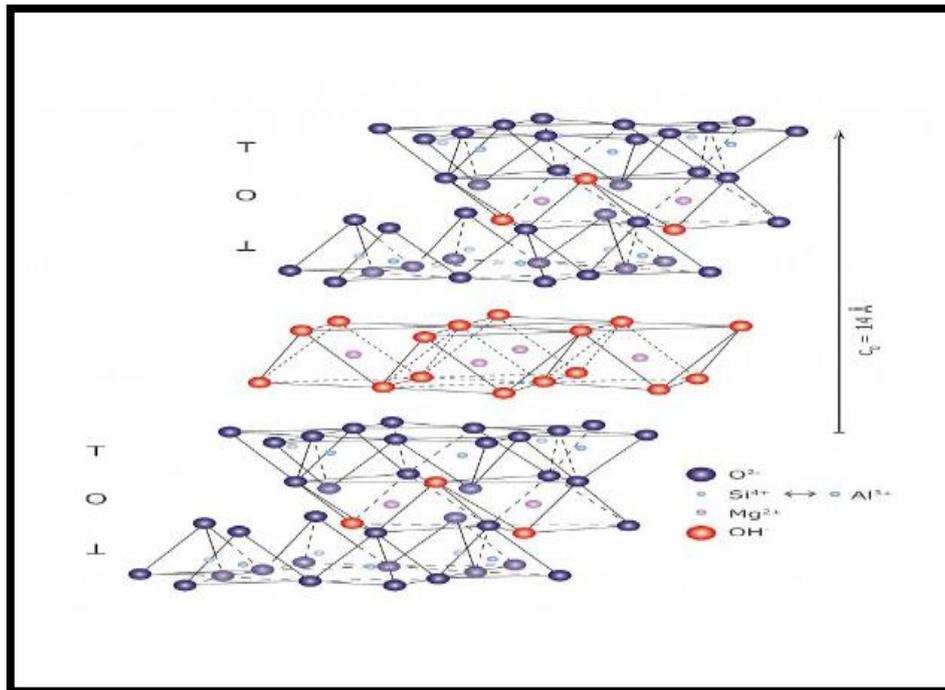


Figure II.4: Minéraux argileux de type 2:1:1.

II.7.4 Minéraux inter stratifiés: Selon leur classement, on considère un minéral inter stratifié contenant deux feuillets A et B, on peut en envisager trois types:

- d1- Ségrégés: une particule donnée présente des séquences AAABBB.
- d2- Réguliers: une particule donnée comporte des séquences ABABAB...AB.
- d3- Aléatoires : les cas intermédiaires entre les deux décrits précédemment.

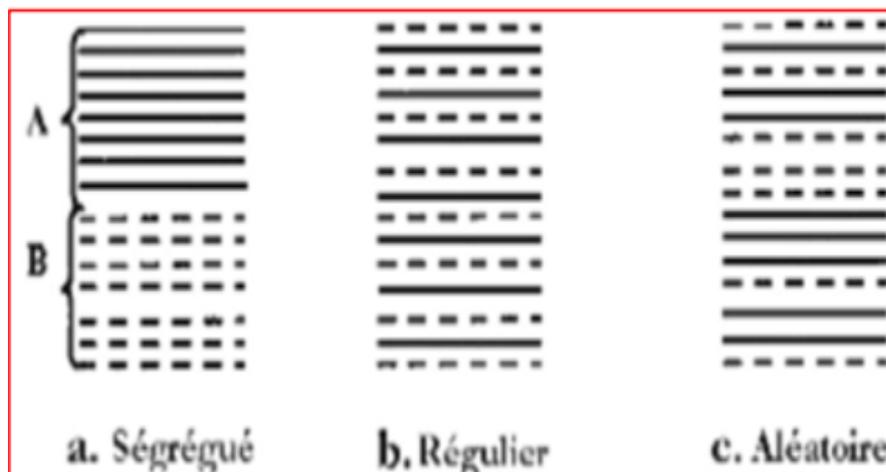


Figure II.5: Minéraux argileux inter stratifiés régulier et irrégulier. [26]

II.7.5 Minéraux fibreuses

Les argiles fibreuses (la sépiolite et la palygorskite) ont une structure en ruban. Elles présentent des propriétés de plasticité qui peuvent dépasser celles des smectite. [27]

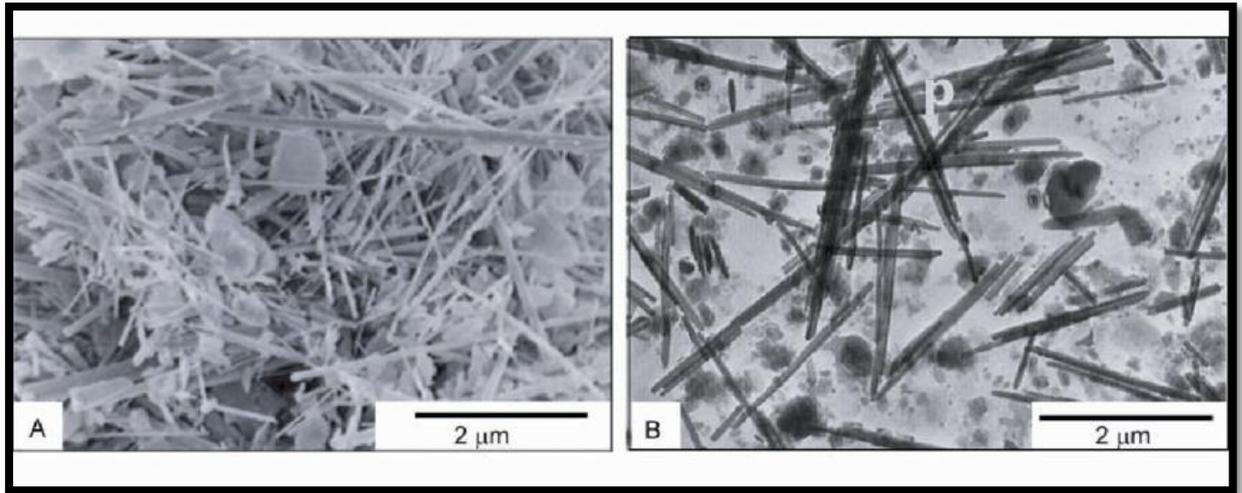


Figure II.6: Minéraux argileux fibreux.

- Tableau suivant résume la classification des argiles:

Tableau II.1: classification des phyllo silicates. [28]

Type	Groupe	Sous-groupe	Espèces	Formules
1 :1	Kaolinites	Kaolinites	Dichite, nacrite Kaolinite Métahalloysitehalloysite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, $4H_2O$
		Serpentine	Antigorite	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$,
	Talc	Pyrophyllite	Pyrophyllite	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$,
		Talc	Talc	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$,
	Smectites	Smectites Dioctaédriques	Montmorillonite	(Al, 67Mg0, 33) $Si_4O_{10}(OH)$
		Smectitestrioctaédriques	Saponite	$Mg_3 (Si_3, 67Al_{10},$ $33) O_{10}(OH)_2$
2 :1	Vermiculites	Vermiculites Dioctaédrique	Vermiculites Dioctaédrique	(Al, Fe...) ₂ (Si, Al) ₄ $O_{10}(OH)_2$
		Micas Dioctaédrique	Muscovite	$KA_{12} (Si_{3}Al)$ $O_{10}(OH)_2$
		Micas Trioctaédrique	Phlogopite	$KMg_3 (Si_{3}Al)$ $O_{10}(OH)_2$
2 :1 :1	Chlorite	Chlorite trioctaédrique	Espèces différentes	(Mg, Fe...) ₆ (Si, Al) ₄ $O_{10}(OH)_8$

II.8 Les argiles calcinées comme ajouts cimentaires:**II.8.1 La calcination:**

La calcination des argiles consiste à les mettre sous l'effet des hautes températures (400 - 900°C) pendant quelques heures (2 à 5 h). L'argile, vue sa variété minéralogique, peut connaître plusieurs phénomènes à l'occasion de sa calcination : l'évaporation de l'eau libre [29], la transformation du Quartz α en Quartz β [30], la dés hydroxylation des phyllo silicates, la décomposition des matières organiques, la décarbonatation des carbonates...etc. C'est principalement le phénomène de déshydroxylation qu'on vise à travers toute calcination. Il s'agit d'arracher l'eau chimiquement liée que comportent les minéraux phylliteux d'une argile. Ces molécules d'eau proviennent des groupements d'hydroxyle (O-H) que contiennent les tétraèdres de silice et les octaèdres d'alumine, composants élémentaires des minéraux phylliteux. C'est après leur dés hydroxylation que les oxydes, SiO_2 et Al_2O_3 , deviennent réactifs et peuvent réagir avec la chaux dans une réaction qu'on nomme réaction pouzzolanique.

II.8.2. Calcination flash:

La calcination flash, est une calcination très rapide de quelques dixièmes de secondes à deux secondes environ. Le four flash présente une chambre ou un grand volume d'air circule. Le flux tourne à grande vitesse et maintient les particules en suspension, dans la partie du four où la transformation thermique est souhaitée. A la fin les particules retombent et refroidissent très rapidement. Dans leur travail San Nicolas et al. [31], expliquent le fonctionnement d'un four flash d'un producteur de méta kaolin. Au cours de la première étape, un courant d'air chaud ascendant prend l'argile séchée sur un tamis de 200 μm , d'où il est introduit dans le four de calcination (figure). Les particules d'argile tournent autour de la flamme (qui a une température comprise entre 1000 et 1200°C), quelques dixièmes de seconde, assez de temps pour atteindre 700°C, avant d'être envoyé aux cyclones de refroidissement rapide à 100°C.

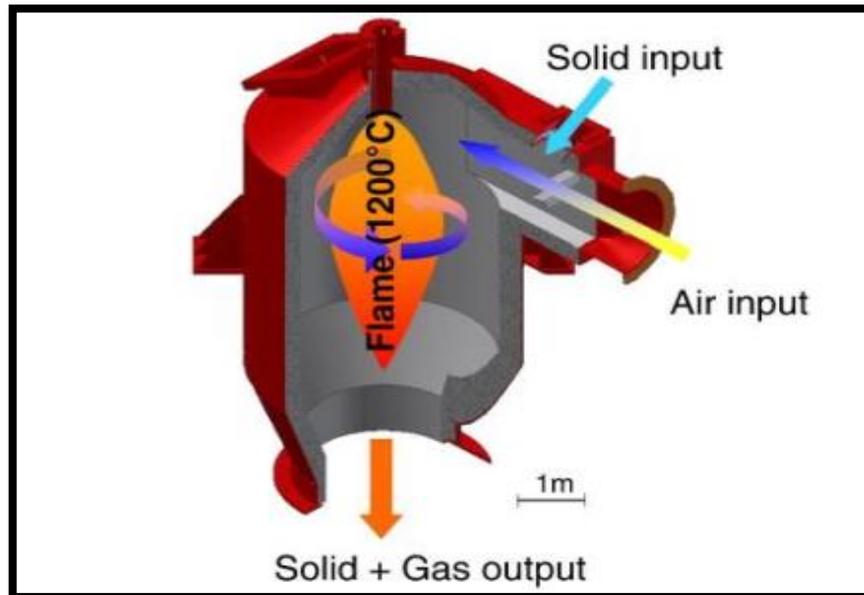


Figure II.7: Représentation d'un four flash pour la production du méta kaolin.

Bien que la cinétique de nombreuses transformations physiques et chimiques à l'intérieur d'un solide à haute température sont assez rapides, les conditions flash peuvent engendrer des transformations peuvent être incomplètes, à cause du refroidissement brusque et la gélée de la cinétique de changement [32] la forme de la matière introduite et généralement pulvérulente en suspension dans un gaz, alors que les fours rotatifs, la matière ou le solide est sous forme de boulet.

II.8.2 La calcination traditionnelle:

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

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

II.8.2.1 Les fours traditionnels:

a- Les fours à vis :

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

b- Les fours rotatifs : (figure I)

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

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

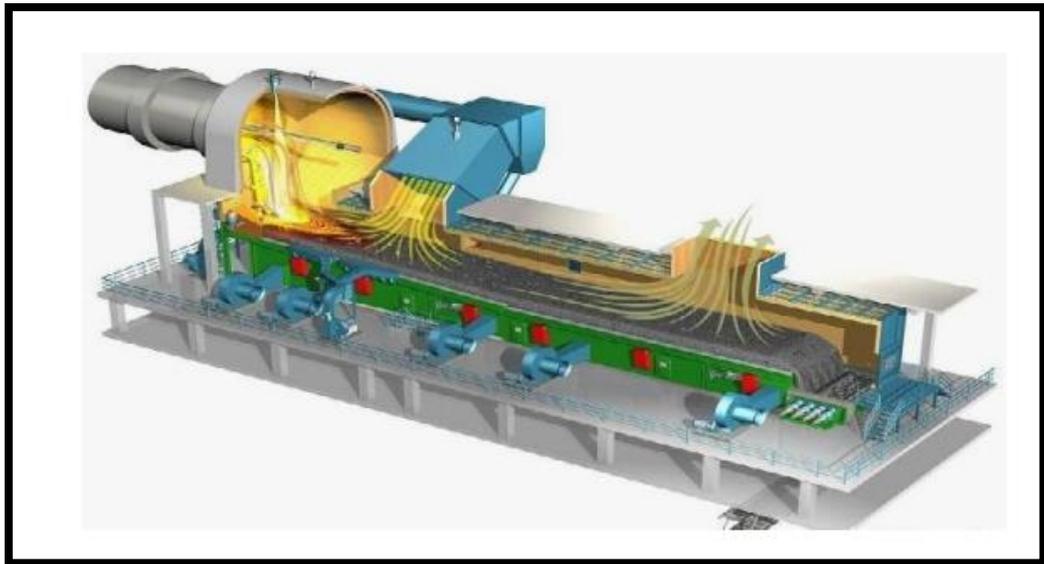


Figure II.8: Principe de fonctionnement de four rotatif.

c- Les fours à lit fluidisé

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

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

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

C'est une technique assurant une bonne calcination mais qui manque de flexibilité. En effet, elle présente une inertie très grande et exige des temps de séjour assez longs. Ces types

de fours (NESA Belgique) ont commencé à se développer avec les techniques d'incinération de boues et de déchets industriels. C'est un procédé qui permet d'obtenir une bonne stabilité des paramètres et un produit calciné très réactif.

II.8.3 Mode d'obtention:

Les pouzzolanes sont classées en deux groupes : naturelles et artificielles. Les pouzzolanes naturelles proviennent surtout des roches volcaniques dans lesquelles le constituant amorphe est le verre produit lors du refroidissement suivant la fusion. Les pouzzolanes artificielles les plus couramment utilisées sont les cendres volantes de centrales thermiques. Les fumées de silice, la bauxite calcinée. Les cendres de balles de riz et des argiles calcinées [33, 34,35] dont on décrit le processus d'obtention par calcination. Transformation thermique: un des moyens les plus utilisés pour obtenir de la pouzzolane artificielle est la calcination, dont l'analyse thermique différentielle (ATD) et le moyen adéquat pour suivre l'évolution des transformations au cours de la calcination et qui met en évidence trois phénomènes.

- **La déshydratation:** pic endothermique de faible amplitude vers 100°C, elle ne modifie en rien la structure cristallographique, mais elle permet seulement le départ de l'eau physiosorbée.
- **La déshydroxylation (phase de désorganisation) :** pic endothermique de grande amplitude vers 500°C à 700°C .A ce niveau les hydroxyles sont éliminées de la structure .Il se forme pour le kaolin une phase appelée méta kaolin, pour une argile hétérogène, il se forme une phase différente suivant les minéraux qui la compose.

[36,37] .Donc la température de décomposition dépend de la nature des minéraux, de la pression de vapeur maintenu pendant la cuisson [38,39].

C'est dans cette phase que l'argile devient amorphe et par conséquent pouzzolanique. La réaction globale de déshydratation pour la kaolinite peut se schématiser comme suit.



- **La recristallisation :** pic exothermique vers 900°C à 1200°C. Le matériau passe d'une phase amorphe à une phase de recristallisation suivi d'un changement de la nature initiale des minéraux .l'argile dans cette phase devient inerte .le méta kaolin subit dans cette phase un réarrangement structurel, elle se transforme en mullite de forme $3\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2$ [40, 41,29].

II.8.4 Transformation des argiles pendant un traitement thermique :

En 1887, le Chatelier, lors de ses recherches sur les argiles, montra qu'on pouvait se baser sur les anomalies thermiques qui se présentent en cours d'échauffement pour établir une classification des minéraux. Il supposait une série de transformations qui dépendaient de la structure d'origine, variant de 150 à 770°C. Selon les gammes de déshydratation, le Chatelier a tenté une classification de l'argile comme exemple les minéraux hydratés, en distinguant cinq catégories. Mais cette procédure reposait sur des preuves très minces.

En 1910, H.E. Ashley a noté que la perte d'eau colloïdale peut se poursuivre jusqu'à 300°C. Entre 500 et 575 °C, l'eau combinée est expulsée. Dans la même année J.W. Mellor et A.D. Holdcroft ont constatés que la déshydratation de l'argile n'a pas de température fixe, mais que la décomposition est appréciable à 500 °C[31].

En 1927 à Paris, J. Orcel appliquait la procédure thermique différentielle dans sa forme moderne à l'étude des minéraux argileux. Depuis ce temps cette procédure a été utilisée dans l'étude des argiles par de nombreux chercheurs dans de nombreux pays différents. En 1945 S. Spiel et al. ont tracés une courbe thermique différentielle pour la kaolinite (figure). La réaction endothermique entre environ 500°C et 700 °C correspond évidemment à la déshydratation de la matière minérale [42].

II.8.5 Composition minéralogique :

L'analyse minéralogique a pour but l'identification et le dosage des minéraux. Elle apporte des renseignements sur le mode de combinaison des éléments. Si toutes fois la reconnaissance de la composition chimique est aisée. Il n'est pas facile d'identifier les espèces minérales en raison de la complexité de leurs mélanges, on peut trouver plus d'un minéral qui présente une intensité de pic (raie) principale identique à un autre. Voinovith [42]. En effet un minéral peut être caractérisé par:

Sa structure cristalline : qui est un arrangement des atomes dans un réseau géométrique régulier (le kaolin en feuillet à double couche $e=7\text{Å}$).

- Sa morphologie : qui est la taille et la forme des particules ainsi que les défauts (dislocation, Joints de grains, etc.) qui peuvent être déterminés par le microscope électronique.
- Sa micro- composition élémentaire approchée qui peut être déterminée par le Microscope électronique à balayage équipé d'un spectromètre X d'après Terrier [42].

II.9 Objectifs de la calcination de l'argile:

L'objectif de ce procédé est d'obtenir un matériau réactif des hydroxylé et amorphisé tout en évitant d'éventuelles recristallisations qui entraineraient alors une diminution de l'activité pouzzolanique. Il y a une température de calcination différente en fonction du type d'argile utilisée comme pouzzolane : Fernandez et al. [43] préconisent une température de calcination de l'ordre de 800°C pour un échantillon riche en kaolinite (48,76% de kaolinite ; impuretés de quartz et oxyhydroxide de fer). Hollanders et al. [43] ont calciné une illite pure à 900°C car une amorphisation complète ne peut être atteinte à des températures inférieures. Danner et al. [44] ont calciné un échantillon de montmorillonite (54% montmorillonite, 8% kaolinite, 4% illite, 25% calcite, et des impuretés) à 800°C. La figure 1-10 présente les courbes d'analyse thermo-différentielle de minéraux argileux communs et de la gibbsite:

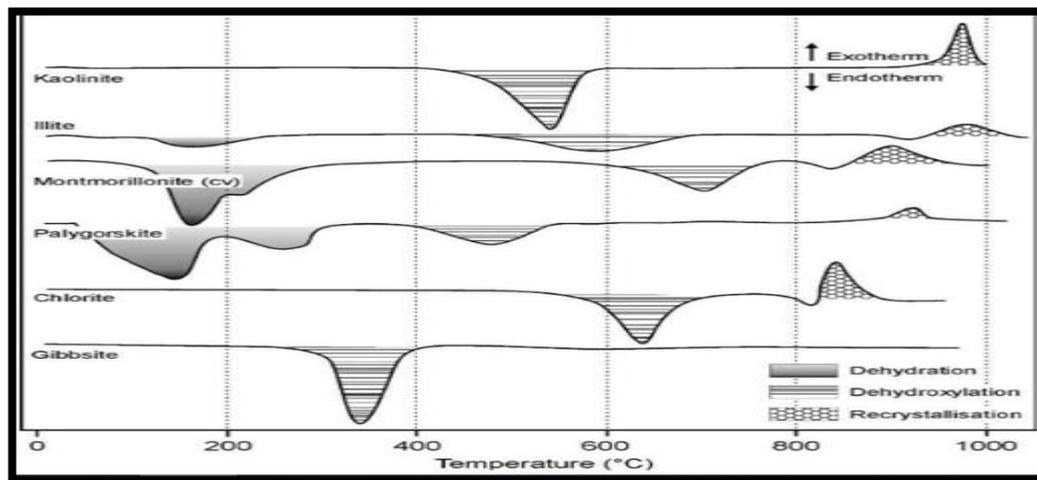


Figure II.9: Courbes d'analyse thermo-différentielle de minéraux argileux communs et de la gibbsite [43].

II.10 Domaine d'utilisation :

Les propriétés des argiles ont été reconnues et utilisées depuis la plus haute antiquité. Nos ancêtres de la préhistoire fabriquaient des poteries rudimentaires et des outils en silex [44].

II.10.1 Matériaux de construction :

L'argile calcinée est la matière première principale avec quelques additions de sable, de chamotte comme fondant dans la fabrication des briques, tuiles et céramiques [41]. Les argiles peu fusibles sont réfractaires entre 1350 à 1580°C servent pour la fabrication des briques, des carreaux de sol et les tuyaux d'évacuations [45]. Les argiles fusibles sont réfractaires au-dessous de 1350°C servent pour la fabrication des briques, et tuiles [45]

II.10.2 Utilisation générale:

La composition d'une solution saline est modifiée au contact d'argile; des cations "disparaissent" et sont remplacés par d'autres empruntés à l'origine elle-même; c'est le phénomène d'échange de cations. Les argiles, servent aussi à diluer les pesticides utilisés en agriculture lors de leur épandage. Le pesticide, doit atteindre sa cible sans être décomposé par l'argile pendant les étapes suivantes; production, transport, stockage et application. Les argiles du groupe des smectites (montmorillonite) ou encore la sépiolite et la palygorskite sont utilisées dans l'industrie pour leur propriété d'absorption et d'adsorption:

- Absorption des huiles et graisses (sols des garages; d'usines, ...), dégraissage.
- Décoloration des huiles et usage comme liant pour les aliments du bétail.
- Usages pharmaceutiques (excipients, pansements gastro-intestinaux,...).
- Boues de forage en milieu salin, engrais en suspensions.
- Les interstratifiés smectite -kaolinite servent en fonderie comme liant des sables de Moulage²⁷
- De nombreux travaux ont montré que les argiles possèdent aussi des propriétés catalytiques.

On retiendra:

- Les catalyseurs argileux dans le cracking des produits pétroliers.
- Les propriétés catalytiques de la montmorillonite dans la formation des aminoacides et dans leur polymérisation en peptides.
- Les essais de polymérisation du benzène en polyparaphénylène dans une Montmorillonite.
- Les tentatives de polymérisation du styrène du méthacrylate de méthyle et d'autres Composés organiques non saturés sur les surfaces de certains minéraux argileux. De L'étude comparative des activités catalytiques de divers minéraux argileux Sur La polymérisation du styrène, il ressort que la kaolinite, la palygorskite et certains mélanges kaolinite - palygorskite- illite- montmorillonite donnent des résultats satisfaisants.
- Les argiles kaolin tiques non modifiées ont un caractère semi -renforteur des gommés naturelles ce pouvoir est d'autant plus grand que les argiles utilisées sont pures et bien cristallisées. La teneur en kaolinite est favorable au semi renforcement tandis que les teneurs en quartz et en mica lui sont défavorables.
- L'industrie papetière a connue depuis une cinquantaine d'années, un développement Considérable qui la place au premier rang des consommateurs de kaolins,. En papeterie l'utilisation se répartit entre les kaolins de masse, servant à améliorer les propriétés optiques de

la trame cellulosique et les kaolins de couchage qui assurent la qualité et l'aspect esthétique de l'impression. Plus récemment sont apparus les cartons couchés dans la fabrication d'emballages supports publicitaires.

- Les industries céramiques du bâtiment sont utilisatrices d'argiles kaoliniques, les carreaux de grés céramique par exemple sont soumis à des conditions d'utilisation particulières, on recherche alors une résistance mécanique élevée et une bonne régularité des produits [44].

II.11 Rôle de l'argile calcinée:

La structure amorphe de l'argile calcinée entre 600 et 850°C, lui acquiert des propriétés pouzzolaniques. Un remplacement d'un pourcentage du ciment portland dans les mortiers et les bétons peut être envisagé, car la rend capable de réagir avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment portland pour produire des hydrates de nature proche de ceux du ciment qui contribuent à l'augmentation de la résistance mécanique. La calcination d'une argile constituée d'un réseau cristallin très désorganisé, conduit à de bonnes performances pouzzolanique [38, 39, 46]. L'activité pouzzolanique augmente avec l'amorphisation du réseau minéralogique de l'argile calcinée.

II.12 La réaction pouzzolanique:

L'argile calcinée ainsi produite peut ensuite, en présence d'eau, se dissoudre, et les éléments chimiques libérés se combiner avec la portlandite (CH) issue de la réaction d'hydratation du ciment afin de former des hydrates (C-(A)-S-H) : silicates de calcium et d'aluminium hydratés) responsables du durcissement. Scrivener et al. [38] ont décrit la réaction (cf figure 1-12), où S représente la source de silicium et A la source d'aluminium issues de l'argile calcinée :

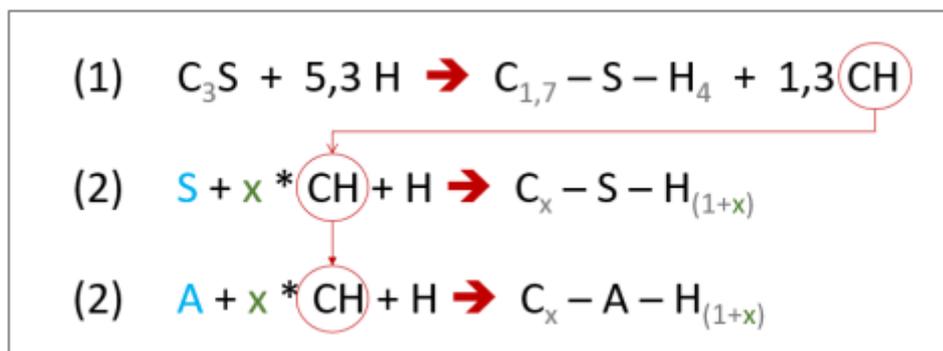


Figure II.10: Schéma réactionnel de la réaction pouzzolanique (adapté de Scrivener et al).

[43]

La source de silicium (S) et la source d'aluminium (A) issues de l'argile calcinée vont réagir avec le calcium de la portlandite (CH) pour former des C-S-H, des C-A-H et des C-A-S-H. Les hydrates produits au cours de cette réaction pouzzolanique vont participer à la cohésion interne du ciment et permettre l'amélioration des propriétés mécaniques.

Cet ajout de pouzzolane permet de réduire la chaleur d'hydratation ce qui se traduit par une diminution de la fissuration. A l'état durci, la consommation de la portlandite et la formation de nouveaux hydrates permet une réduction de la porosité de la matrice et par conséquent une augmentation de la compacité du ciment. Le ciment produit sera plus durable d'une manière générale et particulièrement résistant contre les attaques de sulfates, chlorures et autres agressions chimiques

II.12.1 Réactivité pouzzolanique des argiles calcinées :

Les argiles calcinées (déchet de briques) se distinguent par une vitesse de réaction plus rapide et par une réactivité plus élevée avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment portland [38,46]. Les composés ainsi formés, par exemple, les C-S-H et les hydrates aluminosilicates [35,42] ont pour effet de diminuer la porosité des mortiers et des bétons, ce qui favorise la durabilité des ouvrages. La consommation de l'hydroxyde de calcium par le déchet de briques permet également de supprimer le phénomène des efflorescences. Dans un premier temps on a choisi de rappeler la définition et les méthodes de mesure de l'activité pouzzolanique Parmi.

Celle-ci :

- Déterminations chimiques (L'indice d'activité Chapelle).
- Méthodes physiques (taux de vitrification des minéraux).
- Essais mécaniques et analyses chimiques.

II.12.2 Méthodes d'évaluation de la réactivité pouzzolanique

L'augmentation de la réactivité pouzzolanique engendrée par l'étape de calcination des minéraux argileux va être primordiale pour les performances mécaniques et la durabilité du ciment composé final. Il est donc important de pouvoir caractériser de manière précise la réactivité pouzzolanique d'une argile calcinée.

Il existe différentes méthodes normalisées pour l'évaluation de la réactivité pouzzolanique qui se basent sur différents paramètres tels que la consommation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, la résistance à la compression ou encore la chaleur dégagée

II.12.2.1 L'essai Chapelle modifié:

L'essai Chapelle modifié provient de la norme française NF P18-513 [38]. La figure II-11 présente le montage expérimental de ce test [38] :

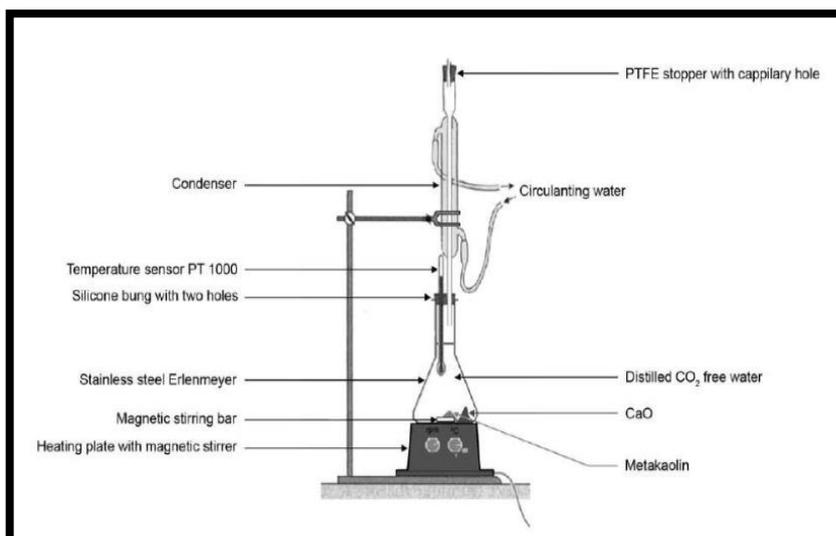


Figure II.11: Montage expérimental de l'essai Chapelle modifié. [43]

Le principe consiste à mélanger 1g de pouzzolane avec 2g de de CaO dans 250 ml d'eau distillée. La suspension est ensuite placée sous agitation magnétique et chauffée à 85°C (+/-5°C) durant 16h. Après 16h, la solution est refroidie et titrée à l'acide pour déterminer la quantité de Ca(OH)₂ restante. La quantité de Ca(OH)₂ consommée par la pouzzolane et les résultats sont exprimés en mg Ca(OH)₂ fixé /g de pouzzolane. La norme précise que pour être considérée comme active une pouzzolane doit obtenir une valeur d'au moins 700 mg Ca(OH)₂ fixé /g de pouzzolane. Ferraz et al [43] se sont intéressés à 6 méta kaolins commerciaux et ont trouvés des valeurs comprises entre 920 et 1560 mg Ca(OH)₂ fixé /g de méta kaolin. Ayati et al [43] ont calciné une argile naturelle (contenant 31% de smectite et 11% d'illite) à 850°C et ont obtenu une valeur de 600 mg Ca(OH)₂ fixé/g de pouzzolane, ce qui est en dessous du seuil minimum fixé par la norme.

Le principal problème de ce test réside dans le fait qu'il se base sur la consommation de Ca(OH)₂ dans de l'eau distillée. Or les conditions en milieu cimentaire (là où va se dérouler la réaction pouzzolanique) sont différentes. La solution interstitielle riche en alcalins qui est présente en milieu cimentaire va avoir une influence sur la cinétique de cette réaction pouzzolanique, par conséquent, l'essai Chapelle modifié pourrait ne pas donner des résultats réalistes [43].

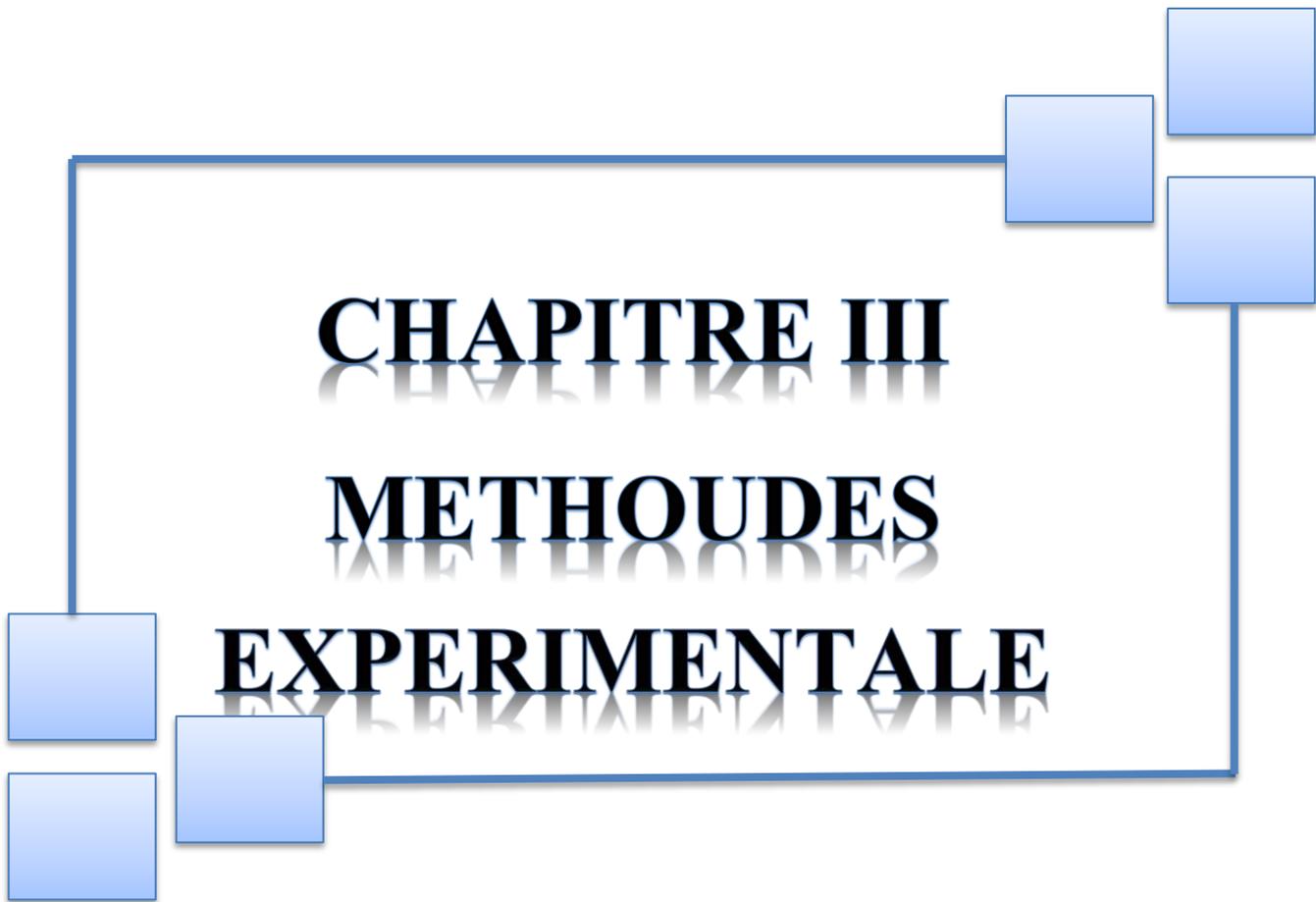
II.12.3 Lien structure - modifications physico-chimiques - réactivité pouzzolanique:

Différents facteurs vont influencer la dés hydroxylation et la réactivité pouzzolanique. Le premier est le type d'argile. Une argile TO telle que la kaolinite va avoir des groupements AlOH octaédriques directement exposés, ce qui va avoir pour conséquence de faciliter la dés hydroxylation. Pour les argiles TOT telles que les smectites et les illites, la dés hydroxylation

va être beaucoup plus difficile que pour les argiles TO. En effet, les groupements Al-OH sont bloqués par les deux feuillets tétraédriques, rendant beaucoup plus compliqué leur dés hydroxylation. C'est cette différence structurale qui explique les différences de sensibilité au traitement thermique et de réactivité entre une argile TO et une argile TOT [43].

II.13 Conclusion :

Dans la conclusion, l'argile calcinée joue un rôle crucial dans la recherche de solutions durables pour la construction et d'autres industries. Son développement et son utilisation à grande échelle contribueront à réduire la consommation de ciment dans ces secteurs et à promouvoir une économie circulaire plus respectueuse de la planète.



CHAPITRE III
METHODES
EXPERIMENTALE

III.1. Introduction:

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude détaillée des propriétés des matériaux, en appliquant des expériences de compression et de tension au béton pour vérifier sa qualité et sa dureté.

Le choix des matériaux s'est porté sur leur disponibilité dans la région de TIARET.

Les matériaux utilisés sont:

- Un sable «Geulta».
- Un gravier de deux fractions (3/8) et (8/15) dans la région de Tiaret.
- Un ciment CIM1 42.5 (MOKAOUEM).
- Eau de gâchage : c'est l'eau potable du laboratoire.
- Argile calcinée.

Les essais que nous avons fait est:

- Analyse granulométrique.
- La masse volumique absolue.
- La masse volumique apparente.
- Equivalent de sable.
- Analyse chimique

Cette analyse a été réalisée au laboratoire de génie civil de l'université « IBN KHALDOUN – TIARET » et d'autres essais ont été réalisés dans le laboratoire L.T.P.O de TIARET.



Figure III.1: les matériaux.

III.2. Caractéristique des matériaux:**III.2.1. Le ciment:**

MOUKAOUM-PLUS est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland compos, NA 442 -CEM I 42,5 N-SR3 selon la NA 442 v 2013 et la EN 197-1 Il est conforme à la norme nationale NA 442 v 2013 et à la norme Européenne EN 197-1 avec un taux en C3A < 3%. (cf. fiche technique Annexe A)



Figure III.2: Le ciment utilisé CEM I/A 42,5.

III.2.1.1. Détermination de la consistance de la pâte de ciment :**✓ Essais sur la pâte de ciment (Essai de consistance)****➤ Essais de prise [EN 196-3] :**

Déterminer les temps de début et de fin de prise des pâtes pures des ciments étudiés conformément à la norme EN 196-3.

➤ Principe de l'essai :

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte de consistance normalisée avec échauffement. L'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipée d'une aiguille de Vicat. Quand la partie mobile est libérée l'aiguille s'arrête à une distance **d** du fond du moule telle que **d = 4mm ± 1mm**.

La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide, le moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte que de 0,5mm.

Matériaux et méthode

• Équipement nécessaire utilisé

1. Une armoire maintenue d'une manière continue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 90%
2. Appareil de Vicat est équipé de :
3. une aiguille de 1,13mm + porte aiguille
4. masse mobile de 1000g (partie mobile 300g + masse 700g).

• Conduite de l'essai

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme [EN 196-3] :

1. confectionner une pâte normalisée. Le temps zéro est celui où le ciment a fini d'être ajouté à l'eau dans la cuve du malaxeur. La consistance recherchée de la pâte, une fois atteinte, la pâte est introduite dans le moule tronconique comme indiquée pour l'essai de consistance;
2. Remplir le moule tronconique, et araser la face supérieure ;
3. Mettre le moule dans l'armoire en attendant, que la prise soit commencée ;
4. Quand le moment supposé du début de prise approche, on fait sortir le moule de l'armoire et on le met sur le socle de l'appareil
5. Immobiliser l'aiguille au contact de la pâte;
6. Libérer la partie mobile sans vitesse initiale
7. Relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base ;
8. si l'arrêt se produit à une distance $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$; La prise est commencée ;
9. si non, on retourne le moule dans l'armoire qu'on le sortira qu'à intervalles de temps convenablement espacés jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$.
10. On retourne le moule tronconique utilisé pour la détermination du début de prise de façon que les essais de fin de prise soient faits sur la face du moule en contact avec la plaque de base (voir la **figure III.3**)

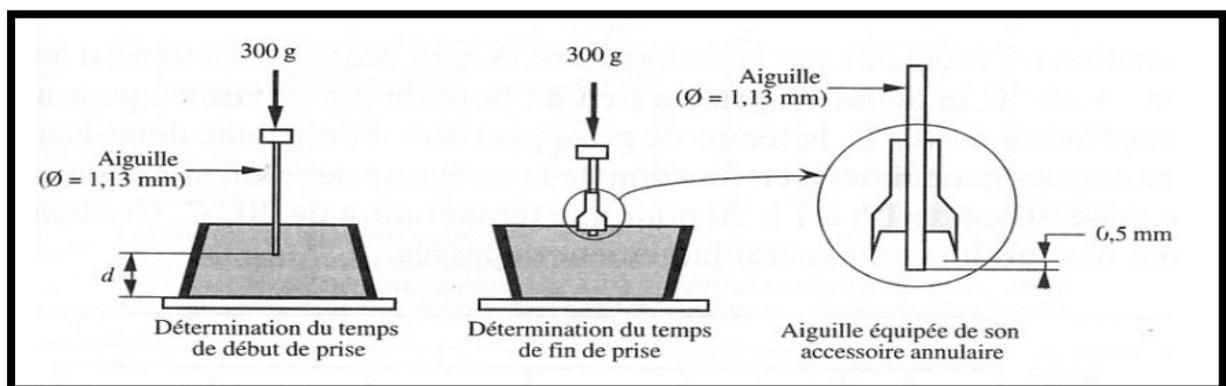


Figure III.3: Essai de prise.



Figure III.4: Appareil de Vicat.

Tableau III.1: Les résultats d'essais de consistance.

	Masse de ciment (g)	Masse d'eau (g)	d (mm)
Essai 1	500	130	10
Essai 2	500	125	5

- Ces résultats sont cohérents avec son inclusion dans la fiche technique de ciment.

III.2.2. Essais sur les granulats :

III.2.2.1. Le sable :

- Le sable qu'on a utilisé c'est un sable naturel « ELGEULTA » (Région de Tiaret).

III.2.2.1.1. Les caractéristiques physiques :

Il est nécessaire de déterminer toutes les caractéristiques physiques pour le sable naturel.

➤ Masse volumique :

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

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

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

a) Masse volumique apparente (γ):

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



Figure III.5: La masse volumique apparente (labo de génie civil).

➤ Mode opératoire:

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

- Peser le récipient à vide M_1 .
- On verse le gravier d'une hauteur de 10 cm dans un récipient de poids M_1
- On remplit le récipient de gravier arasé au niveau de séparé supérieure par une réglette
- On pèse le récipient avec le gravier on le poids M_2

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

M_1 : Masse de récipient

M_2 : Masse de récipient + gravier

V : Volume du récipient

Tableau III.2: Masse volumique apparente du sable.

Essai	M_1 (g)	M_2 (g)	γ_{app} (g/cm ³)
	1476	456	1.02

b. La masse volumique absolue (ρ):

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

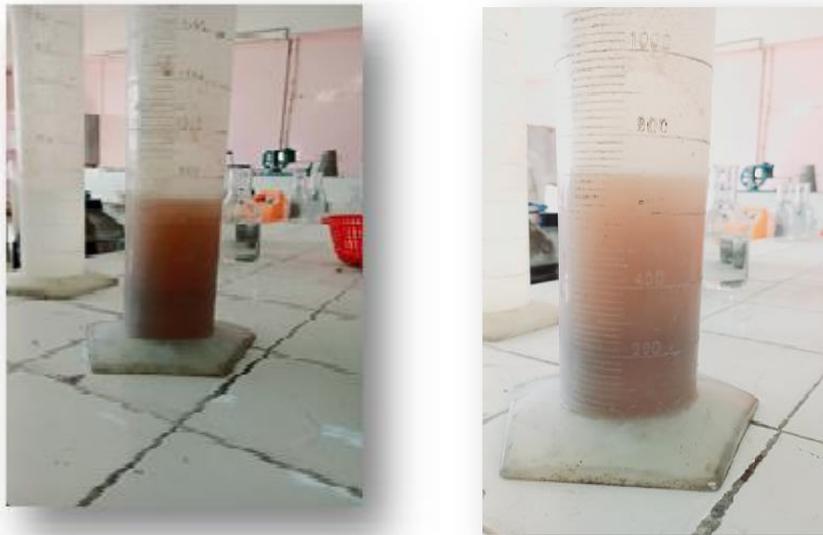


Figure III.6: La masse volumique absolue.

➤ Mode opératoire:

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume ρ_0 D'eau.
- Peser Un échantillon sec ρ_1 De granulats et l'introduire dans l'éprouvette en primant soin d'éliminer tous les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette, lire le poids de l'ensemble ρ_2 .
- La masse volumique est alors

$$\rho_g = \frac{\rho_1 \times \rho_2}{(\rho_0)}$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau III.3: Résultats de la masse volumique absolue « sable ».		
Masse volumique	Mesures	Essai
Absolue	Volume d'eau V1 (ml)	600
	Masse de l'échantillon M1(g)	300
	Volume d'échantillon V2 (ml)	705
	Masse volumique absolu $M/V_{aps}(g/cm^3)$	2.85

III.2.2.1.2. Analyses granulométrique [NA EN 933-1]:

❖ But de l'essai:

Permettre la détermination de la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

❖ Principe de l'essai:

Faire passer l'échantillon tester à travers une série des tamis décroissante de plus grand à plus petit, et faire peser le refus dans chaque tamis.

❖ Mode opératoire:

Le mode opératoire est identique à celui précédemment dans la partie graviers, la seule différence est la durée de l'essai qu'elle été 3 minute dans le cas des sables.



Figure III.7: Essai de l'analyse granulométrique du sable.

Les résultats de l'analyse granulométrique sur le sable concasse sont présentes sur la courbe suivante:

Tableau III.4: l'analyse granulométrique du Geulta.

Tamis (mm)	Refus Tamisât Partiel (g)	Refus Tamisât cumule (g)	Refus cumule (%)	Tamisât Cumule (%)
5	0	0	0	0
4	0	0	0	100
2.5	15	15	1	99
2	4	19	1.2	98.80
1.25	12	31	2	98
0.63	41	72	4.8	95.20
0.315	643	715	47.6	52.452
0.16	580	1295	86.3	13.7
0.125	107	1402	93.4	6.6
0.08	71	1473	98.2	11.8
Fond	28	1500	100	0

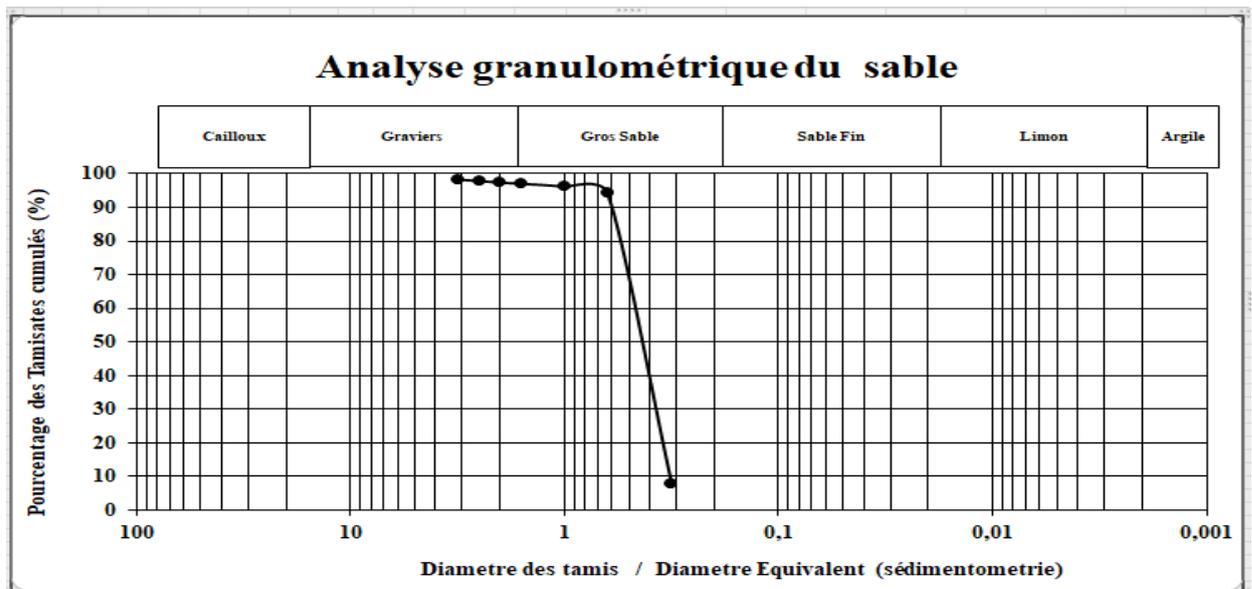


Figure III.8: Analyse granulométrique du sable.

❖ **Modules de finesse [NA EN 12620]:**

Le module de finesse d'un sable est égal au 1/100 de la somme de refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis.

Quantité du sable	Module de finesse
Gros	>2.8
Moyen	2.20 à 2.80
Fin	1.8 à 2.20
Très fin	1 à 1.8

$$MF = \Sigma R_i/100$$

$$MF = \frac{1}{100} \Sigma (\text{refus cumulés en \% des tamis } \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\})$$

$$Mf = \frac{0.16;0.315;0.63;1.25;2.5;5}{100} = \Sigma \frac{R_i}{100}$$

$$Mf = \frac{86.3+47.6+4.8+2+1+0}{100} = 1.4 \Rightarrow Mf = 1.4$$

Après l'analyse granulométrique on trouve que, le module de finesse du sable testé est égal à:

$Mf=1.4$; {1 à 1.80} \Rightarrow C'est un sable **très fin**.

III.2.2.1.3 Essai d'équivalent de sable

But de l'essai :

Cet essai est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons, l'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers.

Une procédure normalisée permet de déterminer le coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

Principe de l'essai:

L'essai est effectué sur la fraction 0/2 mm du matériau 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.
- On en déduit la valeur de l'équivalent de sable par l'équation suivante:

$$ES = \frac{h_1}{h_2} \times 100$$

- Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine E_{sv} (équivalent de sable visuel) ou E_{sp} (équivalent de sable au piston).

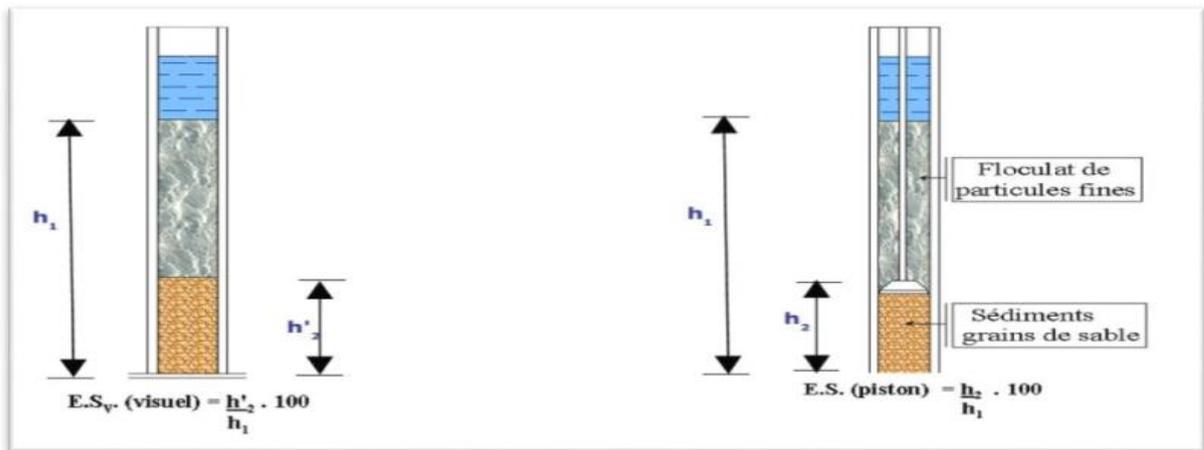


Figure III.9: Principe de l'essai d'équivalente de sable.

➤ **Mode opératoire:**

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

L'essai consiste à:

- Remplir une éprouvette graduée jusqu'au 1er trait.
- Verser la quantité de sable (environ 120 g), et laisser reposer pendant 10 min,
- Boucher l'éprouvette, et la faire agiter 90 fois aller et retours dans le sens horizontal puis replacée verticalement
- Laver le sable avec une solution lavant, et laisser reposer l'ensemble pendant 20 min,
- Mesurer la hauteur du sable propre (h_2) et la hauteur du sable propre + éléments fins (h_1), La mesure de h_2 n'est pas toujours aisée, ce qui conduit à faire la mesure la plus précise: ES.
- Descendre lentement le piston dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, l'immobiliser, mesurer h_2 .

L'équivalent de sable visuel (ESV) est défini par:

$$ESV = \frac{h'_2}{h_1} \times 100 \%$$

L'équivalent de sable est défini par: $ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \%$



Figure III.10: Machine d'agitation (mouvement rectiligne horizontal).



Figure III.11: Éprouvette pour l'essai de l'équivalent de sable (ES).

Les résultats obtenus sont représenté sur le tableau suivant:

Tableau III.5: résultats d'essais d'équivalentes de sable naturel.		
	ECH1	ECH2
Mesurer h_1	26,5	26,8
Mesurer h_2	11	10,5
Mesurer h'_2	8,5	
ES(PISTON)	Es ₁ 41,5	Es ₂ 39,17
ES moyen (PISTON)	40,34	
ES (VISUEL)	Es ₁ 32,07	Es ₂ 26,11
ES moyen (VISUEL)	29,09	

D'après les résultats du tableau les valeurs de l'équivalent de sable visuel et avec piston sont respectivement de 29% et 41%, ces dernières entrent dans les fourchettes Sable argileux : risque de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.

Les valeurs courantes d'Esp et Esv

Tableau III.6: Les valeurs d'équivalent de sable indiquant la nature et qualité du sable.		
ES visuel	ES au piston	Nature et qualité de sable
ESV<65%	ES<60%	Sable argileux : risque de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.
65%<ESV<75%	60%≤ES<70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible n'a pas de conséquence notable sur la qualité de béton.
65%≤ESV<85%	70%≤ES<80%	Sable propre à faible proportion de fines argileux convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ESV ≥85%	ESP≥80%	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

III.2.3. Gravier:

Le gravier utilisé provient d'une roche calcaire de la région de Tiaret. Pour la formulation de notre béton on a choisi deux fractions, 3/8 et la fraction 8/15. Le gravier est le constituant le plus important des bétons et sa qualité est, donc, un facteur déterminant pour la qualité du béton résultant.

III.2.3.1. Les caractéristiques physiques :

Le mode opératoire et le même qui celui utilisé pour le gravier d'écrit précédemment. La masse volumique apparente du sable est déterminée par la formule :

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

M₁ : Masse de récipient vide.

M₂ : Masse de récipient plus de sable.

V : Volume du récipient (V= 1L).



Figure III.12: Essai de la masse volumique du gravier 3/8.



Figure III.13: Essai de la masse volumique du gravier 8/15.

Les résultats sont présentés dans les tableaux suivant:

Tableau III.7: Masse volumique apparente du gravier utilisée.

Essai	M_1 (g)	M_2 (g)	γ_{app} (g/cm ³)
3/8	1853	456	1.39
8/15	1933	456	1.47

b. La masse volumique absolue:

Le mode opératoire est le même que celui utilisé pour le gravier d'écrit précédemment. La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule:

$$\rho_g = \frac{\rho_1 \times \rho_2}{(\rho_0)}$$

Avec: **M=300g**



Figure III.14: Éprouvette pour l’essai de l’équivalent du gravier 3/8 et 8/15.

Les résultats sont présentés dans les tableaux suivant:

Tableau III.8: Résultats de la masse volumique absolue « gravier ».			
Masse volumique	Mesures	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Absolue	Volume d’eau V1 (ml)	600	600
	Masse de l’échantillon M1(g)	300	300
	Volume d’échantillon V2 (ml)	705	710
	Masse volumique absolu $M/V_{aps}(g/cm^3)$	2.85	2.72

III.2.3.2. Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933–5]:

But de l’essai:

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

Principe de l’essai:

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

Les masse des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableaux et sous forme graphique.

Préparation de l'échantillon pour l'essai:

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme [NA EN 933-5]. La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0.2D$, avec M exprimé en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres [47].

III.2.3.2.1.Gravier 3/8:

Selon l'analyse faite au laboratoire, on a obtenu les résultats des passants cumulés de gravie (3/8), représentés dans le tableau (III.7)

Tableau III.9: Résultat de l'analyse granulométrique de gravie (3/8).

Tamis (mm)	Refus Tamisât Partiel (g)	Refus Tamisât cumule (g)	Refus cumule (%)	Tamisât cumule (%)
12.2	0	0	0	0
10	0	0	0	100
8	17	17	0.425	99.575
6.3	1124	1141	28.525	71.475
5	456	1597	39.925	60.075
4	1142	2739	68.475	31.525
2	1164	3903	97.575	2.425
Fond	105	4000	100	0

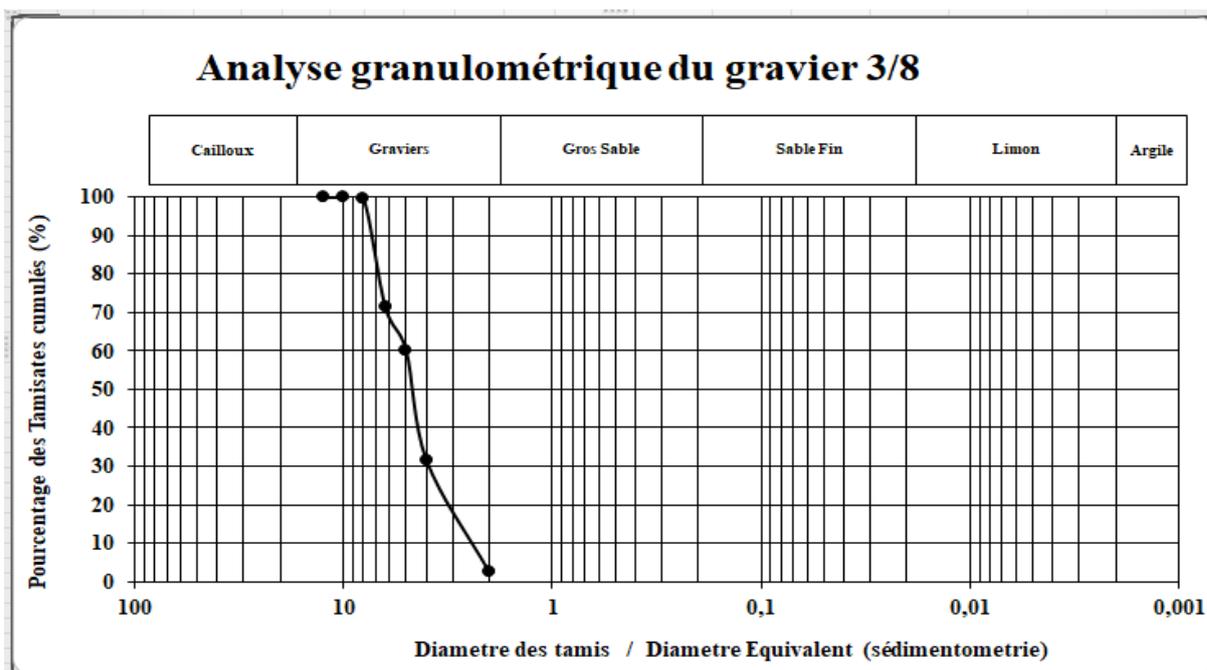


Figure III.15: Analyse granulométrique du gravier 3/8.

III.2.3.2.2.Gravier 8/15:

Selon l’analyse faite au laboratoire, on a obtenu les résultats des passants cumulés de gravie (8/15), représentés dans le tableau:

Tableau III.10: Résultat de l’analyse granulométrique de gravie (8/15).

Tamis (mm)	Refus Tamisât Partiel (g)	Refus Tamisât cumule (g)	Refus cumule (%)	Tamisât cumule (%)
20	0	0	0	100
16	453	453	11.33	88.67
12.5	1186	1639	40.97	59.03
10	1138	2777	69.42	30.58
8	699	3476	86.9	13.1
6.3	352	3828	95.7	4.3
5	103	3931	98.27	1.73
4	43	3974	99.35	0.65
2	19	3993	99.83	0.17
Fond	0	4000	100	0

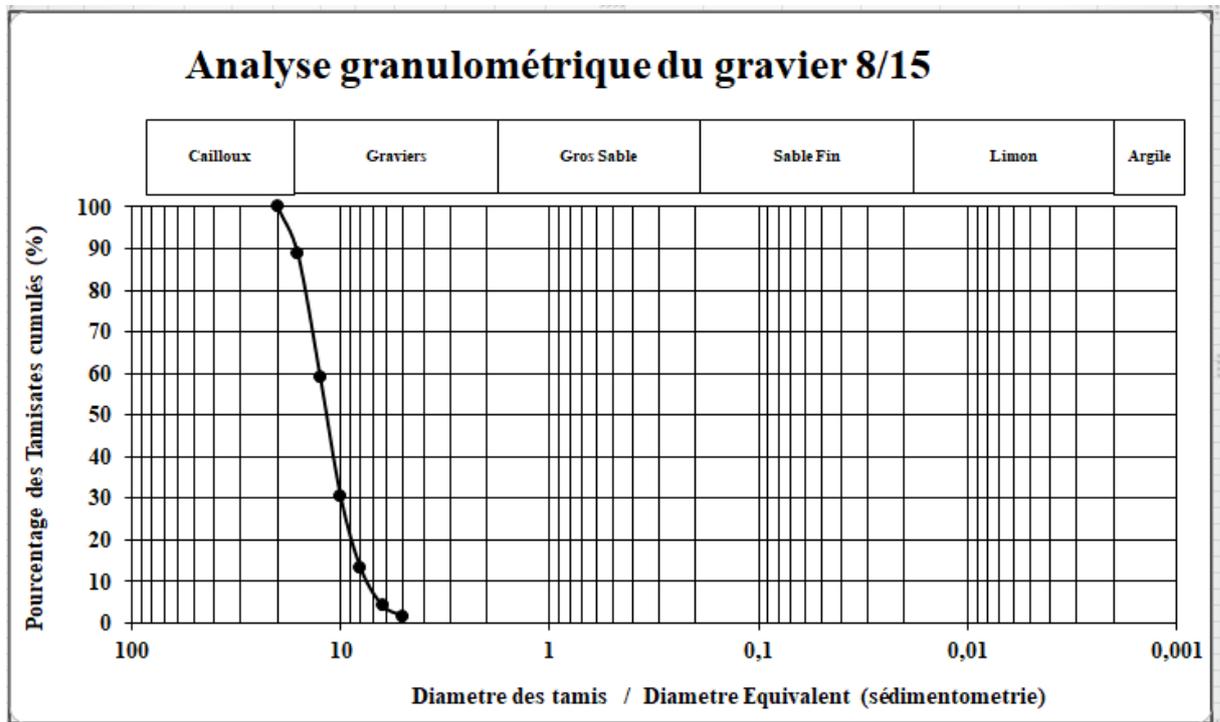


Figure III.16: Analyse granulométrique du gravier 8/15.

III.2.4.L'eau de gâchage:

L'eau utilisée dans notre étude est une eau de robinet du laboratoire génie civil de Tiaret

III.2.5. Les ajouts :

III.2.5.1. Argile brut:

Ces argiles proviennent de région Tissemsilt «Elayon» Ils ont été concassés manuellement au niveau du laboratoire de génie civil Université de Tiaret, puis broyés jusqu'à la fraction granulaire.



Figure III.17: argile brute.

III.2.5.2. Argile calcinée:

Nous avons traité 1000g d'argile à 850° C à l'aide d'un four à l'Université de «Tissemsilt» pour obtenir une argile calcinée.



Figure III.18: La calcination de l'argile.

III.2.5.3.L'analyse minéralogique DRX:

La DRX (diffraction des rayons X) est une technique de caractérisation des minéraux largement utilisée. Les diagrammes XRD peuvent être utilisés pour une compréhension approfondie de la structure cristalline, de la taille et de l'orientation, de la densité des dislocations, de l'identification, de la quantification et de la transformation des phases, des informations sur les paramètres du réseau, de la contrainte résiduelle, de la déformation et du coefficient de dilatation thermique. Les données de caractérisation minérale obtenues par XRD permettent aux spécialistes qui travaillent dans le domaine de l'exploration géochimique, de l'enrichissement des minéraux et de la métallurgie de gagner du temps et d'économiser des coûts.

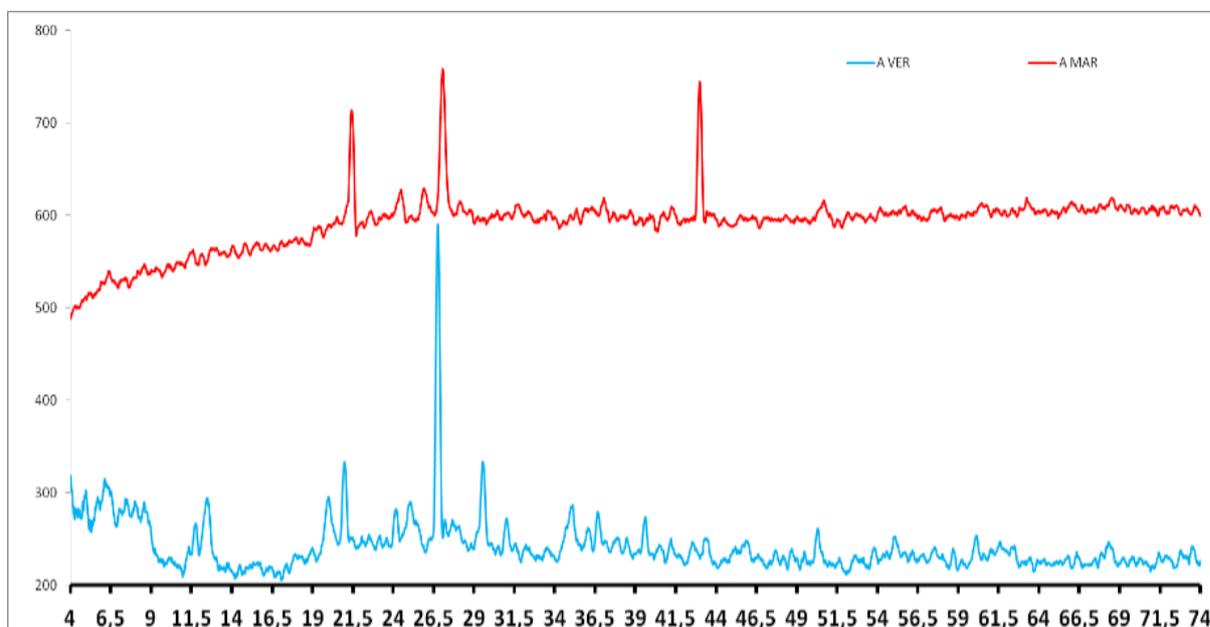
✓ Résultat:

Figure III.19 : Le Diffractogramme de l'échantillon calciné et brute.

La diffraction des rayons X (DRX) est utilisée pour estimer les principaux minéraux présents dans l'argile brute avant et après calcination.

L'analyse par diffraction des rayons X a été réalisée au Laboratoire Synthèse et Catalyse au niveau de la faculté des Sciences de la Matière. Les diffractogrammes DRX ont été obtenus à température ambiante avec un diffractomètre Rigaku, Mini Flex 600.

À partir des diffractogrammes DRX de l'A VER (avant calcination), les minéraux argileux identifiés étaient la kaolinite, l'illite et la chlorite, avec quelques traces de montmorillonite.

Les minéraux associés étaient le quartz (Q) et la calcite.

Généralement, la déshydroxylation de l'argile brute pendant le traitement thermique peut être suivie via une perte de masse et des réactions endothermiques.

Le premier pic à 500°C indique la **dés hydroxylation** de la **kaolinite** suivie d'une **dés hydroxylation partielle** des minéraux argileux inters stratifiés 2:1 (**illite-smectite et muscovite**) vers 715°C.

Vers 800°C, une perte de masse attribuée au dégagement de CO₂ issu de la **décarbonatation** partielle de la **calcite** est enregistrée.

Les pics de diffraction de la **kaolinite** (~12,47° et ~19,99°) ne sont pas présents dans l'échantillon A MAR (argile calcinée), on peut en conclure que la kaolinite a été complètement convertie en sa forme amorphe, la métakaolinite.

Réduction de la réflexion basale (~6,15°) de la **montmorillonite** passant à 2θ plus élevé (~6,4°) à en raison de l'élimination de l'eau entre les couches.

Au-delà de 800°C, les réflexions du **chlorite** disparaissent.

L'intensité de la réflexion de **l'illite** (~8,6°) se réduit, sachant tout de même que la dégradation structurelle de l'illite se produit vers 930°C.

Le **quartz** présent dans l'A VER reste inchangé après la calcination.

III.3. Formulation de béton :

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des granulats, où l'on dispose le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées pour la construction de l'ouvrage désiré [47].

Plusieurs méthodes de formulation ont été élaborées par : ABRAMS, BOLOMEY, CAQUOT, FAURY...etc.

Dans notre cas, nous avons choisi la méthode ((**DREUX-GORISSE**)) parce qu'elle est une méthode assez simple et facile à utiliser

III.3.1. La méthode de Dreux-GORISSE :

L'application de la méthode graphique de Dreux-GORISSE permet de déterminer la composition du squelette granulaire qu'est appliquée pour formuler un béton ordinaire (BO) sans addition et sans super plastifiant. [48]

La formulation des bétons relève de critères techniques, normatifs et aussi économiques comme les caractéristiques géométriques de l'ouvrage et son environnement durant son fonctionnement, les caractéristique du béton lors de sa mise en œuvre et durci, les conditions de production et de mise en œuvre du béton, les matériaux disponibles localement, les normes en vigueur.

Cette ressource s'attache dans un premier temps à présenter la démarche afin de formuler un béton ordinaire, puis une application de formulation d'un béton pour la réalisation de voiles béton armés d'un futur bâtiment d'habitation est présentée Contenu de la ressource:

- contexte de la formulation d'un béton ordinaire
- recherche du rapport pondéral C /E
- évaluation de la quantité de ciment C et de la quantité d'eau E
- optimisation du squelette granulaire
- estimation du coefficient de compacité

❖ **Détermination du rapport C/E:**

$f_c = G * F_{CE} (C/E - 0,5)$ Formule de Bolomey

f_c : La résistance désirée pour le béton à 28 jours est: $f_c = f_{c28} = 25\text{MPa}$ La résistance visée vaut alors $f_c = 1.15 * f_{c28} = 1.15 * 25$

f_{c28} : Résistance moyenne

G: Coefficient granulaire = 0,5

F_{CE} : Résistance moyenne du ciment à 28 jours = 42,5

C: Masse du ciment par m^3 de béton

E: Masse d'eau par m^3 de béton

$f_c = G * F_{CE} (C/E - 0,5)$

$$\frac{1,25 * 25}{0,5 * 42,5} + 0,5 = C/E$$

$$C/E = 1,85$$

❖ **Détermination du dosage en ciment C d'après l'abaque:**

Estimation du dosage en ciment

$C = 350 K_g$ pour $1 m^3$ de béton

❖ **Détermination du dosage en eau E:**

$$C = \frac{E}{C/E} = \frac{350}{1,85} = 189,18 \text{ litres}$$

La correction: (+4%)

$$E + 0,04 = 189,22 \text{ litres}$$

❖ **Détermination de la composition granulaire:**

Tracé de courbe granulométrique de référence

Ordonnée du point A:

$$Y = 50 - \sqrt{D + K + Ks + Kp}$$

Avec :

D: diamètre du plus gros granulat

K: terme correcteur +2

K_s : correction si M_f du sable est fort = $6 * M_f - 15 = (6 * 1,4) - 15 = -6,6$

K_p : correction si béton doit être pompé=0

$$Y = 50 - \sqrt{12} + 2 - 6,6 + 5$$

$$Y = 46,93\%$$

❖ **Détermination des proportions de granulats:**

Pour une courbe granulométrique précise, mais dont le tracé n'est pas inclus

Le point B a pour abscisse D et pour ordonnée 100% de tamisât:

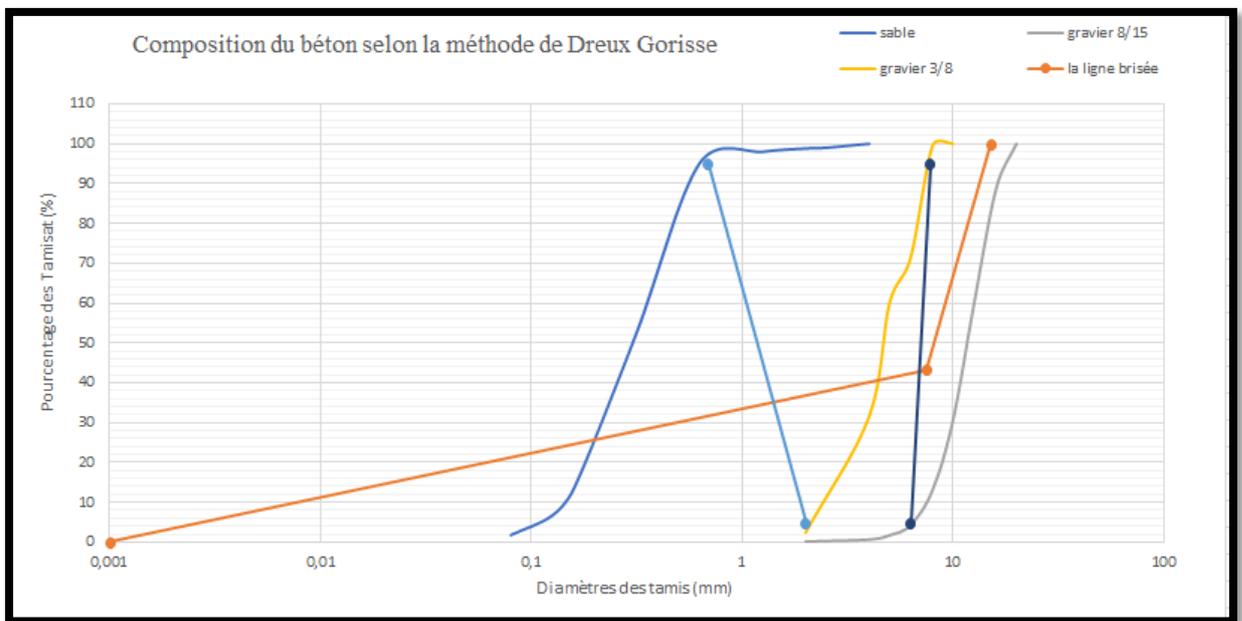


Figure III.20: Composition du béton selon la méthode de GREUX GORISSE.

$$x_B = 15\text{mm}$$

$$y_B = 100\%$$

Position du point de brisure : abscisse du point A: x_A

On en déduit par tracé de ligne de partage, les pourcentages des granulats en volume absolu :

Sable 34%

Gravier 3/8 = 8%

Gravier 8/15 = 58%

❖ Détermination de la composition en volume absolu:

Le dosage en béton est déterminé pour obtenir 1 m³ béton en place; cela signifie que le volume de matière vaut 1 m³.

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

$$\gamma = \frac{V_c + V_g + V_s}{1}$$

Soit : $\gamma = (V_c + V_g + V_s)$ en volume absolu

Volume absolu de ciment :

$$V_c = \frac{C}{MV_{abs_c}} \quad V_c: \text{Volume absolu de ciment en } dm^3$$

C : masse de ciment en Kg

MV_{abs_c} : Masse volumique absolue du ciment en Kg / dm³

Soit 3200 Kg / m³ = 3,1 Kg / dm³

$$V_c = \frac{350}{3,2} = 109,375 \text{ dm}^3$$

❖ Volume absolu de granulats :

De la relation de : $\gamma = (V_c + V_g + V_s)$ on en déduit V_g et V_s

En remplaçant le volume de granulats $V_g + V_s$ par la valeur V_G

On déduit de : $\gamma = (V_c + V_G)$

$$V_G = (1000 * \gamma) - V_c$$

V_G : volume absolu des granulats en dm³ $V_G = (V_g + V_s)$

$$V_G = (V_{3/8} + V_{8/15} + V_s)$$

γ : Coefficient de compacité

$$\gamma = 0,815 - 0,03 = 0,785$$

$$V_G = (1000 * 0,785) - 109,375$$

$$V_G = 675,625 \text{ dm}^3 / \text{m}^3$$

Volume de sable

$$V_s = S\% * V_G$$

$$V_s = 34\% * 675,625 = 0,34 * 675,625 = 229,712 \text{ dm}^3 / \text{m}^3$$

Volume de gravillons (3/8) ; (8/15)

$$V_{3/8} = 8\% * 675,625 = 0,008 * 675,625 = 54,05 \text{ dm}^3 / \text{m}^3$$

$$V_{8/15} = 58\% * 675,625 = 0,58 * 675,625 = 391,862 \text{ dm}^3/\text{m}^3$$

Les granulats	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Volume absolu(dm^3/m^3)	222,712	54,05	391,862

❖ **Détermination de la composition pondérale sèche en K_g :**

Masse de ciment

$$C = 350 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

❖ **Masse d'eau**

$$E = 189,229 \text{ l} \approx 189,230 \text{ l}$$

❖ **Volume de sable**

$$S = V_s * MVabs_s$$

$$S = 229,712 * 3 = 689,136 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

❖ **Masse de gravillons (3/8); (8/15)**

$$G = V_{g3/8} * MVabs_{g3/8}$$

$$G = 54,05 * 2,85 = 154,042 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$G = V_{g8/15} * MVabs_{g8/15}$$

$$G = 391,862 * 2,72 = 1065,864 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

❖ **Résumé des dosages :**

La composition de béton	Ciment	Eau	Sable	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)
La masse Kg/m^3	350	189,230	689,136	154,042	1065,864

III.3.2. Préparation Des Éprouvettes :

Pour les besoins de notre étude et selon la nature de l'essai à réaliser, on a utilisé des moules cylindriques $(32 \times 16) \text{ cm}^3$, prismatique $(10 \times 10 \times 40) \text{ cm}^3$, pour la préparation des éprouvettes.



Figure III.21: Préparation d'éprouvette cylindrique (Labo de génie civil TIARET).

Volume du gâchage pour 3 éprouvettes cylindrique (16× 32) cm^3 :

Pour une éprouvette:

$$V = \pi \times R^2 \times H = 3.14 \times 8^2 \times 32 = 6433.98 \text{ cm}^3.$$

Tableau III.11: Composition de mélange pour une éprouvette cylindrique (16× 32) d'un béton ordinaire.

Les matériaux	1 éprouvette	3 éprouvettes
Sable K_g / dm^3	4,48	13,44
Gravier (8/15) K_g / dm^3	6,9	20,7
Gravier (3/8) K_g / dm^3	1,04	3,12
Ciment K_g / dm^3	2,3	6,9
L'eau l	1,26	3,78

Tableau III.12: Composition de mélange pour 3 éprouvettes cylindrique d'un béton à base d'argile calcinée.

Les matériaux	BA 5%	BA 10%	BA 15%	BA 20%
Sable	13,44	13,44	13,44	13,44
Gravier (8/15)	20,7	20,7	20,7	20,7
Gravier (3/8)	3,12	3,12	3,12	3,12
Ciment	6,55	6,2	5,87	5,16
Argile	345	690	1035	1725
L'eau	3,78	3,78	3,78	3,78

Pour les besoins de notre étude et selon la nature de l'essai à réaliser, on a utilisé des moules cylindriques $(10 \times 10 \times 40) \text{ cm}^3$, prismatique $(10 \times 10 \times 40) \text{ cm}^3$, pour la préparation des éprouvettes.

Volume les éprouvettes prismatique $(10 \times 10 \times 40) \text{ cm}^3$

$$V = 10 \times 10 \times 40 = 4000 \text{ cm}^3$$

Tableau III.13: Composition de mélange pour éprouvettes prismatique $(10 \times 10 \times 40) \text{ cm}^3$ d'un béton ordinaire.

Les matériaux	1 éprouvette	3 éprouvettes
Sable	2,8	8.4
Gravier (8/15)	4,31	12.93
Gravier (3/8)	0,66	1.98
Ciment	1,45	4.35
L'eau	0,8	2.4

Tableau III.14: composition de mélange pour 3 éprouvettes prismatique $(10 \times 10 \times 40) \text{ cm}^3$, d'un béton à base d'argile calcinée.

Les matériaux	BA 5%	BA 10%	BA 15%	BA 20 %
Sable	8.4	8.4	8.4	8.4
Gravier (8/15)	12.93	12.93	12.93	12.93
Gravier (3/8)	1.98	1,98	1,98	1,98
Ciment	4.13	3.92	3.7	3.5
Argile	217.5	435	652.5	870
L'eau	2.4	2.4	2.4	2.4

III.3.3. Malaxage : [NA EN 12390-2]

Les constituants sont introduits dans le malaxeur à l'ordre suivant :

- Introduire gravier 8/15, gravier 8/15, sable et ciment.
- Malaxer pend 2 min et 3 secs.
- Introduire la quantité d'eau.
- Malaxer pendent 3 min et ajouter l'eau tout attentivement.

- Mesurer l'affaissement à chaque fois par cône d'Abrams jusqu'à la valeur désiré et visé [49].



Figure III.22: Malaxage du béton.

❖ **Affaissement au cône d'Abrams: [NF EN 12350 – 2]**

L'essai réalisé avec cet appareil est normalisé selon la norme NF EN 12350-2, désigné par essai de consistance ou plus généralement par essai d'affaissement au cône d'Abrams il détermine la plasticité du béton.



Figure III.23: Affaissement au cône d'Abrams.

III.3.4. Moulage et démoulage :

Après le malaxage, le béton est prêt à l'emploi. Le béton est introduit dans des moules déjà graissés par une huile pour faciliter le démoulage après 24 heures de leur coulage. Le remplissage des moules est exécuté en deux couches, chaque couche est piquée par 25 coups.

Le but de piquage est le remplissage parfait du moule. A la fin du coulage, il faut araser les éprouvettes à l'aide d'une règle selon les normes [NF P18-422] et [NF P 18-423]. La face supérieure de l'éprouvette doit être lisse et bien finie. Après démoulage, les éprouvettes sont entreposées dans de l'eau jusqu'au moment de l'essai.



Figure III.24: Moulage des éprouvettes cylindriques et prismatiques.



Figure III.25: Conservation des éprouvettes (cylindriques et prismatiques).

III.3.5. Caractéristiques mécaniques des éprouvettes :

III.3.5.1. Détermination de la résistance à la compression (f_{cj}): [NF EN 196-1]

L'essai de la compression s'effectue sur des différents types des éprouvette on trouve des éprouvettes cylindriques de diamètre 16cm et hauteur de 32 cm (16x32cm) on a utilisée dans notre travail.

$$\sigma_c = \frac{P_c}{S}$$

σ_c : Contrainte de compression.

P_c : la charge de rupture à la compression.

S: Section transversale de l'éprouvette.



Figure III.26: Machine pour essai de compression simple.

III.3.5.2. Détermination de la résistance à la traction par flexion : [NF P 15-471]

La résistance à la traction par flexion des bétons a été évaluée par des essais de flexion trois points effectués sur des éprouvettes prismatique (10x10x40) cm³

$$R_f = \frac{1.5 PL}{a^3}$$

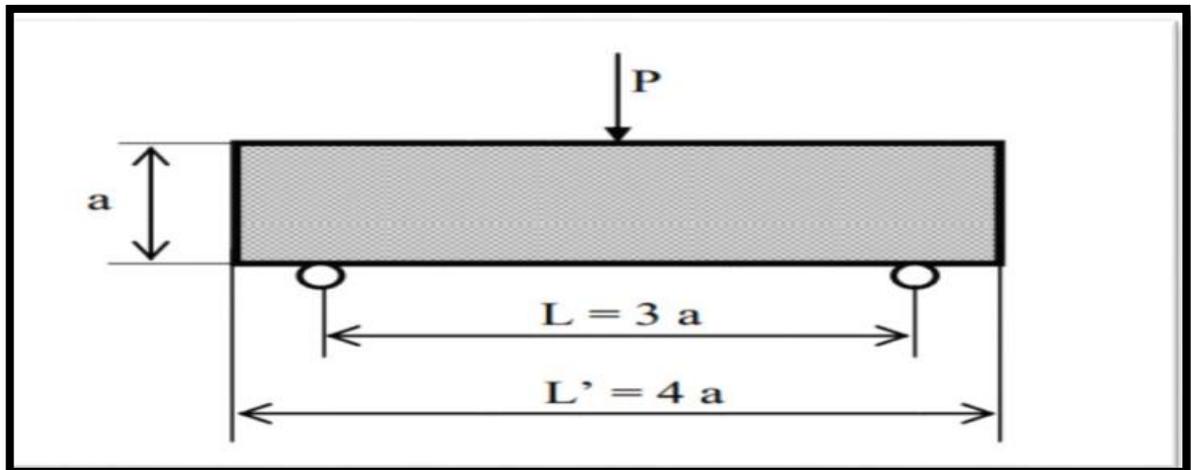


Figure III.27: Essai de traction.

R_f : est la résistance en flexion en MPa ;

a : est le côté de la section carrée de prisme en millimètres (mm);

P : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture en newtons (N);

L : est la distance entre les appuis en millimètres (mm).



Figure III.28: Machine pour essai de traction par flexion.

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé tous les matériaux entrant dans la composition des bétons ordinaire et bétons de l'argile calcinée, la formulation des bétons est réalisée à l'aide de la méthode de DREUX GUERRIS, les bétons obtenus sont caractérisés à l'état frais et durcis, dans le chapitre nous allons présenter les différents résultats obtenus avec leurs interprétations.



CHAPITRE IV
RESULTATS ET
INTERPRETATION

IV.1 Introduction :

Ce chapitre résume les résultats des différents essais suivis d'une discussion obtenue sur les bétons comme : la résistance à la traction par flexion et la résistance de compression des bétons pendant une période de 28 jours.

Le but de notre travail est d'étudier l'effet des propriétés mécaniques de béton. Les résultats obtenus nous permettrons de savoir et de jugé le comportement des bétons composés de différents pourcentages d'argile calcinée. Pour donner une meilleure lisibilité aux résultats, ces derniers seront présentés dans des tableaux et par des histogrammes. Une conclusion sera exploitée à la fin de ce chapitre.

IV.2 Résultats

Après une conservation des éprouvettes sous l'eau pendant de 28 jours (figure IV.1), nous avons procéder à faire des essais de traction par flexion et des essais de compression.



Figure IV.1: Éprouvettes cylindriques conservées pendant 28 jours.



Figure IV.2: Éprouvettes prismatique conservées pendant 28 jours.

IV.2.1. Béton ordinaire et béton à base d'argile calcinée après 28 jours :

Les résultats des essais de flexion et de compression sur les bétons ordinaire et les bétons à base d'argile calcinée après 28 jours Les bétons fabriqués dans cette étape seront nommés par :

- B.O : Béton Ordinaire.
- B.A : Béton à base d'Argile Calcinée.

Les tableaux IV.1. représente les résultats de l'essai de résistance de compression de trois point a 28 jours de béton avec argile calcinée réaliser au niveau de laboratoire de génie civil (MDC).

Tableau IV.1 : Résistance de compression du béton ordinaire et béton à base d'argile calcinée (28j).

	BO		5%		10%		15%		20%	
	$F_{(KN)}$	$R_{(MPa)}$								
(1)	519.46	25.84	402.55	20.02	246.03	12.24	384.47	19.12	354.53	17.63
(2)	471.58	23.46	425.42	21.16	278.84	13.87	214.87	10.69	309.72	15.40
(3)	488.09	24.28	301.14	14.98	316.29	15.73	216.66	10.78	283.77	14.11
Moyenne		24.53		18.72		13.95		13.53		15.71

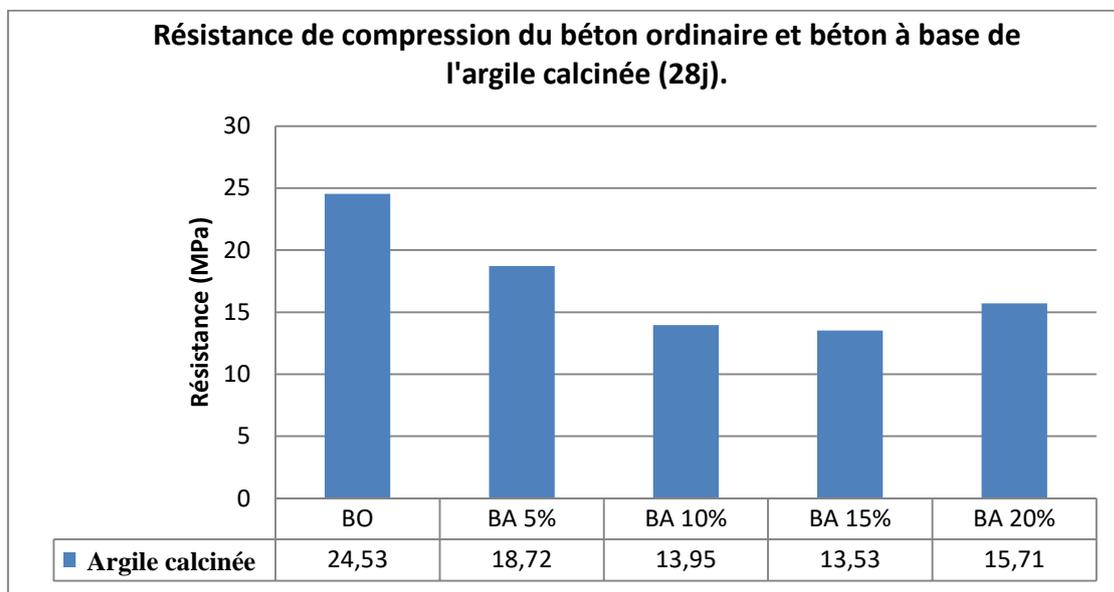


Figure IV. 3 : Effet d'Argile calcinée sur la résistance à la compression.

La figure (IV. 3) présentent la résistance à la compression des bétons contenant différente teneur de substitution de ciment par l'argile calcinée 5 %, 10 %, 15 % et 20 %, et

pour un rapport Eau/ Ciment étudiés. Il possible de remarquer que la résistance de tous les bétons (de 5% à 15%) est relativement faible (18.72 MPa à MPa 15.71) par rapport le béton ordinaire qui présente une résistance de 24.53 MPa. La substitution partielle de ciment par l'argile calciné engendre une diminution de la résistance en compression. Cette diminution de la résistance est proportionnelle avec le taux de l'incorporation de ce nouveau matériau dans le béton, et elle d'autant plus important que le taux de substitution de ciment par l'argile est élevé. À titre d'exemple, pour des teneurs de substitution de ciment par 5 %, 10 %, 15 % de l'argile calciné, le taux de diminution de la résistance est d'ordre 24%, 34 %, 45 % et 36% respectivement par rapport à celle du béton de référence. Cela est attribué d'une part a à la réactivité pouzzolanique de l'argile calciné relativement nul, influencer par leur traitement post calcination ; broyage, agglomérations des grains, tamisage, surface spécifiques faible ...etc.

Une légère amélioration de résistance remarqué au pourcentage de 20% par rapport les autre (5%, 10% et 15%), peut être cet échantillon présente une fraction réactive, mais reste toujours inférieur en comparant avec le béton témoin.

Des résultats rapportés par Khatib et Hibbert [50] ont évalué la résistance à la compression de bétons contenant 0, 10 et 20% de MK (argile calciné). Ils ont trouvé que lorsque le niveau de remplacement de ciment par de MK augmente la résistance de béton augmente à tous les âges de durcissement. L'incorporation de MK est particulièrement utile au cours des 14 premiers jours, où le taux de développement de la résistance est considérablement plus élevé que le témoin. Après 14 jours de durcissement, l'incorporation de MK ne provoque pas une augmentation du taux de développement de la résistance. Ils ont constaté que 20% de remplacement avec MK est optimal pour atteindre l'amélioration maximale de la résistance à long terme.

Sabir et al. [51] ont montrant que l'augmentation de la surface spécifique de MK de 12 à 15 m² /g réduit l'âge auquel l'augmentation de résistance maximale se produit dans les mortiers contenant de matériaux pouzzolanique (argile calciné), illustrant l'effet de la taille des particules sur la vitesse de réaction.

Le tableau IV.2. représente les résultats de l'essai de résistance de traction par flexion de deux point à 28 jours de béton avec argile calcinée réaliser au niveau de laboratoire de génie civil (MDC).

Tableau IV.2 : Résistance de compression du béton ordinaire et béton à base d'argile calcinée (28j).

	BO		5%		10%		15%		20%	
	$F_{(KN)}$	$R_{(MPa)}$								
(1)	21.51	2.15	18.01	1.8	13.31	1.33	17.51	1.75	16.61	1.66
(2)	20.11	2.01	18.71	1.87	14.31	1.43	12.41	1.24	15.22	1.52
(3)	20.61	2.06	14.71	1.47	15.41	1.54	12.51	1.25	14.51	1.45
Moyenne	/	2.07	/	1.71	/	1.43	/	1.41	/	1.54

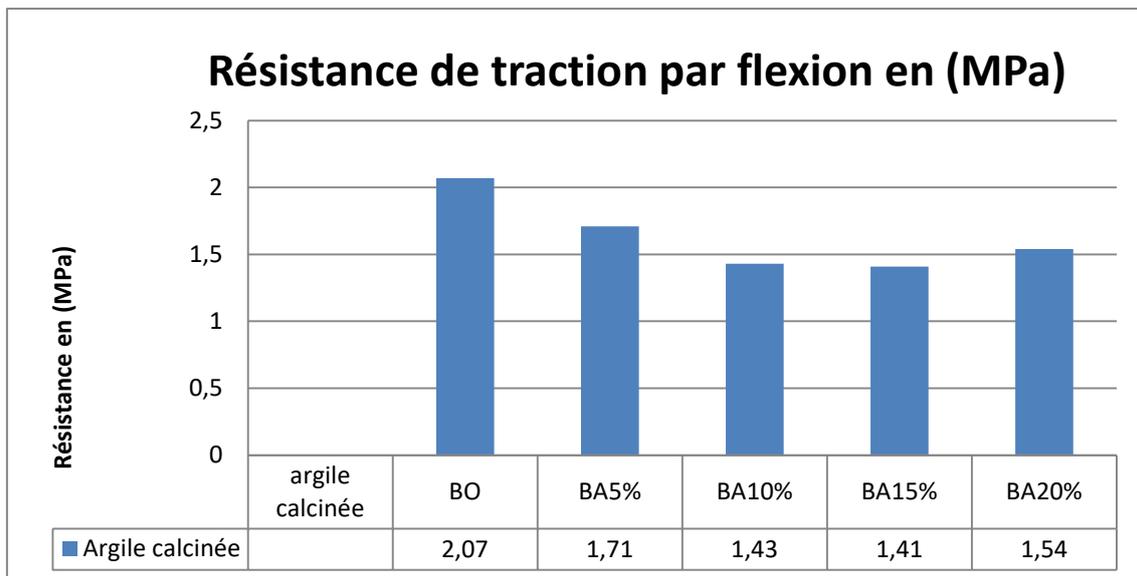


Figure IV.4: Effet de l'argile calciné sur la résistance de traction.

La figure (IV.4:) présentent la résistance de traction par flexion a trois points des bétons contenant différente teneur de substitution de ciment par l'argile calcinée 5 %, 10 %, 15 % et 20 %, et pour un rapport Eau/ Ciment étudiés. Il possible de remarquer que la résistance de tous les bétons (5%, 10%, 15% et 20%) est relativement faible (1,37MPa, 1,17MPa, 1,23MPa et 0,94 MPa) respectivement par rapport le béton ordinaire qui présente une résistance de 1,37 MPa. La substitution partielle de ciment par l'argile calciné engendre une diminution de la résistance. Cette diminution de la résistance est proportionnelle avec le taux

de l'incorporation de l'argile calciné dans le béton. Cela est attribué de la préparation de ces matériaux (broyage et tamisage).

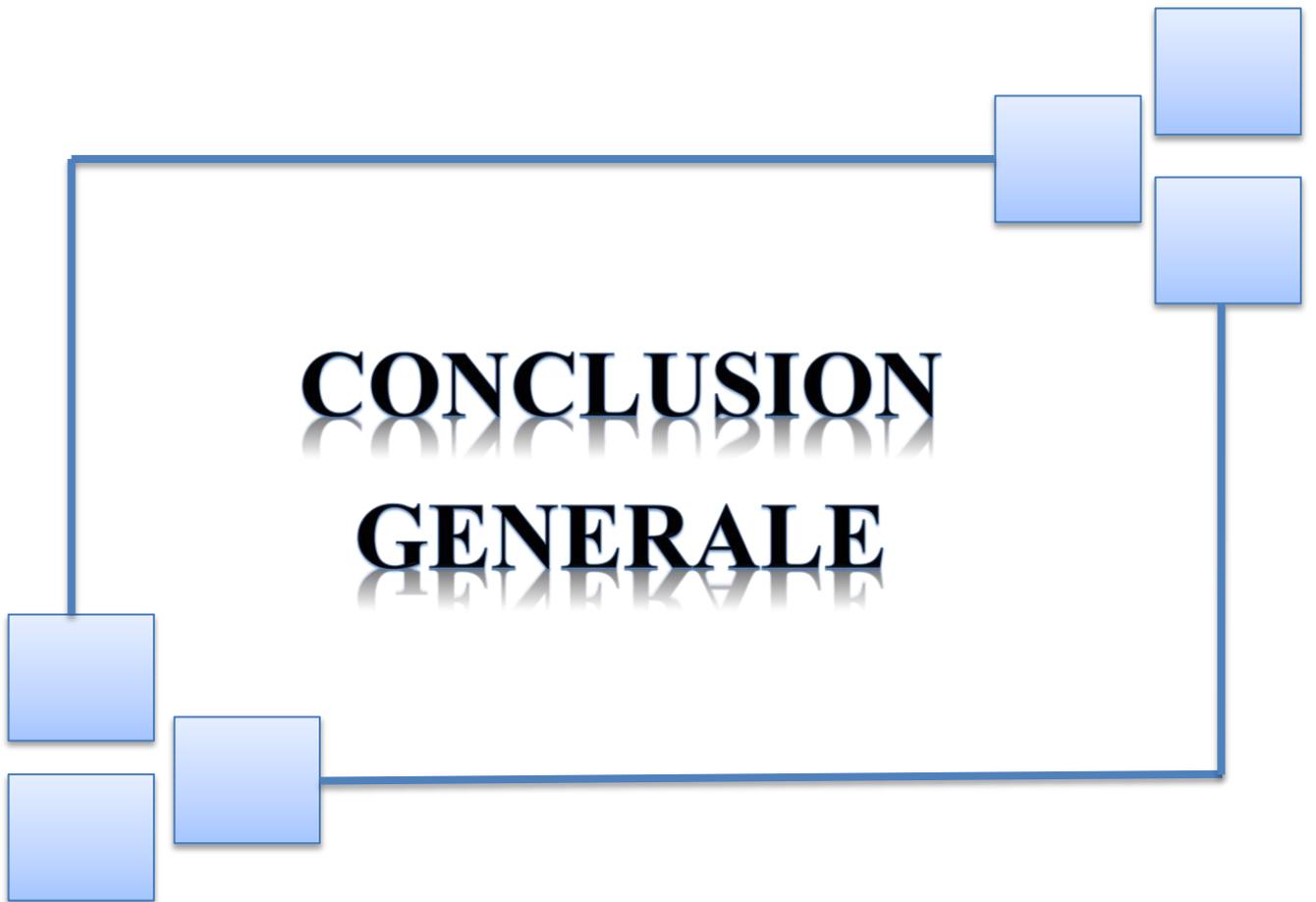
Qian et Li [52] ont déterminé la résistance à la traction directe du béton à 28 jours contenant 0, 5, 10 et 15% de métakaolin en remplacement partiel du ciment. La surface spécifique et le diamètre moyen des particules du métakaolin étaient de 12 000 m² / kg et de 2,23 µm respectivement. Les résultats de résistance à la traction Il a été observé que la résistance à la traction augmentait avec l'augmentation de la teneur en métakaolin. Les taux moyennes d'augmentation de la résistance à la traction est de l'ordre 7, 16 et 28% pour les mélanges de béton fabriqués avec 5, 10 et 15% de MK respectivement alors que les augmentations moyennes de la déformation finale est de 3,19 et 27% respectivement

IV.3 Conclusion :

Les avantages obtenus par l'addition d'un matériau pouzzolanique à la formulation d'un béton varient en fonction du matériau de substitution utilisé et principalement leur réactivité avec le composant hydraté de ciment. Toutefois, ils possèdent tous un point commun. Ils améliorent la résistance tout en produisant un matériau plus durable.

La résistance mécanique à la compression reste le facteur le plus déterminant sur la pouzzolanité des argiles calcinées. L'évolution de la résistance peut fournir une indication sur la capacité de l'argile de fixer la Portlandite et de reproduire des nouveau CSH permettant l'augmentation de résistance.

CONCLUSION
GENERALE



Conclusion générale

Pour connaître la durabilité du béton, il faut étudier son comportement vis-à-vis d'un certain nombre de mécanismes qui le dégrade où adopter un critère global de référence pour caractériser la qualité du béton. La résistance en compression est le critère de premier ordre puisqu'une résistance à la compression élevée est un indice de bonne qualité du béton, et elle dépend de la porosité du béton. Dans ce contexte l'utilisation des ajouts minéraux contribuant à l'amélioration des propriétés mécaniques de béton durci par la formation de gel supplémentaire C-S-H similaire à celle produite par le ciment portland seul, cette dernière confère au béton durci sa résistance mécanique.

L'amélioration de la résistance à la compression du béton incorporant de l'argile calcinée est liée aux facteurs principaux pour lesquels l'argile contribue à améliorer la résistance de béton durci : l'effet de filler ou de "remplissage", l'effet d'accélération de l'hydratation du ciment et la réaction pouzzolanique de l'argile avec la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

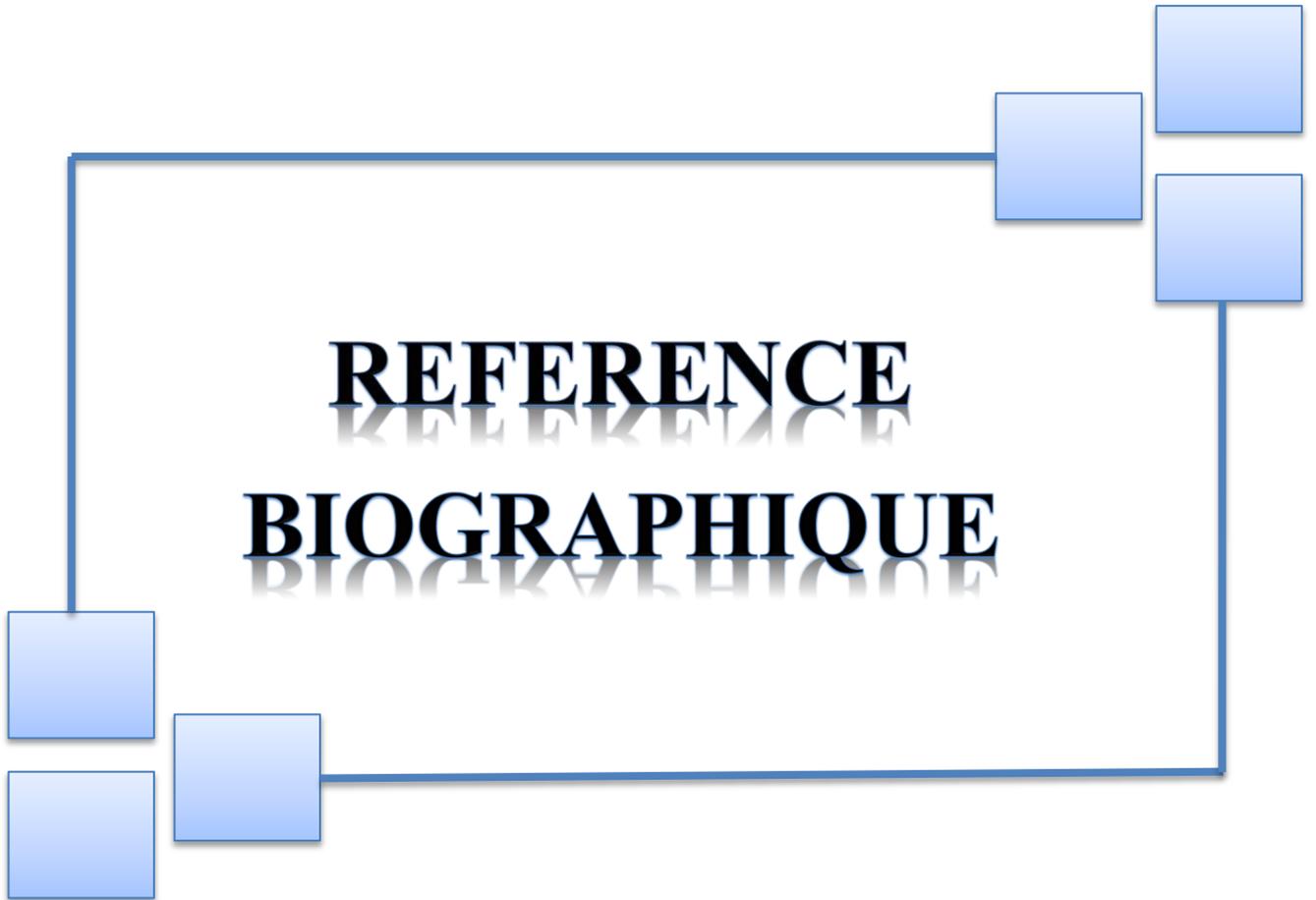
L'objectif de ce mémoire précédemment est d'évaluer l'effet de taux de substitution de ciment par de l'argile calcinée en poids du ciment sur les propriétés du béton durci à savoir les propriétés mécaniques (Résistance de compression et de traction). Le résultat obtenu nous a permis de tirer la conclusion suivante :

L'utilisation de l'argile calcinée sous une température de $850\text{ }^\circ\text{C}$ en substitution partielle de ciment (5%, 10%, 15% et 20%) dans le béton engendre une diminution de la résistance de compression avec l'augmentation de taux d'incorporation de ce matériau dans le béton, cela est attribué d'une part à la réactivité pouzzolanique de l'argile calcinée relativement nulle, influencée par leur traitement post calcination ; broyage, agglomérations des grains, tamisage, surface spécifique faible ... etc.

Suggestions pour de futures recherches :

- Étudier l'effet de différents types d'argile calcinée sur les propriétés du béton.
- Développer de nouvelles méthodes pour améliorer l'efficacité de l'argile calcinée.
- Étudier la possibilité de recycler les bétons à base d'argile calcinée.

REFERENCE BIOGRAPHIQUE



- [1] DR. P .BOERAEVE, «Technologie du béton », Edition 1994, Groupement Belge du béton
- [2] Loot. J.-P, al, 2005 CIM Béton, centre d'information sur le ciment et ses applications "Ciment et béton " conception et réalisation Edition, 2005, Am principe paris.
- [3] RACHIL, DENDANI.M, «Influence des différentes granulométries des agrégats sur le comportement mécanique du béton ordinaire». Mémoire de master. Université De M'hamed Bougara -Boumerdes, 2016.
- [4] DREUX G., FESTA J,"Nouveau guide du béton et ses constituants" Edition Eyrolles, Huitième Edition, Mai 1998
- [5] Jean-Pierre OLLIVIER et Angélique VICHOT, « La durabilité de béton», Collectif Presses.
- [6] Debih abdelmohcene, « Durabilité d'un béton exposé à un milieu agressive (acide sulfurique), influence de la forme des granulats (concassé-roulées), mémoire de Master de l'Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016 de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées (ENPC) (2eme édition), 2008.
- [7] L. PLISKIN, « La fabrication du ciment » - Edition Eyrolles – 217p- Paris1993
- [8] R. CHAID, Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux. Thèse de doctorat d'état en génie civil ENP décembre 2006.
- [9] R. Gané, « Cours de durabilité et Réparation des bétons » - Chapitre 2- Université de Sherbrooke – p32 - Canada 2002.
- [10] Y. Older, « Hydration, setting and hardening of Portland cement », dans Lea's - Chemistry of Cement and Concrete, chap.6, Arnold, 4th éd- 1998.
- [11] Kiran Pokkuluri , « Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range» - Master thesis – Virginia University – 210p - October 199.
- [12] M. Hamdouni Samir, « connaissance de différent matériaux de construction», 2013-2014.
- [13] COLLECTION TECHNIQUE CIM-BÉTON, «les bétons – constituants, mécanismes, propriétés à l'état frais et durci, comportements mécanique et dimensionnel » chapitre 3; Tome II., Ecole Française du Béton, pp : 13_14
- [14] CHAREF A, « La problématique des granulats au Maroc », Push-Button Publishing, (2007).

- [15] R. MAILLOT, "Mémento technique des Granulats", *les Presses de l'Ecole des Mines, Paris*, 166 p., (2001).
- [16] KATTAB.R, valorisation de sable de dune. Thèse doctorat, Alger: ENP, 2007.
- [17] REZIG Salima, Mémoire de Master «Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux», Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2012.
- [18] Christophe Carde, Directeur technique du LERM, « Le retrait des béton », page 86 Septembre /Octobre 2006.
- [19] KOUICI ABIR, « Etude de l'effet de l'introduction des fibres végétales sur les propriétés des bétons auto plaçant (BAP) à l'état frais et durcis », mémoire de Master Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [20] CAILLÈRE, S. HENIN, S, « Minéralogie des argiles», MassonetCie1963.
- [21] A. BENOUMAR, A. BOUFRIKECHE, « influence de la bentonite calcinée sur les propriétés des mortiers cimentaire», Université de Ghardaïa, 2021/2022.
- [22] k, MELLE TIZAOUI, « élimination des métaux lourds en solution aqueuse par des argiles algériennes », Diplôme de magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEEN, 2013.
- [23] Guy, A., P. Roland et G. Claude. 1978. Précis de minéralogie. Paris, Masson, 335 p.
- [24] Bouras Omar, 2003. Propriétés adsorbantes d'argiles pontées organophiles: synthèse et caractérisation. Thèse de doctorat de l'université de Limoges.
- [25] S. Caillère, S. Hénin et M. Rautureau, 1982. Minéralogie des argiles : Classification et Nomenclature; Editions Masson; Paris.
- [26] P. Liao, Z. Zhan, J. Dai, X. Wu, W. Zhang, K. Wang, S. Yuan, Adsorption of tetracycline and chloramphenicol in aqueous solutions by bamboo charcoal: A batch and fixed-bed column study, *Chem. Eng. J.* 228 (2013) 496–505.
- [27] EL BOUDOUR EL IDRISSE.H, Master, SPECIALITE : Métallogénie, « caractérisation des argiles utilisées dans le secteur de la terre cuite de la région de Marrakech en vue d'améliorer la qualité des produite », 2017.
- [28] Bakhti, A M. Saïd, O. Sorption of Chromate Ions on a Calcined Synthetic Hydrotalcite. Water.
- [29] Chakchouk A., Samet B., Mnif T., «Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material», *Applied Clay Science*, vol 33, 2006, p. 79–88.

- [30] Pagliari L., Dapiaggi M., Pavese A, Francescon F, «A kinetic study of the quartz– cristobalite phase transition», *Journal of the European Ceramic Society*, vol 33, 2013, p. 3403–3410.
- [31] San Nicolas R, Cyr M, Escadeillas G. Characteristics and application of flash metakaolins. *Appl clay sci* 2013 ; 83-84 : 253-262.
- [32] Bridson D, Daviers TW, Harrison DP, « Properties of flash-caicined kaolinite ». *Clays clay miner* 1985 ; vol 33 N°3 : 258-260.
- [33] MESSI. A, Propriétés des ciments pouzzolaniques élaborées à partir de latérites actives.
- [34] SADR-MONTAZI A, « Conception de nouveaux ciments composés », Thèse .Lyon: INSA de Lyon1988, p256.
- [35] AMBROISE J. Elaboration de liants pouzzolaniques à moyenne température et études de leurs propriétés physico-chimique et mécaniques. Thèse. Lyon : INSA de Lyon, 1984,165p.
- [36] BRINDLEY G.W, NAKAHIRA M. The kaolinite - mullite reaction series: I Survey of outstanding problems .II The high temperature phase .*Journal of American ceramic society*, 1959, vol.42, p311-324.
- [37] HORVATH I, KRANZ G.A. « Thermoanalytical study of high temperature dehydration of kaolinites with various structural arrangements *Silikaty* », 1980, vol 24.p149-156.
- [38] GNIEWEK J. Réactivité des montmorillonites calcinées .Utilisation dans le génie civil. Thèse .Lyon: INSA de Lyon, 1987,184p.
- [39] BICH.CHRISTEL, Contribution à l'étude l'activation thermique du kaolin: évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique ? Thèse, MEGA de Lyon, 2005, p264.
- [40] SIMONE CAILLERE .Minéralogie des argiles P355.
- [41] JEAN-PIERRE MAGNAN. Mécanique des sols et des roches.2000. vol1.
- [42] BARRON J. SAUTEREY R. Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées Paris.p559.
- [43] VICTOR POUSSARDIN, Thèse de Doctorat. « Utilisation d'argiles et de marnes calcinées dans le développement de ciments composés », Sciences pour l'ingénieur en Génie Civil, Le 30 septembre 2022.
- [44] Mr. Benyahia Abdeslam, Mémoire Master 2016/2017.
- [45]A KOMAR. Matériaux et éléments de construction, Editions Mir Moscou 1976, p540
- [46] KAKALI G, PERRAKIT, TSIVILLIS, et al. Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity. *Applied Clay Science*, 2001, vol 20, p73-80.

- [47] RAMACHNDRAN V-S, utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F, conseil national de recherches Canada, Juin 1981.
- [48] Pr. GHOMARI Fouad, université ABOUBEKER BELKAID FACILTE faculté de technologie département de génie civil matériaux de construction.
- [49] R.DAUPAIN, J.-C. Saint-Arroman, « Granulats, sols, ciment et Béton », Edition, 2009.
- [50] khatib, J.M, Hibbert, J.J, « selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin » construction and building materials 19, 460-472(2005).
- [51] Sabir, B.B, Walid, S. and Bai, J: « metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review », ciment and concrete composites, 23(6): 441-454, (2001).
- [52] Qian, X, Li ; Z: « the relationships between stress and strain for high- performance concrete with metakaolin », Cem. Concr. Res. 31(11), 1607-1611(2001).

NETOGRAPHIE

[NET 1] http://www.gramme.be/unite9/beton/Documents/1_Composition_du_beton.pdf.

[NET 2] <http://ft.univ-setif.dz/externe/departements/gc/Chapitre-I-les-Betons-MDC-II.pdf>.

Les Normes:

Norme Européenne NF EN 196-3, (1990), Méthodes d'essais des ciments –Partie 3: Prise de Ciment, Paris 1990.

Norme Européenne NA EN 933-1, 2012, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1: détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage.

Norme Européenne NA EN 12620, 2003, Granulats pour béton.

Norme Européenne NA EN 933-5, 1998, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 5 : détermination du pourcentage de surfaces cassées dans les gravillons.

Norme Européenne NF EN 12350 – 2, 1999, Essai pour béton frais - Partie 2: essai d'affaissement.

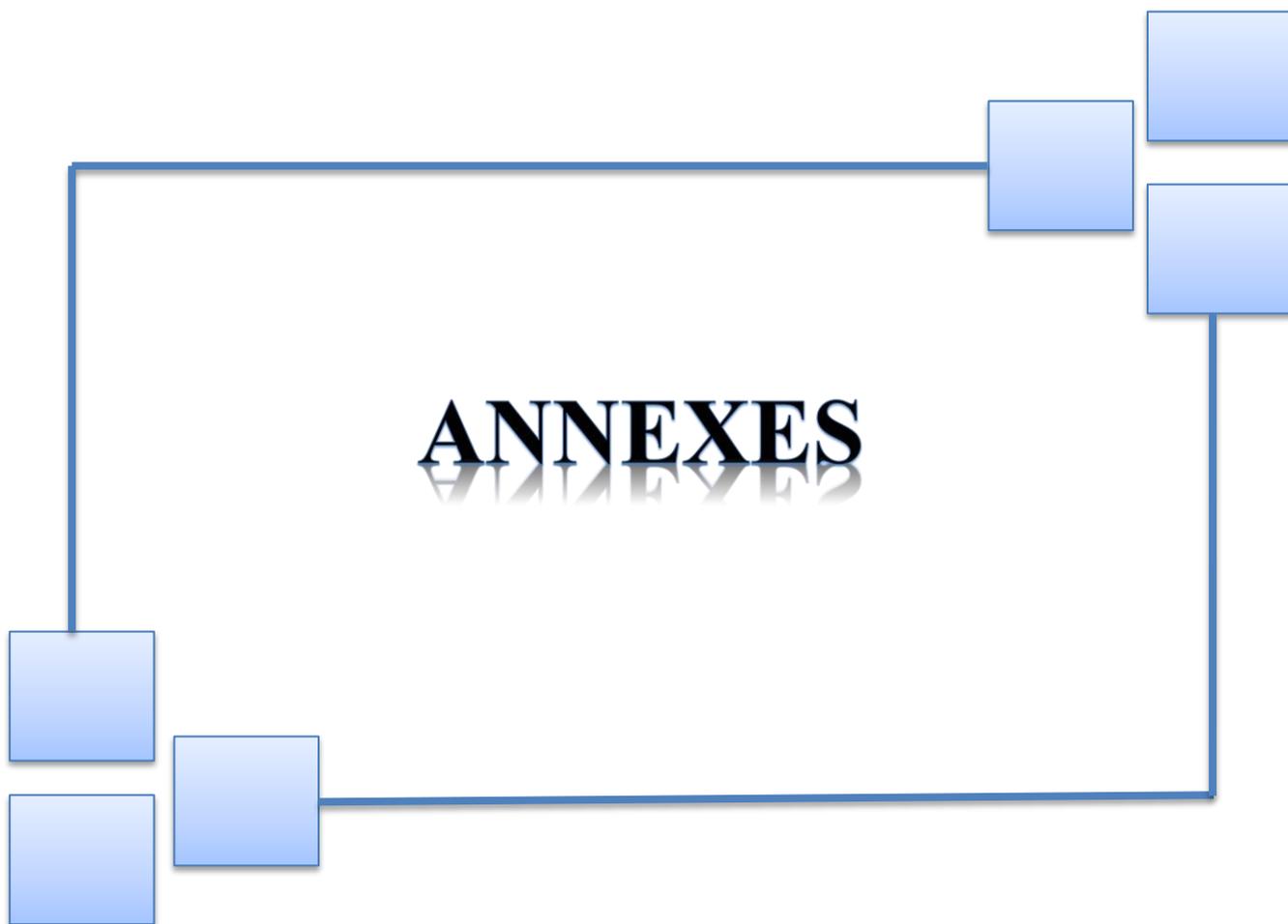
Norme Française NF P18-422, 1981, bétons - Mise en place par aiguille vibrante.

Norme Française NF P 18-423, 1981, Bétons - Mise en place par piquage.

Norme Européenne NF EN 196-1, 2016, Méthodes d'essais des ciments - Partie 1: détermination des résistances.

Norme Française NF P 15-471 NF EN 196-2, Avril 2006, Méthode d'essais des ciments. Partie 2 : Analyse chimique des Ciments.

ANNEXES



Annexe A.

ALGÉRIE



50kg

Mokaouem
مقاوم بلوس Plus

LAFARGE
 Construire
 des villes meilleures™

**Ciment Portland**

NA 442 - CEM I 42,5 N-SR 3

Mokaouem est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé.

Mokaouem
 NA 442 - CEM I 42,5 N-SR3

Mokaouem NA 442 -CEM I 42,5 N-SR3 selon la NA 442 v 2013 et la EN 197-1II est conforme à la norme nationale NA 442 v 2013 et à la norme Européenne EN 197-1 avec un taux en C3A < 3%.

AVANTAGES PRODUIT

- Tout en étant un ciment de haute performance, **Mokaouem** protège la structure contre les agressions chimiques de l'environnement externe.
- Une meilleure durabilité pour les structures en béton.
- Une faible chaleur d'hydratation.

LH A member of
LafargeHolcim

APPLICATIONS RECOMMANDÉES ✓

- Les fondations et les structures à réaliser dans un milieu agressif
- Les travaux maritimes
- Les stations de dessalement et d'épuration
- Les travaux hydrauliques
- Les barrages et les digues de soutènement collinaire



FORMULATION CONSEILLÉE 🪣

	Ciment 50 _{na}	Sable (sec) 0/5	Gravillons (sec) 8/15mm	Gravillons (sec) 15/25mm	Eau (litres)
Dosage pour béton C25/30	X 1	X7	X5	X4	25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

Formulation de béton à suivre dans le cas de l'absence d'une étude délivrée par un laboratoire*

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES 🔍

Analyses chimiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	0,5 à 3 %
Teneur en sulfates (SO3) (%)	1,8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,2 à 3
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0,01 à 0,05

Temps de prise à 20° (NA 230)	Valeur
Début de prise (min)	> 60
Fin de prise (min)	240 à 400

Composition minéralogique	Valeur
Taux d'aluminate C3A	<3.0%

Résistance à la compression	Valeur
2 jours (MPa)	≥10
28 jours (MPa)	≥42.5

Propriétés physiques	Valeur
Consistance Normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Expansion (mm)	≤2,0
Chaleur d'hydratation	<270j/g

Ces valeurs sont données à titre indicatif et ne peuvent être considérées comme absolues

CONSIGNES DE SÉCURITÉ ⚠

1- PROTÉGEZ VOTRE PEAU : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- MANUTENTION : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



A member of **LafargeHolcim**

Conditionnement: /

LAFARGE ALGÉRIE

Bureau n°02, 16ème étage, tour Geneva,
 les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.
 tél: + 213 (0) 21 98 54 54
 Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
 www.lafargealgerie.com
 dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com
 Tél: 021 98 55 55

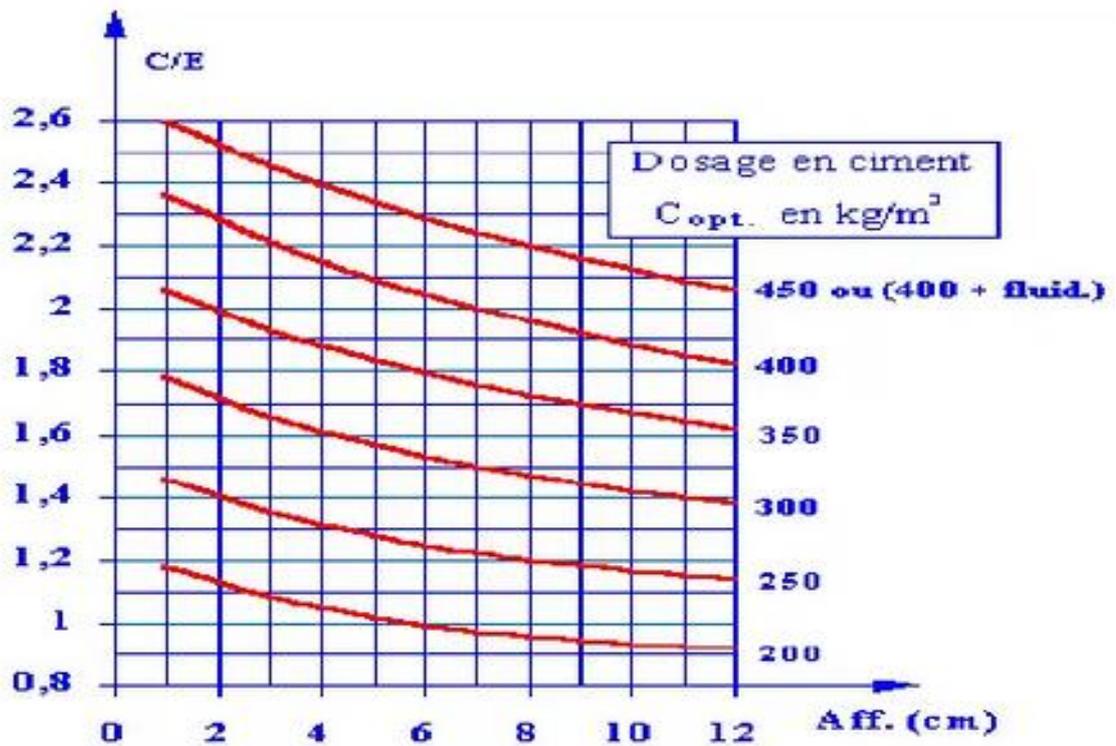


Annexe B.

- Valeurs approximatives du coefficient granulaire G .

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins ($D \leq 16$ mm)	Moyens $20 \leq D \leq 40$ mm)	Gros ($D \geq 50$ mm)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
passable	0,35	0,40	0,45

- Détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport C/E.



- Valeur du coefficient **K**

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluid	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

- Valeurs du coefficient de compacité γ .

Consistance	Serrage	Coefficient γ en fonction du diamètre D des granulats						
		D = 5	D = 10	D = 12,5	D = 20	D = 31,5	D = 50	D = 80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855