

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

Université A. MIRA, –Bejaïa –



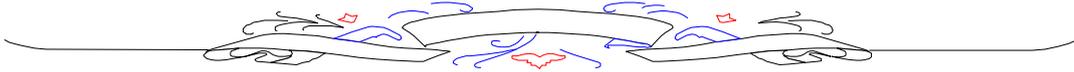
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil

Mémoire

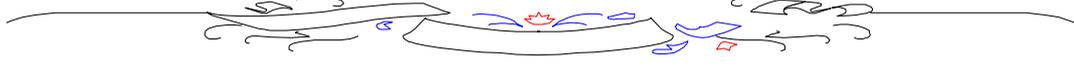
Pour obtenir le titre de Master en Génie Civil

Option : Matériaux et Structures

Thème



VALORISATION DES FIBRES METALLIQUES (FIBRES BCR) DANS LES BETONS



Présenté par

M^{elle}. OUARET Safia

Mr. BOUNCEUR Nabil

Examineur

Mr. N. CHELOUAH

Mr. M. BOUZROURA

Rapporteur

M^{me}. S. ATTIL

Mr. K. MOUSSACEB

ANNEE 2012/2013



Remerciements

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier en premier lieu, notre seigneur Dieu, le tout puissant qui nous a donné la patience, le courage et grâce auxquels nous avons pu achever ce mémoire.

Tout d'abord, un énorme et chaleureux merci à M^{me} S.ATTIL notre chère promotrice, pour avoir encadré et suivi ce travail.

On tient à exprimer notre profonde gratitude à M^r K.MOUSSACEB, notre Co-promoteur qui a eu la patience de suivre notre travail.

Nous remercions les membres du jury M^r. N.CHELOUAH et M^r. BOUZROURA, de s'être donné la peine d'examiner notre modeste travail.

Ainsi qu'à toute les personnes qui nous a apporté leur aide, et particulièrement :

- M^{me} MEGUELLATI Hassiba secrétaire du département Génie Civil Université de Bejaia.*
- M^r.BOUZKRI, BOUHIRED et, à toute l'équipe technique du laboratoire LTP-Est de Bejaia.*
- M^r GALLOUL Boualem directeur SNC BATIGAL*
- M^r BOUZIDI AMINE doctorant à L'université de Bejaia.*
- M^r BELEBCHOUCHE Chérif doctorant à L'université de Bejaia.*
- M^{elle} CHABANE Loubna magistère à L'université de Bejaia.*

Un grand merci aux techniciens du Laboratoire M^r Djamel et M^r Said pour leurs disponibilité et, leurs compréhensions au niveau de laboratoire.

Et enfin, nous exprimons notre reconnaissance à tous les enseignants qui nous ont enrichis avec un précieux savoir qui est le meilleur héritage pour l'avenir.

Dédicaces

Je dédie ce présent travail à mes chers et nobles parents dont je suis et je serais pleinement reconnaissant pour m'avoir soutenu durant tout mon parcours, et aussi :

- *A la mémoire de mes grands-parents et ma sœur Sonia , que dieu leurs accorde sa miséricorde et leurs réserve une place dans son vaste paradis*
- *à mes sœurs : Akila, Farida, Kouka, Ouahiba*
- *A mes frères : Sofiane et Smail*
- *A mes beaux-frères : A. Rahmane et Rafik,*
- *A mes nièces et neveux : Abdou , Mohamed, Anais, Sonia, N.Houda et I slam*
- *A toute la grande famille : mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines ;*
- *A tous mes amis (es) : Alili, fatima, Biba, Karim, Tarik, Midou, Lyes, Rebiha, Naguim, Imad.*
- *A mon binôme Nabil et toute sa famille.*

Que Dieu vous bénisse !

Safia.

Je dédie ce présent travail à mes chers et nobles parents dont je suis et je serais pleinement reconnaissant pour m'avoir soutenu durant tout mon parcours, et aussi :

- *A mes frères : Ahcène et sa femme Kahina, Nassim ;*
- *à mes sœurs : Nassima et Nabila ;*
- *A mes nièces et neveux (Inès, Anya et Lina) ;*
- *A toute la grande famille : Mes grands-parents, mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines ;*
- *A ma binôme Safia et toute sa famille.*
- *A Kahina (chichi), Mohamed, Sonia , Madina, tonton Doudine, Mhenni, Alili, momoh, Yacine , Célia, Abdenour , Nassim , Idir , Mohamed et Dalia , , Mehdi, Yazid, Lilia , Salah et Assia , Houcine, Khaled, tout l'équipe du conservatoire et tous mes amis sans exception.*

Que Dieu vous bénisse !

Nabil.

A tous nos amis (es) : (Nadia, Heoua, Assia, Zahra, Mounia, Sabrina, Kahina, Razik).

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Résumé

Pour atteindre l'objectif visé, nous avons envisagé d'incorporer des fibres métalliques de nature industriel dans des formulations de bétons en teneurs multiples (10% ,20% et 30%) tout en substituant le ciment. Concrètement, nous avons utilisé des fibres métallique issus du rejet à la fins de l'opération d'argentage des outillages ménagers et qui sont stockés dans des sacs en plastique qui sont préservés dans des conteneurs en métal et de trouver de nouvelles voies de valorisation dans le domaine de construction.

Nous présenterons, donc, les résistances du composite en compression, leurs caractérisations en moyen de différentes techniques tel que la DRX (Diffraction par Rayon X) et le comportement vis-à-vis des attaques chimiques tel que la TCLP (toxicité characteristic leaching procédure) de l'échantillon qui contient des fibres métalliques représentant une meilleurs résistance à la compression.

La constatation faite est que la résistance diminue chaque fois qu'on incorpore les fibres métalliques. Ces dernières jouent un rôle de barrage dans la réaction d'hydratation mais qui donne une résistance admissible pour une teneur de 10%.

Mots-clés : ciment, fibres métalliques, béton, résistance, lixiviation.

Abstract

To reach the aim and to find new ways of valuation in the field of construction, we intended to incorporate industrial metallic fibers into formulations of the Concrete with multiple contents (10 %, 20 % and 30 %) while substituting the cement. Concretely, the metallic fibers that were employed are a waste product resulting from the silver plating of various home appliances and which are stored in plastic bags which are protected in metal containers.

We thus presented the resistances of the composite in compression, their characterization regarding various techniques such as the XRD (X-ray diffraction) and their behavior towards the chemical attacks such as the TCLP (toxicity characteristic leaching procedure) of the sample containing metallic fibers and representing a better compression.

We observed that the resistance decreases every time we incorporate the metallic fibers. The latter are found to play a role of dam (roadblock?) in the reactions of hydration but leads to an acceptable (or eligible?) resistance for a concrete content 10 % of metallic fibers.

Keywords: cement, metallic fibers, concrete, strength, lixiviation.

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|---|
| REMERCIEMENTS..... | II |
| DEDICACES..... | III |
| RESUME..... | IV |
| ABSTRACT..... | V |
| TABLE DES MATIERES..... | VI |
| TABLE DES FIGURES..... | IX |
| TABLE DES TABLEAUX..... | XI |
| NOTATIONS..... | XIII |
| INTRODUCTION GENERAL..... | 1 |
| ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE..... | 3 |
| 1 CHAPITRE I | CONSTITUANTS DU BETON..... 4 |
| INTRODUCTION..... | 4 |
| I.1 COMPOSITION DU BETON..... | 5 |
| I.1.1 LE CIMENT..... | 6 |
| I.1.2 GRANULATS [6]..... | 7 |
| I.1.3 L'EAU DE GACHAGE [5]..... | 9 |
| I.1.4 LES ADJUVANTS [6]..... | 9 |
| CONCLUSION..... | 10 |
| 2 CHAPITRE II | HYDRATATION DU CIMENT..... 11 |
| INTRODUCTION..... | 11 |
| II.1 GENERALITE SUR LES LIANTS HYDRAULIQUES [09]..... | 12 |
| II.2 HYDRATATION..... | 13 |
| II.3 LA PRISE..... | 13 |
| II.4 DURCISSEMENT..... | 14 |
| II.5 COMPOSITION DU CIMENT PORTLAND [11]..... | 14 |
| II.6 HYDRATATION DES COMPOSANTS DU CIMENT..... | 15 |
| II.7 EVOLUTION DE L'HYDRATATION [13]..... | 18 |
| CONCLUSION..... | 20 |
| 3 CHAPITRE III | GENERALITE SUR LES DECHETS..... 21 |
| INTRODUCTION..... | 21 |
| III.1 NATURE ET PREVENANCE DES DECHETS ULTIMES..... | 22 |
| III.2 IMPLANTATION DES SITES..... | 22 |
| III.3 DESCRIPTION DE L'UNITÉ BCR..... | 22 |
| III.4 FONCTIONNEMENT DU CENTRE DE STOCKAGE DE DECHETS DANGEREUX..... | 22 |

| | | |
|-------|---|----|
| III.5 | METAUX LOURDS..... | 23 |
| III.6 | LES TESTS DE LIXIVIATION..... | 25 |
| III.7 | DESCRIPTION PHENOMENOLOGIQUE DU RELARGAGE..... | 25 |
| III.8 | LES DIFFERENTES RECHERCHES EFFECTUEES SUR L'INFLUENCE DES FIBRES METALLIQUES SUR LES BETONS..... | 26 |
| A. | EFFET DES FIBRES METALLIQUES SUR LA CARACTERISATION ET LES VARIATIONS DIMENSIONNELLES ET PONDERALES DES MATRICES CIMENTAIRES RENFORCEES DE FIBRES. [18] | 26 |
| B. | EFFET DU DOSAGE EN FIBRES METALLIQUES ONDULEES SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS A HAUTE PERFORMANCES. [19] | 27 |
| C. | INFLUENCE DE LA RHEOLOGIE DES BETONS RENFORCES DE FIBRES METALLIQUES SUR LEURS PROPRIETES MECANIQUES. [20] | 27 |
| | CONCLUSION | 28 |

| | | |
|--|--------------------------|----|
| | ETUDE EXPERIMENTALE..... | 29 |
|--|--------------------------|----|

4 CHAPITRE I IDENTIFICATION DES MATERIAUX...30

| | | |
|--------|---|----|
| | INTRODUCTION | 30 |
| I.1 | PRESENTATION GENERAL..... | 31 |
| I.2 | ESSAI SUR LES GRANULATS..... | 31 |
| I.2.1 | ECHANTILLONNAGE ET PRELEVEMENT (NF P 18-533) [21] | 31 |
| I.2.2 | ANALYSE GRANULOMETRIQUE (NF P 18-560) [21] | 32 |
| I.2.3 | ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES GRAVILLONS..... | 35 |
| I.2.4 | ANALYSES GRANULOMETRIQUES DU SABLE..... | 36 |
| I.2.5 | EXPRESSION DES RESULTATS | 36 |
| I.2.6 | MESURE DU COEFFICIENT D'APLATISSEMENT DES GRANULATS (NF P 18-561) [22]. | 38 |
| I.2.7 | DETERMINATION DE LA PROPRIETE SUPERFICIELLE [23]..... | 42 |
| I.2.8 | DETERMINATION DES MASSES VOLUMIQUES ABSOLUES ET APPARENTES DES GRANULATS ET LES FIBRES METALLIQUES..... | 47 |
| I.2.9 | ESSAI DE RESISTANCE A L'USURE ET AU CHOC | 50 |
| I.2.10 | CLASSIFICATION DES GRANULATS (XP P 18 - 540) [27] | 55 |
| I.3 | ESSAIS SUR LES CIMENTS | 58 |
| I.4 | METHODES PHYSIQUES D'ANALYSES | 64 |
| I.5 | METHODES CHIMIQUES D'ANALYSES | 71 |
| I.5.1 | RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES | 71 |
| | CONCLUSION | 72 |

5 CHAPITRE II FORMULATIONS DES BETONS.....73

| | | |
|------|--|----|
| | INTRODUCTION | 73 |
| II.1 | COMPOSITION DU BETON | 74 |
| II.2 | QUELQUES METHODES DE COMPOSITION DE BETON..... | 74 |
| II.3 | METHODE DREUX-GORISSE [30] | 75 |

| | | |
|-----------|--|--|
| II.4 | TRACE DE LA COURBE DU MELANGE DES GRANULATS | 77 |
| | CONCLUSION | 84 |
| 6 | CHAPITRE III | RESULTATS ET INTERPRETATIONS85 |
| | INTRODUCTION | 85 |
| III.1 | ESSAIS D'ETUDE | 86 |
| III.2 | CONFECTION DES EPROUVETTES..... | 86 |
| III.3 | RECAPITULATION DE LA COMPOSITION DES DIFFERENTES GACHEES | 90 |
| III.4 | ESSAIS SUR BETON FRAIS | 90 |
| III.5 | ESSAIS SUR BETON DURCI | 95 |
| III.6 | CALCUL DE LA MASSE VOLUMIQUE SECHE..... | 101 |
| III.7 | METHODES PHYSIQUES DE CARACTERISATION DES MATERIAUX..... | 103 |
| | CONCLUSION | 120 |
| 7 | CONCLUSION GENERALE..... | 121 |
| 8 | REFERENCE BIBLIOGRAPHIE..... | 122 |
| 9 | ANNEXE A..... | 126 |
| 10 | ANNEXE B..... | 127 |
| | RESUME..... | 128 |

TABLE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure I.1: Les étapes de fabrication du ciment [4]..... | 6 |
| Figure I.2 : Les différents types de granulats [8]..... | 8 |
| Figure II.1 Procédé de fabrication du ciment..... | 13 |
| Figure II.2: Micrographe en lumière réfléchie d'une section polie..... | 14 |
| de clinker de ciment Portland [11] | 14 |
| Figure II.3 : CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#),..... | 16 |
| la porosité est repérée par (O) [11] | 16 |
| Figure II.4 : Microscopie Electronique à Balayage, Ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton. [11]..... | 17 |
| Figure II.5: Courbe calorimétrique de l'hydratation d'un ciment Portland [13]..... | 20 |
| Figure III.1 Métaux lourds et déchets « Incinérateurs » [16]..... | 24 |
| Figure III.2 Description du phénomène de relargage. | 26 |
| Figure I.1 Opération de quartage..... | 32 |
| Figure I.2 : Colonnes de tamis | 34 |
| Figure I.3 : Analyses granulométrique de sable et graviers. | 37 |
| Figure I.4 Grilles à fentes. | 40 |
| Figure I.5 : Equivalent de sable..... | 46 |
| Figure I.6 : Mesure de la masse volumique absolue | 47 |
| Figure I.7 Masse volumique apparente | 49 |
| Figure I.8 Mesure de la masse volumique apparente | 49 |
| Figure I.9 : Appareil de Micro-Deval | 51 |
| Figure I.10 : Appareil de Los Angeles | 54 |
| Figure I.11 appareil de vicat..... | 59 |
| Figure I.12 appareil de vicat..... | 59 |
| Figure I.13 Mésure le temps du début et fin de prise | 60 |
| Figure I.14 Appareil le Chatelier | 62 |
| Figure I.15 Mesure d'écartement A, B et C | 63 |
| Figure I.16 Schéma d'un spectromètre de diffraction des rayons X [28]..... | 65 |
| Figure I.17 analyse granulométrique du déchet | 67 |
| Figure I.18 Spectre obtenu par DRX pour le liant hydraulique utilisé, ciment CPA. | 68 |
| Figure I.19 Spectre obtenu par DRX pour le déchet..... | 69 |
| Figure I.20 Appareil du MEB..... | 70 |
| Figure I.21 Spectre obtenu par le MEB pour le déchet réel..... | 70 |

| | |
|--|------|
| Figure II.1 Courbe de référence..... | 76 |
| Figure II.2 Courbe de mélange selon Dreux-Gorisse..... | 79 |
| Figure II.3 Les pourcentage des différentes fractions granulaires..... | 82 |
| Figure III.1 Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 00% | 88 |
| Figure III.2 Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 10% | 88 |
| Figure III.3 Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 20% | 89 |
| Figure III.4 Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 30% | 89 |
| Figure III.5 Cône d'Abrams..... | 91 |
| Figure III.6 Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams | 92 |
| Figure III.7 Variation de l'affaissement en fonction de Différentes séries du béton | 92 |
| Figure III.8 Aéromètre | 93 |
| Figure III.9 Evolution du volume d'air entraîné en fonction de différentes série du béton..... | 94 |
| Figure III.10 Masse fraiche | 95 |
| Figure III.11 Conservation des éprouvettes..... | 96 |
| Figure III.12 Evolution des masses volumiques en fonction du temps..... | 97 |
| Figure III.13 Surfaçage des éprouvettes..... | 99 |
| Figure III.15 Ruptures des éprouvettes..... | 99 |
| Figure III.14 Presse de compression..... | 99 |
| Figure III.16 Résistance à la compression en fonction de différentes séries du béton..... | 100 |
| Figure III.17 Exemple de préparation mécanique | 105 |
| Figure III.18 Spectre obtenu par DRX pour le béton 00%..... | 106 |
| Figure III.19 Spectre obtenu par DRX pour le béton 10% avant lixiviation. | 107 |
| Figure III.20 Spectre obtenu par DRX pour le béton 20%..... | 108 |
| Figure III.21 Spectre obtenu par DRX pour le béton 30%..... | 109 |
| Figure III.22 Spectre obtenu par DRX pour le béton 10% après lixiviation. | 114 |
| Figure III.23 Spectre obtenu par DRX pour le béton 10% avant et après lixiviation..... | 115. |
| Figure III.24 Schéma de principe d'un spectrophotomètre IR à double faisceau [41]..... | 119 |
| Figure III.25 Spectre Infrarouge du matériau après lixiviation..... | 120 |

TABLE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau I-1 Types de ciment | 7 |
| Tableau I-2 : Les granulats les plus utilisés | 8 |
| Tableau III.2 Source de pollutions par les métaux lourds | 24 |
| Tableau I.1: Dimensions nominales des tamis. | 33 |
| Tableau I.2 : Analyses granulométriques du gravier 15/25..... | 35 |
| Tableau I.3 : Analyses granulométriques du gravier 8/15..... | 35 |
| Tableau I.4 : Analyses granulométriques du sable 0/3..... | 36 |
| Tableau I.5 Correspondance entre classes granulaires d/D et largeur E des grilles à fentes utilisées | 39 |
| Tableau I.6 Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 15/25 | 41 |
| Tamisage sur tamis..... | 41 |
| Tableau I.7 Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 08/15 | 42 |
| Tableau I.8 : Teneur en impureté des graviers à 15/25 et 8/15..... | 43 |
| Tableau I.9 : Equivalent de sable | 46 |
| Tableau I.10 : Masse volumique absolue | 48 |
| Tableau I.11 : Masse volumique apparente | 49 |
| Tableau I.12 : Charge abrasive correspondant à chaque classe granulaire. | 51 |
| Tableau I.13 : Mesure du coefficient « MDE » des granulats 8/15 et 15/25 | 52 |
| Tableau I.14 : Charges des boulets correspondants à chaque classe granulaire. | 53 |
| Tableau I.15 : Mesure du coefficient Los Angeles des granulats 15/25 et 8/15 | 55 |
| Tableau I.16 : Récapitulatif de tous les résultats des essais | 55 |
| Tableau I.17 : Los Angeles..... | 56 |
| Tableau I.18 : Granularité des graviers..... | 56 |
| Tableau I.19 : Résultats sur la granularité des graviers | 56 |
| Tableau I.20 Granularité du sable | 57 |
| Tableau I.21 Résultats sur la granularité du sable..... | 57 |
| Tableau I.22 Module de finesse | 57 |
| Tableau I.23 Teneur en fines | 57 |
| Tableau I.24 temps de début et de fin de prise..... | 61 |
| Tableau I.25 Les résultats obtenus à partir des mesures d'écartement..... | 63 |
| Tableau I.26 Classement dimensionnel par tamisage du déchet. | 66 |
| Tableau I.27 Analyse du déchet par le MEB | 71 |
| Tableau I.28 Analyse chimique du sable 0/3..... | 71 |

| | |
|---|-----|
| Tableau II.1 : Qualités de divers paramètres en fonction soit de l'ouvrabilité, soit de la résistance recherchée pour un béton..... | 74 |
| Tableau II.2 Valeurs de K | 77 |
| Tableau II.3 Les valeurs des tamisats (%) de la courbe de mélange..... | 78 |
| Tableau II.4 Récapitulatif de la composition du béton | 83 |
| Tableau III.1 Récapitulatif de la composition des gâchées | 90 |
| Tableau III.2 les quatre classes de consistances | 90 |
| Tableau III.3 Valeurs des masses volumique calculées des différents bétons étudiés..... | 102 |
| Tableau III.04 Lixiviation du béton 10% à l'eau déminéralisée pendant 18h..... | 113 |

NOTATIONS

RC : Résistance à la Compression.

CPJ : Ciment Portland Artificiel.

E/C : Eau/Ciment

FM : Fibres Métalliques

BT : Béton Témoin

ENOF : Entreprise Nationale des Produits Miniers non ferreux et des Substances.

NFP : Norme Française.

ESP : Equivalent de sable mesuré au piston.

ESV : Equivalent de Sable mesuré à Vue.

MDE : Micro Deval.

LA : Los Angeles.

LTP Est : Laboratoire des Travaux Publique Est

DRX: Diffraction des Rayons X

MEB: Microscopie Electronique à Balayage

TCLP: Toxicité Characteristic Leaching Procédure

IR: InfraRouge

INTRODUCTION GENERAL

L'ère industrielle initiée à la fin du XIX siècle, s'est développée de manière fulgurante grâce aux innovations successive qui ont révolutionné les modes de productions et de consommation et qui ne cessent de dégrader la qualité de l'environnement.

La quantité des déchets produite est de plus en plus importante, dans certains pays plus de 30 000 tonnes de déchets sont produites chaque année, les rejets industriels (industrie métallurgique) contient des quantités de métaux lourds qui ont des conséquences désastreuses pour l'environnement et la santé humaine.

Devant les besoins croissant des ressources en matériaux et aux exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation de déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine de génie civil.

Les contraintes d'ordre économique et écologique de ces dernières années ont rendu nécessaire la valorisation et le recyclage des déchets. Le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement et de bien utiliser l'énergie doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton.

L'unité BCR (boulonnerie, coutellerie et robinetterie) de Bordj-Menaiel qui s'occupe de la fabrication des outillages ménagers, rejet à la fin de l'opération d'argentage de ces derniers un déchet qui contient des quantités en métaux lourds, ce déchet est stocké dans des sacs en plastique qui sont préservés dans des conteneurs en métal. Dans le but de proposer un mode de traitement pour que ce déchet soit revalorisé ou stocké d'une façon définitive, nous nous intéresserons dans notre étude à la caractérisation des propriétés physico-chimique du déchet concerné.

Pour atteindre cet objectif, une méthodologie de travail a été suivie, elle comporte essentiellement deux parties à savoir

la première partie concerne à l'étude bibliographique qui est destinée dans le premier chapitre, aux rappels sur les constituants du béton et le processus de sa préparation, dans le deuxième chapitre nous présenterons le processus d'hydratation du ciment et les différentes réactions chimiques. Le dernier chapitre sera consacré à la présentation des déchets ultimes et les métaux lourds et les différentes recherches effectuées sur les fibres métalliques.

Dans la seconde partie, qui est l'étude expérimentale, nous avons commencé par la définition des caractéristiques des différents matériaux entrants dans la composition des bétons. Le deuxième chapitre consacré à l'étude de la formulation des bétons qui consiste à définir les pourcentages des différents granulats, ainsi les dosages en eau et en ciment selon la méthode de DREUX-GORISSE. Le troisième chapitre, débute par une présentation des différents composants de nos mélanges, puis une présentation des résultats et leurs interprétations. Enfin, une conclusion générale reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude.

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

I. LES CONSTITUANTS DU BETON

II. HYDRATATION DU CIMENT

III. GENERALITE SUR LES DECHETS

CHAPITRE I

CONSTITUANTS DU BETON

INTRODUCTION

Le béton comme matériau le plus utilisé dans la construction, permet de réaliser des structures technologiques telles que les barrages, ponts, immeubles, tunnels, centrales nucléaires. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance à la compression et au feu, sa durabilité, son faible coût et d'autres qualités. Les origines de béton remontent à la plus haute antiquité, mais c'est au XX^{ème} siècle que l'utilisation de béton se généralise aux dépens de l'acier et de maçonnerie. Aujourd'hui, le béton doit répondre à un ensemble de spécifications très précises qui sont particulièrement la résistance et la durabilité.

I.1 COMPOSITION DU BETON

Le béton est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Le liant peut être " hydraulique " (car il fait prise par hydratation ; ce liant est couramment appelé ciment) ; on obtient dans ce cas un béton de ciment. On peut aussi utiliser un liant hydrocarboné (bitume), ce qui conduit à la fabrication du béton bitumineux. Le coulis est un mélange très fluide de ciment et d'eau. Enfin, lorsque les agrégats utilisés avec le liant hydraulique se réduisent à des sables, on parle alors de mortier (sauf si l'on optimise la courbe granulatoire du sable et dans ce cas on parle de béton de sable).

Comme tous les matériaux, un bon béton se distingue du mauvais béton par plusieurs qualités telles que :

- Résistance mécanique élevée (25 à 40 MPa).
- Imperméabilité à l'eau et absence de réaction chimique avec l'acier.
- Bonne mise en œuvre (facile à couler).
- Bonne tenue dans le temps.

Ces résultats seront obtenus, en jouant sur les paramètres suivants :

- La qualité ciment, Agrégats.
- Le dosage de ciment (quantité).
- Un bon mélange (homogénéité).

Les résistances mécaniques en compression obtenues classiquement sur éprouvettes cylindrique 16×32 mm, sont de l'ordre de :

- BFC : bétonnage fabriqué sur chantier : 25 à 35 MPa, peut parfois atteindre 50 MPa
 - BPE : béton prêt à l'emploi, bétonnage soigné en usine (préfabrication) : 40 à 60 MPa
 - BHP : béton hautes performances : jusqu'à 200 MPa
 - BUHP : béton ultra hautes performances, en laboratoire : 500 MPa.
- La résistance en traction est moindre avec des valeurs de l'ordre 2,1 à 2,7 MPa pour un béton de type BFC.

I.1.1 Le ciment

Le ciment est une matière pulvérulente (en d'autre termes poudre), formant avec l'eau une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées comme par exemple du mortier en le mélangeant à du sable ou bien du béton en le mélangeant à du sable et du gravier. [1]

I.1.1.1 Les Constituants du ciment : [2,3]

Le ciment est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les autres constituants associés au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques.

I.1.1.2 Fabrication du ciment

Le ciment est généralement fabriqué en cuisant vers 1 450 °C des mélanges de calcaire et d'argile (environ 80% de calcaire et 20% d'argile). On obtient alors des nodules durs, appelés clinkers (c'est en broyant très finement ceux-ci, additionnés d'un peu de gypse, qu'on produit le ciment Portland).

D'autres types peuvent être obtenus en mélangeant ce clinker broyé avec des constituants, broyés également, qui présentent des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques : ce sont soit des laitiers de hauts fourneaux granulés, soit des cendres volantes ou encore des pouzzolanes, naturelles ou artificielles.

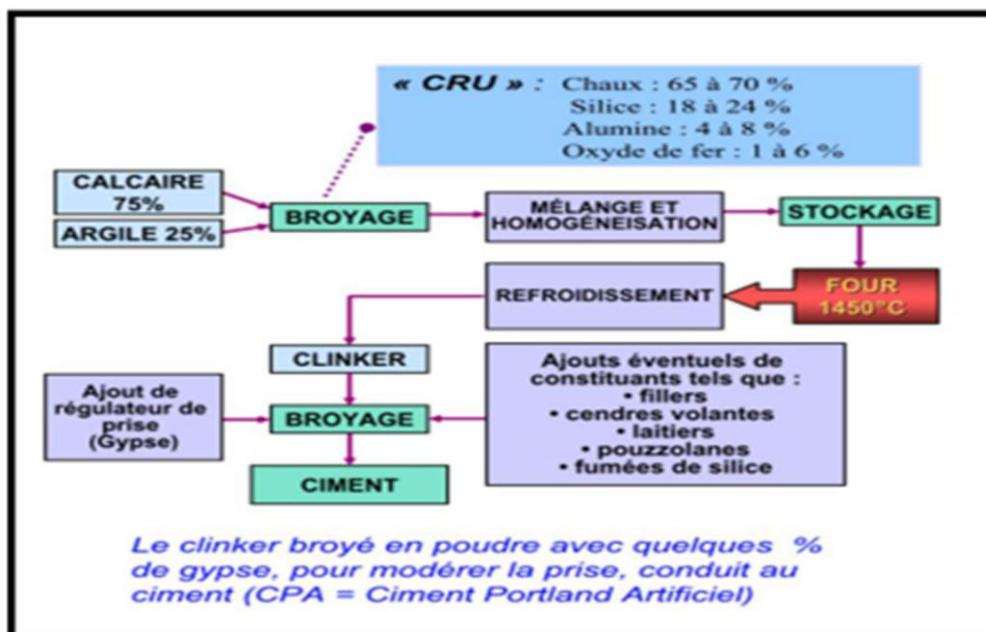


Figure I.1: Les étapes de fabrication du ciment [4]

I.1.1.3 Les différents Types de ciments

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne [2].

Ces types de ciment doivent être conformes au tableau I-1.

Tableau I-1 Types de ciment [5]

| Types de ciment | Notation | % Clinker(K) (y compris le gypse) | % Autres constituants | Constituants secondaires |
|---|---------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Ciment portland | CPA-CEM I | 95-100 | - | 0-5 |
| Ciment portland composé | CPJ-CEM II/A | 80-94 | 6-20 | - |
| | CPJ-CEM II/B | 65-79 | 21-35 | - |
| Ciment de haut fourneau | CHF-CEM III/A | 35-64 | 36-65 | 0-5 |
| | CHF-CEM III/B | 20-34 | 66-80 | 0-5 |
| | CLK-CEM III/C | 5-19 | 81-95 | 0-5 |
| Ciment pouzzolanique | CPZ- CEM IV/A | 65-90 | 10-35 | 0-5 |
| | CPZ- CEM IV/B | 45-64 | 36-55 | 0-5 |
| Ciment aux laitiers et aux cendres | CLC- CEM V/A | 40-64 | 18-30 | 0-5 |
| | CLC- CEM V/B | 20-39 | 31-50 | 0-5 |

I.1.2 Granulats [6]

Les granulats sont un ensemble de grains minéraux de tailles comprises entre 0 et 125 mm et classés par « dimensions » croissantes, en plusieurs familles : fillers, sables, graves, gravillons et ballasts.

Les granulats utilisés dans le béton ont plusieurs origines : ils peuvent être naturels, artificiels ou recyclés (à partir de bétons de démolition concassés). Quelles que soient leurs origines, les granulats doivent répondre à des normes spécifiques (NF EN 12620 et XP P 18-545 notamment) qui définissent leurs caractéristiques chimiques, géométriques, mécaniques, physiques et physico-chimiques.



Figure I.2 : Les différents types de granulats [8]

I.1.2.1 Dimensions des granulats

La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un granulat. Les granulats sont désignés par le couple d/D .

Tableau I-2 : Les granulats les plus utilisés [7]

| Les granulats les plus utilisés | | |
|---------------------------------|------------|--|
| Familles | Dimensions | Caractéristiques |
| Fines | 0/D | $D < 2 \text{ mm}$ avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm |
| Sablon | 0/D | $D \leq 1 \text{ mm}$ avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm |
| Sables | 0/D | $1 < D \leq 6,3 \text{ mm}$ |
| Graves | 0/D | $D > 6,3 \text{ mm}$ |
| Gravillons | d/D | $d \geq 1 \text{ mm}$ et $D \leq 125 \text{ mm}$ |
| Ballasts | d/D | $d = 20 \text{ mm}$ et $D \leq 50 \text{ mm}$ |

D'après la norme XP P 18-540 les caractéristiques essentielles des granulats destinés aux bétons hydrauliques sont les suivantes pour : [8]

- a) **le gravier** : grains de dimensions allant de 1 à 25mm, d'après la norme P18-591 L'essai de propreté des graviers consiste à déterminer le pourcentage d'éléments $< 0,5 \text{ mm}$, le pourcentage de vase et argiles, éliminées lors de l'essai doit être $\leq 1,5\%$ pour gravillons n'ayant pas subi de concassage, et $\leq 3\%$ pour ce qui ont subi le Concassage. La granularité du gravier est fixée par D prescrit ou admissible pour le Béton à préparer, l'absorption d'eau la norme NF P18-541 fixe à 5% la valeur Maximale pour les bétons hydrauliques.

b) **le sable** : Ces grains de sable, de même origine que les granulats, ont un diamètre Inférieur à 5mm. Le sable doit être propre et sans poussières argileuses. Il existe un Béton

contenant uniquement du sable, du ciment et de l'eau. Le mortier sert principalement en maçonnerie pour lier les briques ou les parpaings, et Pour dresser les enduits sur les murs.

c) **les fillers** : grains de dimensions allant de 0 à D ou $D < 2\text{mm}$ avec au moins 70% de Passant à 0,063 mm d'après la norme XP P 18-540

I.1.2.2 Différents types de granulats

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être :

- **Naturel**: d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).

- **Artificiel**: d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.

- **Recyclé**: obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

I.1.3 L'eau de gâchage [5]

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher du béton parce qu'elles contiennent, dans certains cas, un excès d'impuretés qui détériore les propriétés du béton, notamment les propriétés physiques et mécaniques (prise et résistance), les propriétés esthétiques (taches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures, stabilité du béton). Ces impuretés, éventuellement contenues dans l'eau de gâchage, sont soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis-à-vis du ciment, des granulats ou des armatures, soit des particules en suspension qui, du fait de leur quantité ou de leur qualité, sont indésirables.

I.1.4 Les Adjuvants [6]

Ainsi que le définit la norme NF EN 934-2, un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5% de la masse du ciment) aux bétons, mortiers ou coulis lors du malaxage ou de la mise en œuvre, provoque les modifications recherchées de telle ou telle de leurs propriétés, à l'état frais ou à l'état durci.

- **La norme NF EN 934-2** classe ces adjuvants suivant leur fonction principale, en trois grands types :
- **Ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton** : plastifiants-réducteurs d'eau, super plastifiants

- **Ceux qui modifient la prise et le durcissement** : accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement et retardateurs de prise
- **Ceux qui modifient certaines propriétés particulières** : entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse.

CONCLUSION

Le béton est un matériau formé par un mélange de ciment, de sable, de gravillon et d'eau, et éventuellement d'adjuvants et d'additions, chacun de ces constituants joue un rôle différent dans le comportement de béton frais, pendant la prise et le durcissement.

Les ciments courants offrent une large gamme de possibilités par le choix de leur classe (résistance mécanique) et par leur type (meilleur environnement). Les granulats constituent la phase dominante du béton, dont ils occupent environ 70% du volume. Ils forment l'ossature du matériau.

La sélection et le dosage des différentes fractions granulaires sont un aspect essentiel pour l'obtention d'un béton satisfaisant. Ils doivent être propres et de bonnes résistances mécaniques.

Actuellement le recours aux adjuvants et aux additions est une pratique courante au point où la quasi-totalité des bétons destinés aux grands ouvrages contiennent ces ajouts.

CHAPITRE II

HYDRATATION DU CIMENT

INTRODUCTION

Les réactions du ciment portland en présence d'eau ou "hydratation" produisent des composés hydratés qui permettent de lier les différentes particules de ciment et de granulat ce qui confère au béton ces qualités de résistance mécanique. Ces réactions s'accompagnent d'effets secondaires qui peuvent produire des dégradations du matériau lorsqu'ils ne sont pas pris en compte. L'un de ces effets est la chaleur dégagée lors de ces réactions d'hydratation dont la grandeur dépend de la composition du ciment. Ces propriétés liées aux réactions d'hydratation doivent permettre de pouvoir travailler le produit béton jusqu'à sa mise en place. Elles doivent aussi permettre au produit de durcir dans un temps suffisamment court pour pouvoir poursuivre les travaux de construction.

II.1 GENERALITE SUR LES LIANTS HYDRAULIQUES [09]

Pour définir les différents constituants d'un ciment, nous utiliserons la notation cimentière qui est la suivante : C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃, S = SO₃ et H = H₂O.

Le ciment Portland est le liant le plus fréquemment utilisé dans beaucoup de domaines. Il est composé à plus de 97 % de clinker ainsi que de gypse. Le clinker est un produit obtenu par cuisson à haute température et broyage de roches calcaires (80 %) et argileuses (20 %). Le ciment Portland ordinaire est composé de quatre phases majeures : 40 à 60 % d'alite (silicate tricalcique - C₃S) ; 15 à 30 % de bélite (silicate bicalcique - C₂S) ; 5 à 15 % de célite (aluminat tricalcique - C₃A) ; et 5 à 15 % de ferrite (ferroaluminat tétracalcique - C₄AF).

Certains sous-produits industriels possédant des propriétés hydrauliques, ou pouzzolaniques, peuvent être utilisés comme liant, alternativement au ciment Portland. Les laitiers de haut fourneau sont un sous-produit minéral du traitement du minerai de fer, qui présente des propriétés hydrauliques. Leur hydratation est plus lente que celle du ciment Portland et produit moins de portlandite (réaction pouzzolanique) ; elle dégage aussi moins de chaleur. Les laitiers possèdent une bonne résistance aux sulfates. Les cendres volantes sont des résidus de combustion provenant de centrales thermiques possédant des propriétés pouzzolaniques. Un réactif pouzzolanique peut s'hydrater en consommant de la chaux pour former des gels silico-calciques hydratés (C-S-H). Cette réaction est lente et fournit beaucoup de chaleur. L'ajout d'un réactif pouzzolanique dans le ciment permet d'améliorer sa résistance en milieu acide. Il existe des réactifs pouzzolaniques naturels tels que les roches ou cendres volcaniques riches en silice, alumine et oxyde de fer (pouzzolanes) qui étaient déjà utilisées dans l'antiquité. Outre les cendres volantes et les laitiers, beaucoup de sous-produits industriels sont utilisés pour leurs effets pouzzolaniques tels que la fumée de silice et les cendres de balle de riz.

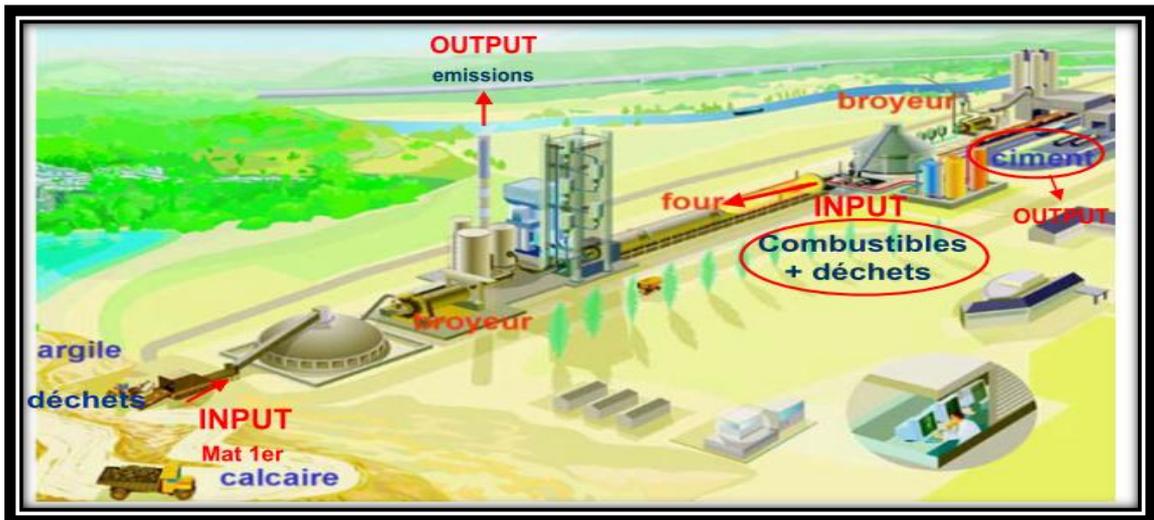


Figure II.1 Procédé de fabrication du ciment

II.2 HYDRATATION

Les composés principaux formés dans le ciment et qui confèrent les propriétés de prise et de résistance sont les silicates de calcium, $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ et $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$. Lorsqu'on les mélange avec l'eau, ces composés anhydres s'hydratent et durcissent lentement en suivant le comportement bien connu du ciment.

L'aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$, forme aussi un hydrate avec l'eau; bien qu'il contribue aux propriétés de prise et de durcissement. Comme le cas se présente pour la plupart des réactions chimiques, le taux d'hydratation, et par suite le gain de résistance, augmente en même temps que la température. On utilise souvent, spécialement par temps très chaud, un adjuvant retardateur pour modifier la durée de prise. Les adjuvants accélérateurs non seulement affectent la durée de prise du béton, mais aussi servent principalement à augmenter la vitesse de gain de résistance en accroissant la vitesse d'hydratation. [10]

II.3 LA PRISE

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte avec échauffement; on le détermine à l'aide de l'aiguille de Vicat. Les temps de début de prise peuvent varier de quelques minutes, pour les ciments prompts, à plusieurs heures pour les ciments à prise lente. Pour la plupart des ciments courants, le début de prise à 20°C se situe entre 2 et 5 heures.

II.4 DURCISSEMENT

Après la prise, le phénomène d'hydratation se poursuit; c'est la période de durcissement. Elle est beaucoup plus longue. Pour les ciments à durcissement rapide on obtient après quelques jours la presque totalité de la résistance, mais pour d'autres ciments le durcissement se poursuit pendant des mois.

II.5 COMPOSITION DU CIMENT PORTLAND [11]

Les ciments commerciaux sont issus du mélange du clinker broyé et du gypse. Les 4 composés minéralogiques principaux du clinker sont :

- les silicates :
 - Tricalciques : $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ou C_3S (50 à 70%)
 - Bicalciques: $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ou C_2S (20 à 25 %)
- les aluminates :
 - Tricalciques: $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A (5 à 15 %)
 - Ferroaluminate tétracalcique: $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ ou C_4AF (2 à 16 %)

Une photo de clinker de ciment portland avec les différentes phases qui le composent est présentée à la Figure II.1. On retrouve également dans le clinker des sulfates alcalins et de la chaux libre. À la sortie du four, le clinker est ensuite mélangé avec une quantité de gypse (teneur maximale de 5%) pour être broyé. Les différents types de ciment sur le marché se distinguent principalement par leurs proportions en silicates et en aluminates.

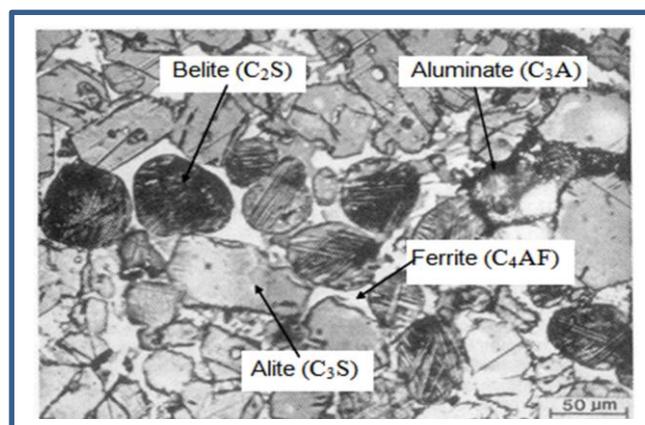


Figure II.2: Micrographe en lumière réfléchie d'une section polie de clinker de ciment Portland [11]

La taille et la forme des grains de ciment influencent beaucoup son hydratation. Le broyage du clinker permet d'obtenir des particules fines mais de forme angulaire, Plus un ciment est fin, plus sa surface spécifique est grande, ce qui permettra alors d'augmenter sa réaction avec l'eau. Dans un ciment Portland ordinaire, on retrouve :

- De 7 à 9 % de grains très fins de diamètres inférieurs à 2 μ m
- De 0 à 4% de grains grossiers de diamètres supérieurs à 90 μ m

II.6 HYDRATATION DES COMPOSANTS DU CIMENT

Lorsque le ciment entre en contact avec l'eau, une réaction exothermique instantanée se produit avec une forte libération de chaleur, cette période dite de pré-induction est de courte durée (10-20 minutes). Elle est suivie d'une période relative inactivée appelée période d'induction ou période dormante au cours de laquelle le dégagement de chaleur est faible, mais jamais nul. La durée de cette période peut varier entre 2 et 8 heures.

La période d'induction est très importante quant à l'ouvrabilité des bétons et mortiers, car à sa fin s'amorce la prise du ciment avec un fort dégagement de chaleur qui correspond à la période d'accélération associée au début de prise et de durcissement du ciment. Pour comprendre les changements chimiques et physiques qui se produisent au cours de l'hydratation du ciment portland, il est essentiel d'étudier séparément les réactions des silicates et des aluminates.

a. Hydratation du silicate tricalcique C₃S [11]

L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté et l'hydroxyde de calcium. La réaction du C₃S avec de l'eau est la suivante:



Où CSH représente le 3CaO.2SiO₂. 3H₂O (Silicate de calcium hydraté) et CH représente le Ca(OH)₂ (Portlandite).

Les hydrates ainsi obtenus au cours de l'hydratation du C₃S (figure II.3) sont:

- ♦ les silicates de calcium hydratés (CSH) qui occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils ont une structure en feuillets

formées de cristaux très petits et mal cristallisés. La surface spécifique est très élevée (100 - 700 m²/g).

♦ L'autre composant principal dans l'hydratation des silicates tricalciques est l'hydroxyde de calcium CH (ou Portlandite) qui occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate.

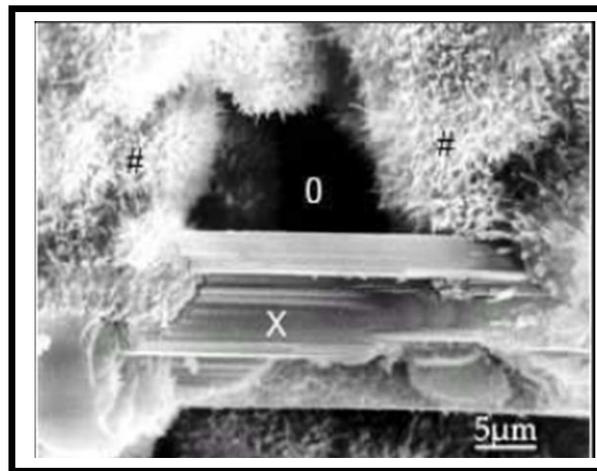
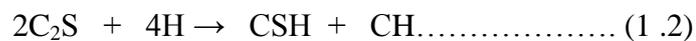


Figure II.3 : CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#), la porosité est repérée par (O) [11]

b. Hydratation du silicate bi calcique C₂S

Une fois hydraté, C₂S donne aussi des CSH. La réaction est donnée par:



Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C₃S mais avec moins d'évolution de la chaleur. L'hydratation de C₃S produirait 61% de gel de CSH et 39% de CH alors que l'hydratation de C₂S produirait 82% de gel de CSH et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C₂S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C₃S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée.

c. 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 l'Ettringite hydraté qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale (Figure II.4).

La réaction est donnée par:

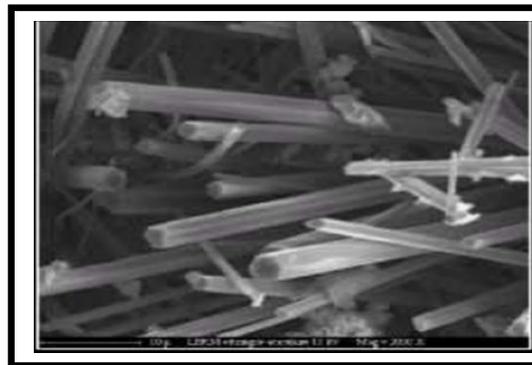
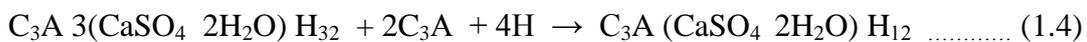


Figure II.4 : Microscopie Electronique à Balayage, Ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton. [11]

Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en ettringite. Il apparaît donc secondairement un mono sulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales. La réaction est donnée par:



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

d. Hydratation de l'aluminoferrite tétra calcique 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 sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C₄AF pour donner une basse forme de sulfoaluminate. Ces sulfoaluminates 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. L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

➤ La résistance mécanique du ciment [12]

L'aluminate tricalcique C_3S , en présence des autres minéraux du clinker, favorise la croissance rapide de la résistance pendant les premiers jours de durcissement. L'aluminoferrite tétra-calcique se comporte assez activement pendant le durcissement.

Les facteurs technologiques pour leur part, ont de l'influence sur la résistance mécanique, parmi ces facteurs, on distingue :

- Le rapport E/C, plus ce rapport est petit, plus la vitesse de croissance ainsi que la résistance finale sont grandes.
- La finesse de mouture des ciments qui est un facteur technologique caractérisée par sa surface spécifique ou surface développée des grains contenus dans une masse donnée. A une augmentation de finesse correspond une augmentation des résistances précoces (2 et 7 jours).

II.7 EVOLUTION DE L'HYDRATATION [13]

L'hydratation des ciments Portland est un phénomène complexe mettant en jeu des réactions chimiques entre les composants du ciment et l'eau de gâchage. Ce processus physico-chimique est à l'origine de la prise et du durcissement de la matrice cimentaire.

Les réactions d'hydratation s'accompagnent d'un dégagement de chaleur qui peut être mesuré par calorimétrie. La chaleur dégagée donne alors une indication sur l'avancement du processus d'hydratation. **A.pertué [13]** résume dans son étude bibliographique l'évolution du flux de chaleur qui peut être divisée en cinq parties présentées à la figure II.5

➤ Etape 1

Dès que le ciment entre en contact avec l'eau, la dissolution partielle des grains anhydres engendre un premier pic important de dégagement de chaleur. Les réactions entre le C_3S , le C_3A et l'eau commencent et génèrent également un dégagement important et rapide de chaleur. Il se forme alors des C-S-H et de l'ettringite. La durée de cette période est très courte, environ 10 minutes.

➤ Etape 2

Cette phase est appelée "*période dormante*". Elle correspond à un dégagement de chaleur relativement faible, bien que non nul. Durant cette période, des ions Ca^{2+} et OH^- sont libérés. Ceci augmente alors le PH de la solution jusqu'à environ 12,5 et ralentit la dissolution des constituants. Le dégagement de chaleur est alors faible. Les transformations physiques durant cette période sont détectées par l'augmentation du de la pâte.

➤ Etape 3

Cette étape met fin à la période dormante. Il se produit alors une accélération du dégagement de chaleur. Ce dégagement atteint un pic généralement entre 9 et 10 heures pour une pâte de ciment Portland conservée à 20°C. Cette phase débute lorsque la concentration de la solution en ions Ca^{2+} et OH^- devient critique. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (C-S-H) et des phases cristallines (Principalement portlandite et ettringite). Cette grande activité chimique dégage beaucoup de Chaleur, augmentant la température du matériau. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et permettent alors la formation d'un solide rigide.

➤ Etape 4

On assiste à une décélération de la réaction d'hydratation du C_3S .

La couche d'hydrates s'épaissit autour des grains anhydres et rend plus difficile les échanges ioniques. Les réactions de précipitation dissolution sont alors progressivement remplacées par un processus diffusionnel.

➤ Etape 5

Cette dernière période, dite de réaction lente, correspond à un dégagement de chaleur faible et décroissant (non nul) mais continu. Le système réagit lentement et les réactions d'hydratation se déroulent uniquement par un processus diffusionnel, pendant des mois, voire des années.

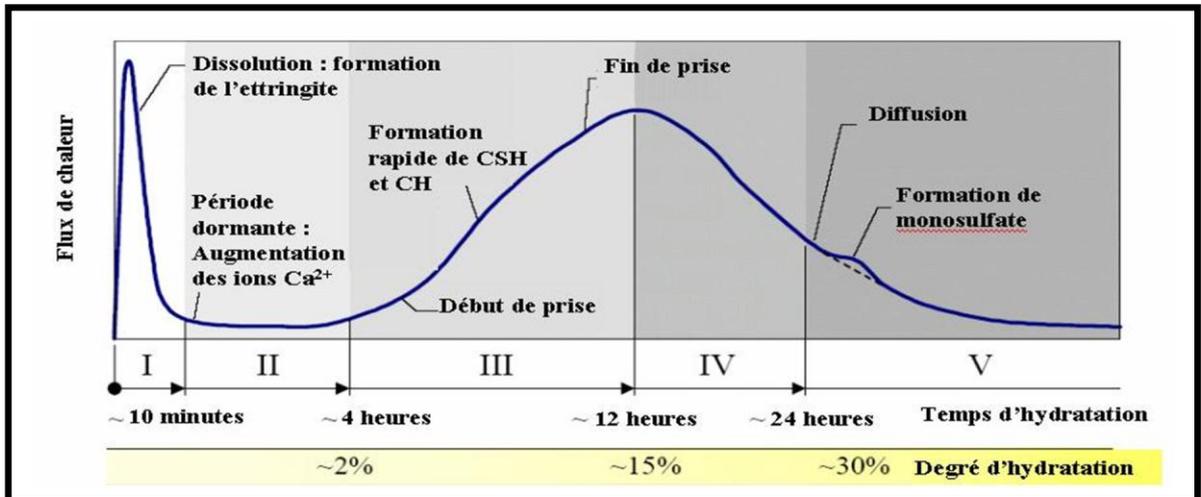


Figure II.5: Courbe calorimétrique de l'hydratation d'un ciment Portland [13]

CONCLUSION

La réaction d'hydratation du ciment combine les réactions d'hydratation des principaux composants du clinker et, éventuellement, celles de ses composants secondaires.

Cependant, les réactions sont plus complexes du fait des interactions chimiques et thermiques qui se produisent au cours du processus d'hydratation et du fait des impuretés présentes dans la solution solide qui influencent beaucoup l'hydratation de chaque phase.

CHAPITRE III

GENERALITE SUR LES DECHETS

INTRODUCTION

Les sources de déchets sont nombreuses et variées : activité des ménages, commerces, activités de soins, industries divers, bâtiment et travaux publics, agriculture, effluents liquides, résidus de traitement. Parce qu'ils sont une conséquence de notre mode de vie dans un monde développé, ils ne cessent de croître en quantité, en nocivité et en complexité.

L'augmentation de leur quantité résulte ; de l'évolution des processus de production, des méthodes de marketing et des modes de consommation. Cette évolution, outre une croissance générale de la production liée à celle du niveau de vie, se manifeste par la multiplication des produits jetables, la moindre durabilité des biens engendrée notamment par des phénomènes de mode, l'inflation des emballages, l'emploi de matières premières plus difficiles à éliminer.

III.1 NATURE ET PREVENANCE DES DECHETS ULTIMES

Les déchets admissibles dans un centre de stockage de déchets dangereux proviennent de processus industriels ou d'installation de dépollution :résidus de l'incinération, du traitement de déchets ,de la métallurgie, de station d'épuration d'eaux industrielles ,des déchets minéraux de traitement chimique ,des déchets d'amiante ,des terres souillées .Ils sont essentiellement solides ,minéraux, avec un potentiel polluant constitué des métaux lourds peu mobilisable .ils sont très peu réactifs ,très peu évolutifs et très peu solubles .Les déchets fermentescibles ,liquides ,radioactifs ,à risques infectieux , pulvérulentes non conditionnés ,explosifs , inflammables ,et chauds ou ayant une teneur en PCB (poly chlorobenzène) supérieure à 50ppm en masse sont interdits sur ces sites.

III.2 IMPLANTATION DES SITES

Des conditions géologiques et hydrogéologique favorables sont imposées pour l'implantation des centres de stockage des déchets dangereux .une barrière de sécurité dite passive d'épaisseur minimum de 5 mètre doit exister ,et constituée, soit de terrain naturel en l'état ,soit de terrain naturel remanié. La perméabilité de cette formation géologique doit être inférieure ou égale à 10^{-9} m/s.

III.3 DESCRIPTION DE L'UNITÉ BCR

L'unité de coutellerie de Bordj-menaïel est une filiale de groupe BCR, a été créé en 1977 suite à un accord entre l'état algérien et son homologue suisse.

a) Présentation de la filiale

Le groupe BCR (boulonnerie, coutellerie, robinetterie) est l'unique entreprise nationale utilisatrice de l'acier inoxydable.

L'unité coutellerie de Bordj-Menaïel (ORFEE) fait partie du groupe BCR. Ses objectifs ont naturellement pour :

- Satisfaction progressive d'une part importante de la demande nationale en produits finis dans le secteur de la mécanique ;
- Dégager une rentabilité satisfaisante à partir de l'ensemble des moyens d'exploitation ;
- Valoriser au mieux et veiller au développement des ressources humaines disponibles sur le marché national.

III.4 FONCTIONNEMENT DU CENTRE DE STOCKAGE DE DECHETS DANGEREUX

a. Procédure d'entrée des déchets sur le site

Pour être admis dans une installation de stockage, les déchets doivent satisfaire à une procédure d'acceptation composée de trois niveaux (contrôle chimique en laboratoire) : la caractérisation de base, la vérification de la conformité, et la vérification sur place.

Un déchet ne peut être admis dans une installation de stockage qu'après délivrance par l'exploitant au producteur de détenteur, d'un certificat d'acceptation préalable. Ce certificat est établi au vu des résultats de la caractérisation de base de la vérification de la conformité à la réglementation. La durée de validité d'un tel certificat est d'un an au maximum. Lorsque les déchets sont livrés conditionnés, une vérification de tout chargement individualisé arrivant sur le site est systématiquement effectuée.

III.5 METAUX LOURDS

Les métaux peuvent provenir en partie de l'altération de la roche mère du sous-sol. Cependant la plupart du temps leur origine est liée à l'activité humaine : stockage de déchets Industriels et urbains, pratiques agricoles, pollution due aux retombées atmosphériques par l'utilisation de combustibles fossiles, d'essences au plomb, de poussières des industries Métallurgiques, d'incinération des ordures ménagères [14]. (Figure III.1) Les sources Détaillées de la pollution par des métaux lourds sont synthétisées dans le (tableau.III.1) Suivant :

Tableau III.1 Source de pollutions par les métaux lourds [15]

| Métaux | Sources de polluants |
|-----------------|--|
| Cadmium | Engrais phosphatés; industries de traitement de surface des métaux; industrie de stabilisation des matières plastiques; fabrication des accumulateurs et des radiateurs automobiles; fabrication de colorants. |
| Cuivre | Fils électriques; radiateurs automobiles; appareils de chauffage; traitements de surface. |
| Zinc | Produits pharmaceutiques ou domestiques; conduites d'eau; peintures; piles; galvanisation; traitements de surface. |
| Nickel | Fabrication d'aciers et d'alliages spéciaux; recouvrement de surface par électrolyse; hydrogénation des huiles et substances organiques; fabrication de peintures; de laque et de produits cosmétiques. |
| Mercur | La fabrication et l'usage de catalyseurs; de fongicides; de pigments et composés mercuriels; les piles au mercure; la fabrication de chlore par électrolyse sur cathode de mercure; le traitement des minerais non ferreux; l'incinération de déchets et la combustion du charbon. |
| Chrome | L'extraction de la chromite, minéral de fer et de chrome; la métallurgie; la technologie des matériaux réfractaires et l'industrie de traitement de surface. |
| Plomb | La fabrication de batteries; peintures; additifs pour l'essence; industries pharmaceutiques et sidérurgiques; ateliers photographiques; télévisions. |
| Sélénium | Fabrication de peintures et colorants; verre; semi-conducteurs; insecticides; alliages. |
| Arsenic | L'extraction, le transport et le traitement métallurgique ; les rejets urbains ; la combustion du charbon; production de trioxyde d'arsenic pour les pesticides en agriculture et les traitements des bois. |

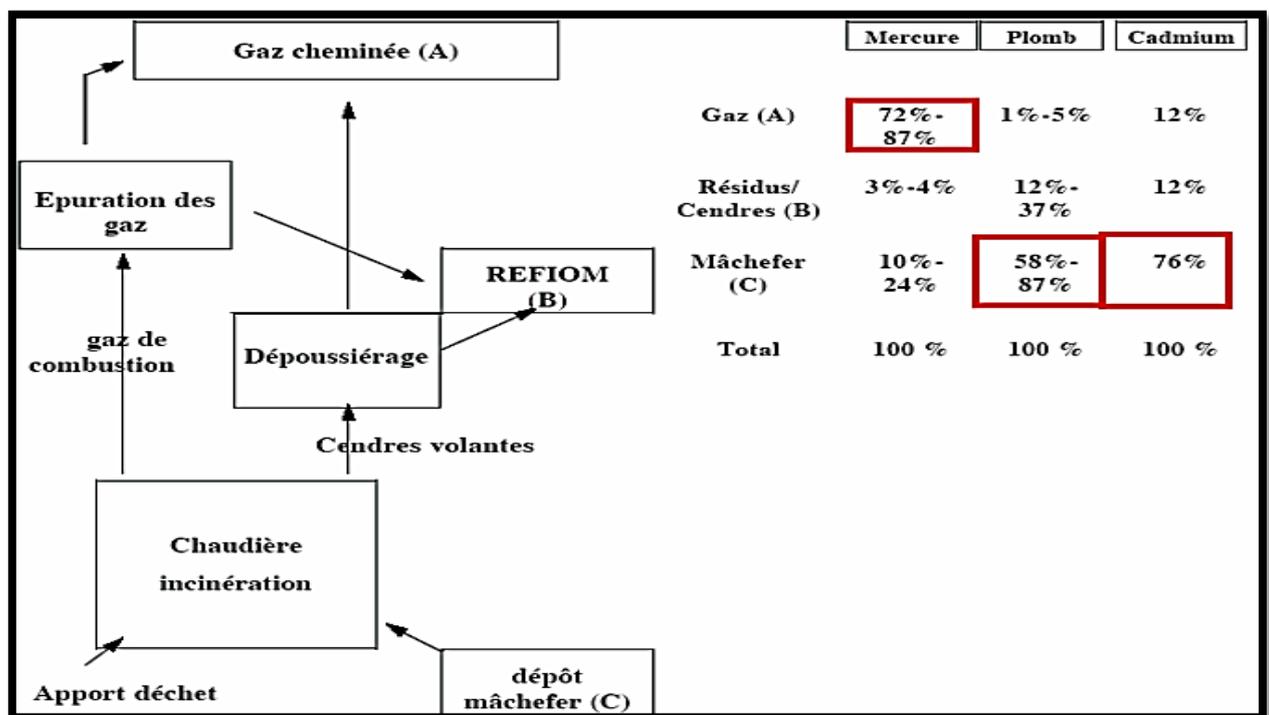


Figure III.1 Métaux lourds et déchets « Incinérateurs » [16]

III.6 LES TESTS DE LIXIVIATION

L'essai de lixiviation est défini par la norme française NF-X-31-210 [17] comme étant l'extraction liquide-solide, dans des conditions bien définies, d'un échantillon solide par une solution aqueuse. Le lixiviat, lui constitue le milieu chimique agressif de l'essai de lixiviation.

Il existe un grand nombre de tests de lixiviation, le choix de ces tests et leurs conditions expérimentales est effectué en fonction des objectifs posés et de contexte d'application.

Au niveau des applications normalisées, trois niveaux de tests sont distingués :

- Tests de caractérisation pour déterminer le comportement à la lixiviation à long terme
- Tests de conformité, vérification des paramètres du comportement par rapport à des valeurs de références (ils sont utilisés dans les pays européens pour l'admissibilité en décharge), ou par rapport aux mécanismes identifiés précédemment
- Tests courts, contrôle rapide sur site pour vérifier sur le terrain les résultats obtenus lors des tests de conformité.

Les tests de caractérisation sont considérés comme indispensables pour la prédiction du comportement à long terme des déchets stabilisés, stockés ou valorisés. Ils permettent d'identifier les paramètres essentiels contrôlant le relargage tel que : le temps de lixiviation, le ratio liquide/solide, le lixiviant (composition, pH, température... etc.), et les conditions de renouvellement du lixiviant.

III.7 DESCRIPTION PHENOMENOLOGIQUE DU RELARGAGE

Un matériau à base de liant hydraulique est un solide poreux dont les différentes phases (phases solides, phase liquide « solution des pores » et parfois air bloqué dans les pores) peuvent être considérées en équilibre thermodynamique. La mise en contact du matériau, fortement basique, avec de l'eau correspond à une lixiviation « acide » qui rompt l'équilibre et déclenche le processus de relargage. Il se traduit par la mise en place d'un flux massique, comme l'illustre la (figure III.4), des espèces constitutives de la matrice (hydrates) ou des éléments exogènes qu'elle contient (polluants) entre le solide et la solution de lixiviation, tendant vers un nouvel équilibre. Le relargage de toute espèce comprend d'une part les réactions de mobilisation de l'espace et d'autre part les mécanismes de transport qui amènent l'espèce hors du solide. La cinétique globale du relargage est imposée par l'étape limitant du phénomène.

Dans un matériau peu perméable le transport se fait par diffusion des espèces selon le gradient de concentration entre le matériau et la solution de lixiviation. Au tout début de la mise en contact du matériau avec la solution intervient le phénomène de lessivage (mise en solution des espèces présentes à la surface).

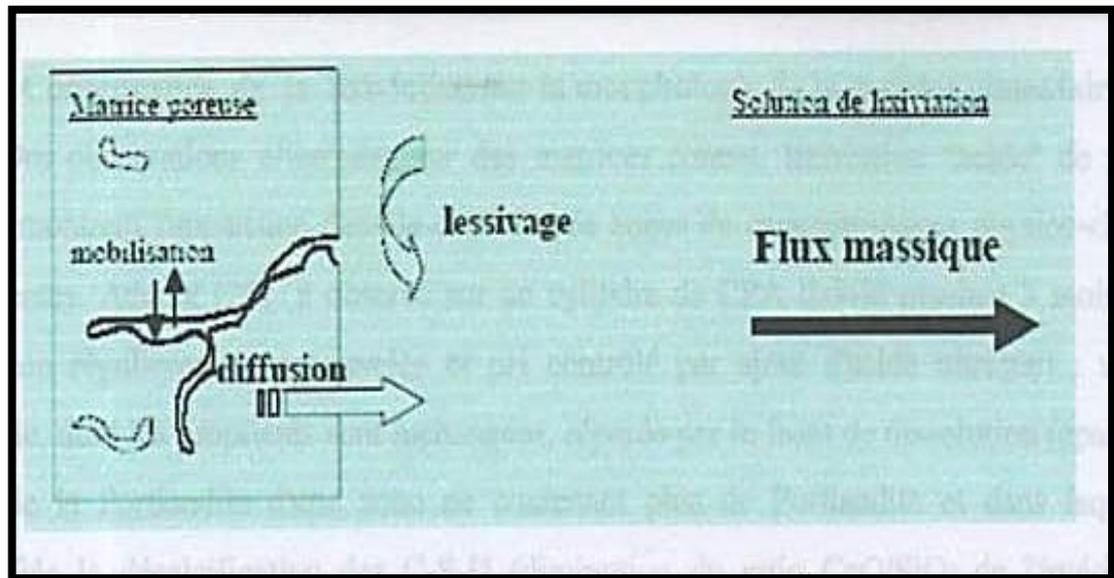


Figure III.2 Description du phénomène de relargage.

III.8 LES DIFFERENTES RECHERCHES EFFECTUEES SUR L'INFLUENCE DES FIBRES METALLIQUES SUR LES BETONS.

a. Effet des fibres métalliques sur la caractérisation et les variations dimensionnelles et pondérales des matrices cimentaires renforcées de fibres. [18]

L'objet de cette étude consiste à étudier à moyen et long terme, le comportement d'une matrice renforcée par des fibres métalliques commercialisées et recyclées. Deux types de fibres, utilisant une composition de base pour tous les mortiers, l'un fabriqué industriellement tandis que l'autre c'est une valorisation d'un sous-produit copeaux d'acier d'usinage ; Vis-à-vis des caractéristiques de variations dimensionnelles et pondérales des matrices renforcées de fibres d'acier et de vérifier la conservation de ce composite et d'analyser les améliorations apportées par ce type de renforcement.

L'intérêt premier de l'étude est l'utilisation de copeaux industriels à l'état brut comme renfort de matrices cimentaires.

La constatation faite est que les fibres diminuent un peu le retrait, par contre il y a très peu de différence entre les deux types de fibres. Après une longue durée, l'action des fibres est plus nette, car les matrices renforcées de fibres se stabilisent plus rapidement que les matrices sans fibres ; avec une plus grande ductilité dans le comportement en flexion et minimisent les ouvertures des fissures.

b. Effet du dosage en fibres métalliques ondulées sur le comportement mécanique des bétons à haute performances. [19]

Ce travail présente les résultats d'essais de compression et de flexion trois points menés sur des éprouvettes en béton à haute performance et béton à haute performance renforcées de fibres d'acier à base de matériaux locaux. Ces essais font partie d'un programme expérimental ayant pour but d'étudier l'influence du taux de fibres sur l'apparition et la propagation de fissures, et ainsi sur le comportement ductile de ces bétons. Les essais entrepris dans ce travail sur des petites poutres en BHP ont montré que l'ajout de fibres, même en faible quantité, améliore le comportement du matériau béton vis-à-vis de la traction et limite l'ouverture des fissures d'une manière appréciable. Dans ce sens, la formation des premières fissures est retardée. Une fois formées, ces fissures restent relativement fines parce qu'elles sont couturées par les fibres métalliques. Une poutre en béton témoin.

c. INFLUENCE DE LA RHEOLOGIE DES BETONS RENFORCES DE FIBRES METALLIQUES SUR LEURS PROPRIETES MECANIQUES. [20]

Cette recherche présente les résultats d'une étude expérimentale sur l'influence de la rhéologie sur l'orientation des fibres métalliques et par suite sur le comportement en flexion et compression des bétons de fibres. Plus précisément, l'étude l'influence de l'orientation d'un volume de 0,5 % de fibres sur les propriétés mécaniques d'un béton ordinaire fluide, d'un béton autoplaçant (seuil de cisaillement faible < 50 Pa) et d'un béton à hautes performances plastiques (seuil de cisaillement élevé > 100 Pa).

Les résultats montrent que la fluidité du béton suivi des effets de parois sont des paramètres essentiels de l'orientation et de la distribution des fibres. Dès lors l'obtention d'une orientation dans le sens de l'efficacité mécanique, un comportement en flexion nettement amélioré est observé, y compris pour un béton ordinaire. En revanche, il a été observé dans le cas d'un béton à hautes performances qu'une mauvaise orientation des fibres annule leurs contributions mécaniques en flexion (ductilité), la résistance à la compression n'étant pas affectée.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié et analysé le phénomène de lixiviation des matériaux cimentaires ainsi que les différentes méthodes d'essai de dégradation chimique. Ceci nous permet de bien comprendre la cinématique de lixiviation du matériau cimentaire et son influence sur les aspects physiques et mécaniques du matériau.

Pour cette raison nous avons tracé un programme expérimental visant à valoriser le déchet métallurgique (Fibres Métalliques) tout en substituant le ciment, en faisant des analyses de caractérisation physico-chimique des bétons de fibres (ajouts de fibres métalliques BCR).

ETUDE

EXPERIMENTALE

I. IDENTIFICATION DES MATERIAUX

II. FORMULATION DES BETONS

III. RESULTATS ET INERPRITATIONS

CHAPITRE I

IDENTIFICATION DES MATERIAUX

INTRODUCTION

Pour confectionner un béton selon les normes adéquates, il faut connaître les caractéristiques des différents constituants. La caractérisation des matériaux est indispensable pour toute recherche ou étude d'investigation, parce que chacune de ces caractéristiques a une influence importante sur les résultats d'étude. C'est pour cette raison qu'on procède à la caractérisation de chaque constituant du béton par des analyses et essais normalisés effectués au laboratoire.

Ce chapitre, sera consacré à la détermination des caractéristiques des différents matériaux entrants dans la composition du béton et leur classification selon les normes.

I.1 Présentation général

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiment et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage.

Les granulats étant d'origine diverse, naturelle, alluvionnaire, calcaire éruptive voire artificielle, ou provenant de sous produits industriels, il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire.

Certaines propriétés des granulats sont directement liées aux caractéristiques des roches originelles. D'autres caractéristiques dérivent du mode d'élaborations des granulats, que ce soit après extraction alluvionnaire, ou par concassage de roches massives en carrières.

I.2 Essai sur les granulats

I.2.1 Echantillonnage et prélèvement (NF P 18-533) [21]

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur les quantités réduites de matériaux. Ces quantités doivent permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble des matériaux dans lequel on a fait un prélèvement. On dit qu'il faut que l'échantillon soit représentatif.

Le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

- Prélèvement au niveau de la carrière d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai proprement dit.
- Au laboratoire: prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui doit être également représentative de l'échantillon de départ.

Chacun de ces deux échantillonnages doit donner un prélèvement aussi représentatif que possible de l'ensemble. Le premier est beaucoup plus embarrassant que le second.

➤ Prélèvement sur le tas (sable et gravier) [21]

Les essais que nous avons réalisés au laboratoire, ont porté sur des échantillons obtenus par des prélèvements sur les tas effectués au niveau :

- De la carrière BOUANDES pour les graviers et les sables.

Il s'agit de granulats qui sont mis en stock sous forme de tas. Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres.

On prélève donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

On prélève donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

➤ Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire)

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur. L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105°C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60 °C dans le cas contraire.

➤ Quartage

Comme le nom l'indique, on divise l'échantillon en quatre parties égales dont on ne retient que la moitié en réunissant deux quarts opposés.

Si cette quantité (1/2) est encore importante, Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué, l'opération pouvant se répéter trois ou quatre fois. On obtient ainsi un échantillon représentatif du matériau initial (figure I.1).

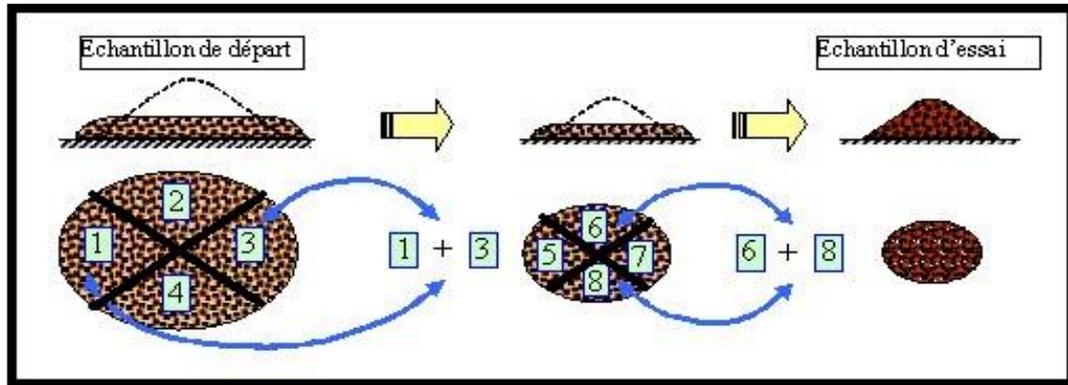


Figure I.1 Opération de quartage

I.2.2 Analyse granulométrique (NF P 18-560) [21]

➤ But de l'essai

Pour de nombreux travaux et pour l'exécution de nombreux essais, il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques de matériaux utilisés, caractéristiques qui représentent:

- Les dimensions.
- La forme.

- La masse volumique.
- La porosité.
- La teneur en impureté, de l'échantillon qui a été prélevé.

L'analyse granulométrique est la première de ces recherches, elle caractérise ces granulats en déterminant la grosseur des grains qui les constituent, et le pourcentage des grains de chaque grosseur.

➤ Principe de l'essai

L'analyse consiste à séparer et classer les grains constituant l'échantillon selon leur grosseurs en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

➤ Matériel utilisé

Ce sont des tamis dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée, sont réalisées soit à partir d'un maillage métallique, soit par perçage d'une tôle. La dimension nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique, depuis le tamis 0,063 mm jusqu'au tamis 80mm.

Les dimensions nominales normalisées des tamis, seuls appareils utilisés actuellement selon la norme (NF P 18-560), sont les suivantes :

Tableau I.1: Dimensions nominales des tamis. [21]

| | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Module | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| Tamis (mm) | 0.063 | 0.08 | 0.100 | 0.125 | 0.160 | 0.200 | 0.250 | 0.315 | 0.400 | 0.500 | 0.630 |
| Module | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| Tamis (mm) | 0.800 | 1.00 | 1.25 | 1.60 | 2.00 | 2.50 | 3.15 | 4.00 | 5.00 | 6.30 | 8.00 |
| Module | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | / |
| Tamis (mm) | 10 | 12.5 | 16 | 20 | 25 | 31.5 | 40 | 50 | 63 | 80 | / |

➤ Conduite de l'essai

Le matériau sera séché à l'étuve à une température maximale de 105 °C, et après avoir pris le poids de l'échantillon, on emboîte les tamis les uns sur les autres, dans un ordre tel que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les

fillers pour une analyse complémentaire. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'éviter toute perte de matériau pendant le tamisage (Figure I.2).



Figure I.2 : Colonnes de tamis

On appellera tamisât, le poids du matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé sur le tamis supérieur et on met le couvercle pour éviter la dispersion de la poussière. On agite manuellement ou mécaniquement cette colonne de tamis.

Puisque cette répartition ne sera pas complète, on prend chaque fois un tamis en adoptant un fond et un couvercle et en agitant ce tamis horizontalement en le tenant d'une main et en le frappant par l'autre. On pèse le refus jusqu'au dernier tamis.

On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de vibrations de la tamiseuse.

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé, soit R_1 la masse de ce refus.

Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent, soit R_2 la masse du deuxième refus.

Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n aux différents niveaux de la colonne de tamis.

↳ **Dimensions des tamis utilisés**

Pour les sables, on utilise les tamis d'ouverture (en mm) :

0,063 - 0,08 - 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5,0.

Pour les graviers, on utilise les tamis d'ouverture (en mm) :

6,3 - 8 - 10 - 12,5 - 16 - 20 - 25 .

☞ Préparation de l'échantillon

La prise de l'échantillon est effectuée par quartage.

La masse du matériau utilisé sera tel que : $M \geq 0.2 D$ selon la norme (NF 18-560)

Tel que : **M** : Masse de l'échantillon en kilogrammes (kg).

D : Diamètre du plus gros granulat, exprime en millimètre (mm).

Les masses des échantillons soumises à l'essai, sont les suivantes :

| | |
|-----------|-----------------------------------|
| 15/25 | $M \geq (0.2).25 = 5 \text{ kg}$ |
| 8/15 | $M \geq (0.2).15 = 3 \text{ kg}$ |
| Sable 0/3 | $M \geq (0.2).3 = 0.6 \text{ kg}$ |

I.2.3 Analyse granulométrique des gravillons

Les résultats des analyses granulométriques pour les gravillons 15/25 et 8/15 sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau I.2 : Analyses granulométriques du gravier 15/25.

| Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{\text{éch}} = 7510\text{g}$ | | | |
|---|----------------------|-------------------|----------------------|
| Ouverture des tamis (mm) | Refus cumulés Rn (g) | Refus cumulés (%) | Tamisats cumulés (%) |
| 25 | 124 | 02 | 98 |
| 20 | 1306 | 17 | 83 |
| 16 | 5890 | 68 | 22 |
| 12.5 | 6826 | 91 | 09 |
| 10 | 7066 | 94 | 06 |

Tableau I.3 : Analyses granulométriques du gravier 8/15.

| Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{\text{éch}} = 6880\text{g}$ | | | |
|---|----------------------|-------------------|----------------------|
| Ouverture des tamis (mm) | Refus cumulés Rn (g) | Refus cumulés (%) | Tamisats cumulés (%) |
| 16 | 356 | 05 | 95 |
| 12.5 | 2302 | 33 | 67 |
| 10 | 4126 | 60 | 40 |
| 08 | 5456 | 79 | 21 |
| 6.3 | 6616 | 96 | 04 |
| 05 | 6760 | 98 | 02 |

I.2.4 Analyses granulométriques du sable

↳ Préparation de l'échantillon

On prend le poids du sable à son état naturel humide. Séché à l'étuve à une température de 105°C. Soit ($M_{éch}$) sa masse sèche.

↳ Exécution de l'essai

Le mode opératoire de l'analyse granulométrique du sable est le même que pour les gravillons, le résultat de cette analyse est représenté dans le tableau suivant :

Tableau I.4 : Analyses granulométriques du sable 0/3.

| Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{éch} = 1501g$ | | | |
|---|-------------------------|-------------------|----------------------|
| Ouverture des tamis (mm) | Refus cumulés R_n (g) | Refus cumulés (%) | Tamisats cumulés (%) |
| 05 | 25,10 | 02 | 98 |
| 2.5 | 363,21 | 24 | 76 |
| 1.25 | 810,72 | 54 | 46 |
| 0.63 | 1068,53 | 71 | 29 |
| 0.315 | 1218,36 | 81 | 19 |
| 0.160 | 1301,79 | 87 | 13 |
| 0.080 | 1350,55 | 90 | 10 |
| 0.063 | 1351,77 | 90 | 10 |

I.2.5 Expression des résultats

Les pourcentages des tamisats cumulés, sont représentés sous forme d'une courbe granulométrique sur un graphique semi-logarithmique, en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique et les pourcentages des tamisats en ordonnée, sur une échelle arithmétique. Les courbes sont tracées de manière continue et peut ne pas passer rigoureusement par tous les points.

Les représentations graphiques des analyses granulométriques des tableaux I.2, I.3 et I.4, sont données par la figure I.3.

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse **MF**. Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules (23, 26, 29, 32, 35, 38). Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons.

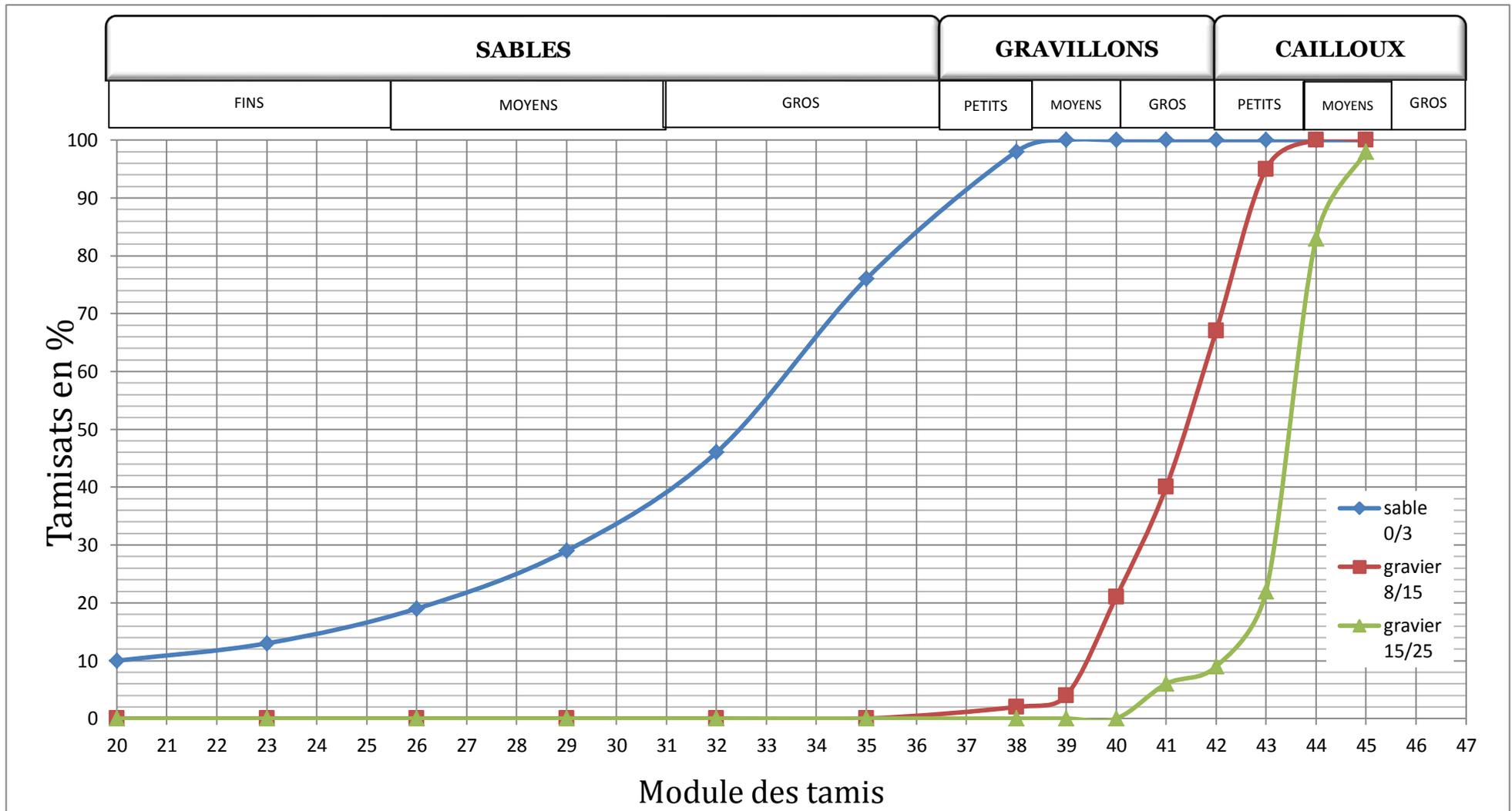


Figure I.3 : Analyse granulométrique de sable et graviers.

Dans le cas de la courbe granulométrique du sable présenté précédemment, son module de finesse est égal à:

$$MF = \frac{2+24+54+71+81+87}{100} = 3,19 \quad \text{Notre sable est moyen}$$

$$1,8 < MF < 3,2$$

I.2.6 Mesure du coefficient d'aplatissement des granulats (NF P 18-561) [22]

I.2.6.1 But de l'essai

L'élaboration des bétons de ciment, ainsi que la réalisation des corps de chaussées et des couches de roulement, nécessite de n'utiliser que des granulats ayant une forme assez ramassée, à l'exclusion des granulats plats. En effet, ceux-ci ne permettent pas de réaliser des bétons très compacts, et par ailleurs, en technique routière, ils ne peuvent être utilisés car ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes.

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

I.2.6.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à effectuer une double opération de tamisage :

Le tamisage classique (analyse granulométrique) sur une colonne de tamis normalisés à mailles carrées, pour classer l'échantillon de granulats étudié en différentes classes granulaires d/D dont les dimensions sont telles que $D = 1.25 d$; suivant la grosseur G .

De ce fait, les classes de grosseur G ainsi définies sont telles qu'elles suivent la progression géométrique des ouvertures des tamis utilisés au cours de l'analyse granulométrique.

Le tamisage des différentes classes granulaires d/D , ainsi isolées, sur des grilles à fentes parallèles d'écartement $E = d / 1.58$.

On peut donc associer à chaque classe granulaire d/D un tamis à fente correspondant de largeur E , ce qui permet de définir des coefficients d'aplatissement A_i Partiels. Il est ensuite possible de déterminer le coefficient d'aplatissement global A de l'échantillon, qui est égal à la somme pondérée des coefficients d'aplatissement des différentes classes granulaires d/D composants l'échantillon.

La correspondance entre classes granulaires d/D et grilles à fentes de largeur E est donnée dans le (Tableau I.5) suivant :

Tableau I.5 Correspondance entre classes granulaires d/D et largeur E des grilles à fentes utilisées

| Classes granulaires d/D (mm) | Ecartement E des grilles à fentes (mm) |
|------------------------------|--|
| >50 | 13.5 |
| 40 – 50 | 25 |
| 31.5 – 40 | 20 |
| 25 - 31.5 | 16 |
| 20 – 25 | 12.5 |
| 16 – 20 | 10 |
| 12.5 - 16(1) | 8 |
| 10 - 12.5 | 6.3 |
| 8 – 10 | 5 |
| 6.3 – 8 | 4 |
| 5 - 6.3 | 3.15 |
| 4 – 5 | 2.5 |
| (1) Ou 14 pour la 10-14 mm | |

I.2.6.3 Equipement nécessaire

Le coefficient d'aplatissement s'obtient en faisant une double analyse granulométrique en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulat :

Une série de tamis normalisés à mailles carrées, utilisés pour l'analyse granulométrique définie par la norme **NF P 18-560**.

On utilise les tamis de dimensions d'ouverture de maille de :

50 – 40 - 31,5 – 25 – 20 – 16 – 14 - 12,5 – 10 – 8 - 6,3 – 5 et 4 mm.

Une série de tamis à fentes de largeur normalisées (grille). Constituées par des barres cylindriques parallèles fixées dans un châssis carré (**Figure I.4**).

Les écartements intérieurs des barres sont respectivement de :

31,5 – 25 – 20 – 16 – 14 - 12,5 – 10 – 8 - 6,3 – 5 – 4 - 3,15 et 2,5 mm.



Figure I.4 Grilles à fentes.

I.2.6.4 Conduite de l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme **NF P 18-533**.

On opère, comme dans l'analyse granulométrique, avec un échantillon représentatif de matériaux de masse M qui doit être supérieure à $0.2 D$ ($M \geq 0.2 D$), avec :

M : la masse de l'échantillon exprimé en (kg).

D : le diamètre maximum des granulats exprimé en (mm).

Procéder au tamisage de l'échantillon sur tamis à mailles carrées par voie sèche sur les tamis en se conformant aux prescriptions de la norme **NF P 18 560**. Puis tamiser chaque classe granulaire obtenue par l'opération précédente sur une grille dont l'écartement entre les barres est défini par le tableau de correspondance ci-dessous.

I.2.6.5 Expression du coefficient d'aplatissement « A »

Pour une classe granulaire d/D donnée, on peut définir un coefficient d'aplatissement partiel :

$$A_i = \frac{M_{ei}}{M_{gi}} * 100$$

Avec :

M_{gi} : masse de la classe granulaire d/D .

M_{ei} : masse du passant à travers le tamis à fentes d'écartement E correspondant.

Le coefficient d'aplatissement global **A** s'exprime en intégrant les valeurs partielles déterminées sur chaque classe granulaire :

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{Mei}}{\sum_{i=1}^n \mathbf{Mgi}} * 100$$

Remarque

Il faut que la perte de matériaux pendant le tamisage soit telle que :

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{Mgi} \geq 0.98 \mathbf{M0}$$

I.2.6.6 Calcul du coefficient d'aplatissement « A » pour les gravillons

On a effectué l'essai d'aplatissement pour les gravillons 8/15 et 15/25, et on a calculé leurs coefficients d'aplatissement.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans les (Tableaux I.6 et I.7) suivants :

Tableau I.6 Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 15/25

| Tamisage sur tamis | | Tamisage sur grilles | | |
|--|---------|---------------------------------------|------------------|---|
| Classes granulaires d/D (mm) | Mgi (g) | Ecartement des grilles (mm) | Passants Mei (g) | $A_i = \frac{\mathbf{Mei}}{\mathbf{Mgi}} * 100$ |
| 25 - 31.5 | 00 | 16 | - | - |
| 20 - 25 | 2243 | 12.5 | 78 | 3.47 |
| 16 - 20 | 4248 | 10 | 135 | 3.17 |
| 12.5 - 16 | 892 | 08 | 28 | 3.13 |
| 10-12.5 | 226 | 6.3 | 06 | 2.65 |
| 8-10 | 143 | 5 | 08 | 5.59 |
| 6.3-8 | 73 | 4 | 04 | 5.47 |
| 5-6.3 | 05 | 3.15 | 0.34 | 6.80 |
| 4-5 | 1.33 | 2.5 | 0.21 | 15.78 |
| $\sum \mathbf{Mgi} = 7831.33\text{g}$ | | $\sum \mathbf{Mgei} = 259.55\text{g}$ | | |
| $\sum \mathbf{Mgi} = 7831.33\text{g} > 0.98 * 7990 = 7830.2\text{g}$ | | | | |
| $A = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{Mei}}{\sum_{i=1}^n \mathbf{Mgi}} * 100 = 3.31$ | | | | |

Tableau I.7 Mesure du coefficient d'aplatissement pour le gravier 08/15

| Tamisage sur tamis | | Tamisage sur grilles | | |
|--|---------|-----------------------------|------------------|------------------------------|
| Classes granulaires d/D (mm) | Mgi (g) | Ecartement des grilles (mm) | Passants Mei (g) | Ai = $\frac{Mei}{Mgi} * 100$ |
| 16 - 20 | 421 | 10 | 28 | 6.65 |
| 12.5 - 16 | 1660 | 08 | 111 | 6.68 |
| 10-12.5 | 1842 | 6.3 | 97 | 5.26 |
| 8-10 | 1397 | 5 | 98 | 7.01 |
| 6.3-8 | 941 | 4 | 63 | 6.69 |
| 5-6.3 | 108 | 3.15 | 08 | 7.40 |
| 4-5 | 72 | 2.5 | 05 | 6.94 |
| $\sum Mgi = 6441g$ | | $\sum Mgei = 410g$ | | |
| $\sum Mgi = 6441g > 0.98 * 6570 = 6438.60g$ | | | | |
| $A = \frac{\sum_{i=1}^n Mei}{\sum_{i=1}^n Mgi} * 100 = 6.36$ | | | | |

Les coefficients d'aplatissements des deux graviers (8/15 et 15/25) sont inférieurs à 20, donc nos gravillons sont massifs.

I.2.7 Détermination de la propreté superficielle [23]

I.2.7.1 Calcul de la teneur en impuretés (NF P 18-591)

➤ Définition

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral des particules inférieures à 0.5 mm, mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2 mm.

➤ Principe de l'essai

L'essai consiste à séparer par lavage sur le tamis 0.5 mm, les particules inférieures à 0.5mm contenues dans l'échantillon pour essai.

➤ Matériels utilisés

- Un tamis de 0.5 mm.
- Un tamis de décharge.

- Une balance.
- Une étuve réglée à 105°C.

➤ Préparation de l'échantillon soumis à l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les perspectives de la norme (NF P 18-533) c'est-à-dire par quartage.

La masse (M) de l'échantillon pour essai doit être comprise entre 200D et 600D. (M) étant exprimée en grammes, et (D) la dimension maximale des plus gros éléments en millimètres.

➤ Exécution de l'essai

- Préparer l'échantillon tel qu'il est (dans son état humide). Soit (M_h) sa masse humide.
- Laver l'échantillon après l'avoir peser sur le tamis de 0.5mm sous un jet d'eau.
- Egoutter et sécher à l'étuve à 105°C.
- Peser l'échantillon sec. Soit (M_s) sa masse.

➤ Expression des résultats

La teneur en impuretés des granulats « P » est obtenue par le rapport :

$$P = [(M_h - M_s) / M_s] \times 100$$

Les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

Tableau I.8 : Teneur en impureté des graviers à 15/25 et 8/15.

| Echantillons Caractéristiques | Gravier 8/15 | Gravier 15/25 |
|----------------------------------|--------------|---------------|
| Masse humide M_{1h} (g) | 6550 | 7926 |
| Masse humide M_h (g) | 6780 | 7966 |
| Masse sèche M_{1s} (g) | 6540 | 7916 |
| Masse sèche M_s (g) | 6770 | 7955 |
| Masse sèche m' (g) | 6678 | 7902 |
| Masse sèche m (g) | 92 | 53 |
| Propreté superficielle P (%) | 1.35 | 0.66 |

On remarque que la teneur en impureté P (15/25 et 8/15) <1,5 \Rightarrow Donc nos gravillons sont propres, il ne nécessite pas un lavage.

1.2.7.2 Détermination de propreté de sable [24]

Pour les sables, la propreté peut se contrôler comme pour les graviers, mais la mesure la plus pratiquée et la plus représentative demeure de l'essai dit «Equivalent de Sable »

réalisé dans des éprouvettes, à l'aide d'une solution lavante et dont le principe se base sur la vitesse de sédimentation des grains.

➤ **Equivalent de sable (NF P 18-598)**

↳ **Définition**

La détermination de l'ES s'effectue sur la fraction de sable passants au tamis à mailles carrés de 5 mm et compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans cette fraction, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argiles, impuretés...).

L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100 de la hauteur sédimentée à la hauteur totale du flocculat.

Ces hauteurs sont mesurées dans une éprouvette où la prise d'essai a été traitée, dans des conditions définies, par une solution lavante capable de faire flocculer les éléments fins l'équivalent de sable s'exprime par:

- **ESP** : Equivalent de sable mesuré au piston (le sable est compacté dans l'éprouvette).
- **ESV** : Equivalent de sable mesuré a vue (les hauteurs mesurées directement par la règle).

↳ **But de l'essai**

Cet essai a pour but de mesurer la propreté d'un sable si le pourcentage de fine ne dépasse pas les 10%.

Dans notre cas, le pourcentage en fine du sable BOUANDAS est de 01% alors, on effectuera cet essai.

↳ **Matériels utilisés**

- Prise d'essai correspondant à une masse sèche de $120\text{g} \pm 1\text{g}$ de sable passant au tamis de 5mm.
- Eprouvettes graduées.
- Un tube laveur (tuyau souple, robinet).
- solution lavante.
- Une règle graduée.
- Un piston.
- Un chronomètre.
- Un agitateur électrique.

↪ Préparation de l'échantillon pour essai

L'échantillon pour laboratoire doit être préparé suivant les prescriptions de la norme (NF P 18-553).

Sa masse doit être telle que la fraction passant au tamis de 5 mm pèse 500 à 700 g.

L'essai s'effectue sur un sable dont la masse sèche doit être égale à $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$.

➔ Exécution de l'essai

↪ Mise en place de l'essai

- La solution lavante ayant été introduite dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait de repère inférieur, la prise d'essai, correspondant à une masse sèche de $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ de matériau, est versée soigneusement à l'aide d'un entonnoir, dans l'éprouvette posée verticalement.
- Laisser reposer dix minutes.

↪ Agitation de l'éprouvette

- À la fin de cette période de dix minutes, boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation.
- Faire subir à l'éprouvette 90 cycles ± 1 cycle en $30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$.
- Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais.
- Lavage
- Enlever le bouchon et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavante.
- En descendant le tube laveur dans l'éprouvette, rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante, puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette.
- Faire remonter les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale en procédant de la manière suivante : l'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait de repère supérieur, relever le tube laveur, de façon à ce que le niveau du liquide se maintient à hauteur du trait de repère.
- Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.

↪ Mesures

- Laisser reposer pendant $20 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$.
- Au bout de ces 20 min, mesurer à l'aide du réglet la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette.

- Mesurer également la hauteur h_2 du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette.
- Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appui sur l'éprouvette.
- Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston. Introduire le réglet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston.
- Lire la hauteur du sédiment h'_2 au niveau de la face supérieure du manchon.
- Arrondir les hauteurs h_1 , h_2 et h'_2 au millimètre le plus voisin (Figure I.4).

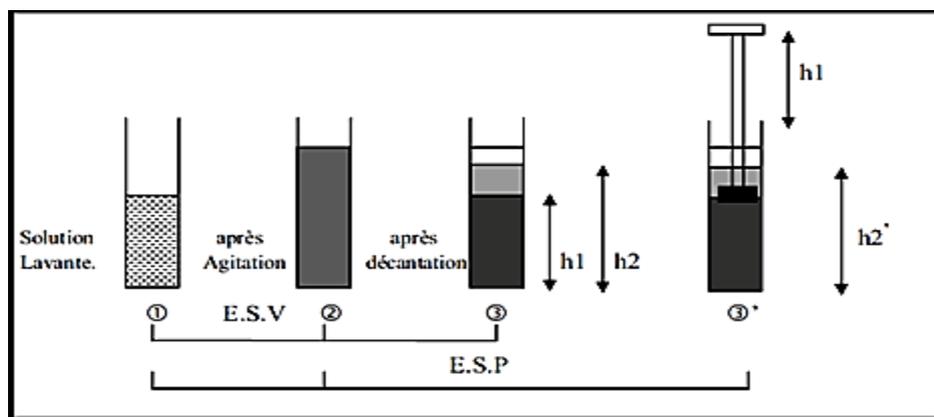


Figure I.5 : Equivalent de sable.

➤ Expression des résultats

L'équivalent de sable par piston est donné par la formule :

$$\text{Esp} = \frac{h'_2}{h_1} \times 100$$

L'équivalent de sable visuel est, dans les mêmes conditions, donné par la formule :

$$\text{Esv} = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Le tableau suivant récapitule les résultats de l'essai :

Tableau I.9 : Equivalent de sable

| N° Essai | Masse de l'échantillon (g) | h_1 (cm) | h_2 (cm) | h'_2 (cm) | Esv (%) | Esp (%) | Esv moy (%) | Esp moy (%) |
|----------|----------------------------|------------|------------|-------------|---------|---------|-------------|-------------|
| 01 | 120 | 12.00 | 8.50 | 8.00 | 70.08 | 66.66 | 71.30 | 67.50 |
| 02 | 120 | 12.00 | 8.70 | 8.20 | 72.50 | 68.33 | | |

Dans notre étude on prendra en considération que la valeur de l'équivalent de sable par piston ESP donc :

60<ESP<70 ; sable propre à faible pourcentage de fines argileux.

I.2.8 Détermination des masses volumiques absolues et apparentes des granulats.

I.2.8.1 Masse volumique absolue (NF P 18-555) [25]

➤ Méthode de l'éprouvette graduée

Cette méthode est très simple, très rapide, et elle utilise du matériel très courant de laboratoire.

↳ Définition

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

↳ Matériel Utilisé

- Des éprouvettes graduées.
- Une balance.

↳ Conduite de l'essai

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume (V_1) d'eau.
- Peser un échantillon sec de granulat de masse (M) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette.
- Lire le nouveau volume V_2 (Figure I.8).
- La masse volumique absolue est alors : $\rho_s = M / (V_2 - V_1)$.

Cet essai est effectué trois fois pour chaque échantillon, et on prendra la moyenne.



Figure I.6 : Mesure de la masse volumique absolue

- La masse de l'échantillon : $M = 300$ g pour tous les graviers.
- Le volume d'eau dans l'éprouvette : $V_1 = 600$ cm³.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau I.10 : Masse volumique absolue

| Matériau | N° d'échantillon | M (g) | V ₁ (cm ³) | V ₂ (cm ³) | $\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1}$ (g/cm ³) | $\rho_{s\text{moy}}$ (g/cm ³) |
|----------------------|------------------|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| Gravier 15/25 | 1 | 300 | 800 | 910 | 2.72 | 2.81 |
| | 2 | 300 | 800 | 900 | 3.00 | |
| | 3 | 300 | 800 | 910 | 2.72 | |
| Gravier 8/15 | 1 | 300 | 800 | 910 | 2.72 | 2.64 |
| | 2 | 300 | 800 | 920 | 2.50 | |
| | 3 | 300 | 800 | 910 | 2.72 | |
| Sable 0/3 | 1 | 300 | 800 | 910 | 2.72 | 2.72 |
| | 2 | 300 | 800 | 910 | 2.72 | |
| | 3 | 300 | 800 | 910 | 2.72 | |
| | 2 | 300 | 800 | 900 | 3.00 | |
| | 3 | 300 | 800 | 900 | 3.00 | |

I.2.8.2 Détermination de la masse volumique apparente (NF P 18-554) [21]

↪ Définition

On appelle masse volumique apparente, la masse de l'unité de volume du matériau en vrac, c'est-à-dire vide compris.

↪ Matériels Utilisés

- Un récipient.
- Une règle à araser.
- Une balance.

↪ Conduite de l'essai

- On pèse d'abord le récipient vide (M) pour éliminer son poids propre, dans la balance.
 - On prend une quantité du matériau, pour faire l'échantillonnage.
 - On met le matériau échantillonné dans les mains formant un entonnoir.
 - On laisse le matériau couler dans le récipient afin d'avoir un débordement.
 - On arase le surplus du matériau à l'aide d'une règle à araser. (**Figure I.7**)
 - On pèse le récipient rempli. Soit M' la masse de l'ensemble. (**Figure I.8**)
- L'opération doit être effectuée trois fois pour chaque échantillon.



Figure I.7 Masse volumique apparente



Figure I.8 Mesure de la masse Volumique apparente.

Telle que : $\rho_p = (M' - M) / V_r$ avec :

M : la masse du récipient vide qui est égale à 794g pour les graviers.

M' : la masse du récipient plein.

V_r : volume du récipient $V_r = 3750 \text{ cm}^3$.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau I.11 : Masse volumique apparente.

| Matériau | N° échantillon | Masse pleine(g) | M'-M | Volume du récipient (cm ³) | $\rho_s = \frac{M' - M}{V}$ (g/cm ³) | ρ_{pmoy} (g/cm ³) |
|----------------------|----------------|-----------------|------|--|--|------------------------------------|
| Gravier 15/25 | 1 | 6518 | 5724 | 3750 | 1.52 | 1.38 |
| | 2 | 5696 | 4902 | 3750 | 1.30 | |
| | 3 | 5824 | 5030 | 3750 | 1.34 | |
| Gravier 8/15 | 1 | 5596 | 4802 | 3750 | 1.28 | 1.28 |
| | 2 | 5628 | 4834 | 3750 | 1.29 | |
| | 3 | 5636 | 4842 | 3750 | 1.29 | |
| Sable 0/3 | 1 | 5136 | 4342 | 3750 | 1.15 | 1.16 |
| | 2 | 5154 | 4360 | 3750 | 1.16 | |
| | 3 | 5216 | 4422 | 3750 | 1.18 | |
| | 2 | 726 | 236 | 1020 | 0.23 | |
| | 3 | 740 | 250 | 1020 | 0.26 | |

I.2.9 Essai de résistance à l'usure et au choc

↳ But des essais

Lors de la fabrication d'un béton, le malaxage est source de frottements intenses entre grains.

Si ces derniers ne sont pas assez résistants, ils peuvent se casser en produisant des sables ou des éléments fins. Il est donc nécessaire de procéder à des essais de résistance au choc et à l'usure, afin que les granulats puissent répondre aux spécifications de fabrication des bétons et aussi aux impératifs de pérennité des chaussées.

I.2.9.1 Essai Micro – Deval (NF P 18-572) [21] et [26]

↳ Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer dans des conditions normalisées, l'usure des granulats produite par frottements mutuels, en présence d'eau et d'une charge abrasive dans un cylindre en rotation.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les trois classes granulaires :

4 à 6.3mm ; 6.3 à 10mm ; 10 à 14mm de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre.

Si (**M**) est la masse du matériau soumis à l'essai, (**m**) la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par la quantité :

$$\frac{m}{M} \times 100$$

Par définition, cette quantité sans dimension est appelée, suivant la méthode employée : coefficient Micro-Deval en présence d'Eau tel que : $MDE = \frac{m}{M} \times 100$

↳ Matériel utilisé

L'appareil Micro-Deval comporte 1 à 4 cylindres d'essai en acier ; ils sont entraînés en rotation par l'intermédiaire de deux arbres horizontaux. Chaque cylindre permet d'effectuer 1' essai (Figure I.9).

- La charge abrasive est constituée par des billes sphériques en acier.
- Un moteur doit assurer aux cylindres une vitesse de rotation régulière de 100 ± 5 Stours/min.
- Un jeu de tamis de 1,6 - 4 - 6,3 - 10 et 14 mm.



Figure I.9 : Appareil de Micro-Deval

↪ **Matériau soumis à l'essai**

Pour effectuer un essai en présence de l'eau :

- Tamiser l'échantillon sur les tamis de la classe granulaire choisie.
- La masse de l'échantillon pour essai sera $500\text{g} \pm 2\text{g}$.

↪ **Exécution de l'essai**

- Introduire dans le cylindre d'essai, disposé d'une ouverture vers le haut, la charge abrasive, les 500 g du matériau préparé.
- La charge abrasive est fixée conformément aux indications du tableau ci-après :

Tableau I.12 : Charge abrasive correspondant à chaque classe granulaire.

| Classe granulaire (mm) | Charge abrasive (g) |
|------------------------|---------------------|
| 4 – 6.3 | 2000±5 |
| 6.3 – 10 | 4000±5 |
| 10 – 14 | 5000±5 |

- Après la préparation du matériau on introduit les échantillons dans les cylindres avec 2.5 L d'eau dans Chaque cylindre.
- On ferme les cylindres avec les couvercles, puis on met les cylindres dans l'appareil et on met la machine on marche avec une vitesse de 100 ± 5 tours /min et pendant 2 heures.
- Après essai, on ouvre le cylindre en élevant leur couvercle puis à l'aide d'un bac on récupère le contenu de cylindre.
- Laver soigneusement à la pissette l'intérieur du cylindre en recueillant l'eau et les parties minérales entraînées.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis 1,6 mm.

- Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive, procéder en plusieurs fois pour faciliter l'opération.
- Sécher le refus à 1.6 mm à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.
- Peser ce refus au gramme près, soit m' le résultat de la pesée.

↳ Expression des résultats

Le coefficient micro-Deval est par définition le rapport :
$$\text{MDE} = \frac{500 - m'}{500} \times 100$$

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.13 : Mesure du coefficient « MDE » des granulats 8/15 et 15/25

| Matériau | Classe granulaire (mm) | Charge abrasive | Masse(g) | | | MDE |
|--------------|------------------------|-----------------|----------|--------------------------|--------------------------|--------------|
| | | | Initiale | Supérieur au tamis 1.6mm | Inférieur au tamis 1.6mm | |
| 15/25 | 10/14 | 5000 | 500 | 425,67 | 74.33 | 14.86 |
| 8/15 | 6.3/10 | 4000 | 500 | 426,72 | 73.28 | 14.65 |

I.2.9.2 Essai los Angeles (NF P 18-573) [21] et [26]

↳ Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité inférieure à 1.6 mm en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations pendant 15 minutes.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les 6 classes granulaires :

4-6,3 mm, 6,3-10 mm, 10-14 mm, 10-25 mm, 16-31.5 mm, 25-50 mm.

- La classe 10/25 mm doit contenir 60% de 10-16 mm.
- La classe 16/31,5 mm doit contenir 40% de 16-25 mm.
- La classe 25/50 mm doit contenir 60% de 25-40 mm.

La masse de la charge des boulets varie suivant les classes granulaires, comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau I.14 : Charges des boulets correspondants à chaque classe granulaire.

| Classe granulaire (mm) | Masse de l'échantillon (g) | Nombre de boulets |
|------------------------|---|-------------------|
| 4 - 6.3 | Tamis $\frac{6.3\text{mm}}{4\text{mm}}$: 5000g | 7 |
| 6.3 - 10 | Tamis $\frac{10\text{mm}}{6.3\text{mm}}$: 5000g | 9 |
| 10 - 14 | Tamis $\frac{14\text{mm}}{10\text{mm}}$: 5000g | 11 |
| 10 - 25 | Tamis $\frac{6.3\text{mm}}{4\text{mm}}$: 3000g Et $\frac{25}{16}$: 2000g | 11 |
| 16 - 31.5 | Tamis $\frac{6.3\text{mm}}{4\text{mm}}$: 2000g Et $\frac{31.5}{25}$: 3000g | 12- |
| 25 - 50 | Tamis $\frac{6.3\text{mm}}{4\text{mm}}$: 2000g Et $\frac{50}{40}$: 3000g | 12 |

Si (M) est la masse du matériau soumis à l'essai, (m) la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par

chocs s'exprime par la quantité : $LA = \frac{m}{M} \times 100$

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, coefficient Los Angeles.

↪ Matériels utilisés

La machine Los Angeles comporte :

- Un cylindre creux en acier de 12 mm ± 0.5 mm d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités, ayant un diamètre inférieur à 711 mm ± 2 mm et une longueur inférieure à 508 mm. Le cylindre est supporté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales, mais ne pénétrant pas à l'intérieur du cylindre.
- Une ouverture de 150 mm de largeur, sur toute la longueur du cylindre permet d'introduire l'échantillon. (Figure I.10).



Figure I.10 : Appareil de Los Angeles

Charge de boulets :

- La charge est constituée par des boulets sphériques de $47 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre et pesant entre 420 et 445 g en acier.
- Un moteur assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière comprise entre 30 et 33 tours/minute.
- Un bac destiné à recueillir les matériaux après essai.
- Un compte tours de type rotatif, arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulu.
- Un jeu de tamis de diamètres convenables.

↪ Préparation de l'échantillon pour l'essai

Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand. Laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

La masse de l'échantillon est de $5000 \text{ g} \pm 2 \text{ g}$.

➔ Exécution de l'essai

- Introduire avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon pour essai.
- Placer le couvercle.
- Effectuer à la machine 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 tr/mn et 33 tr/mn.
- Recueillir le matériau dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm, le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.

- Laver le refus au tamis de 1.6 mm.
- Egoutter et sécher à l'étuve à 105°C.
- Peser ce refus une fois séché. Soit (m') le résultat de la pesée.

➤ Expression de résultat

Le coefficient Los Angeles est par définition, le rapport : $\frac{m}{5000} \times 100$

Ou $m = 5000 - m'$: masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1.6 mm, et $LA = \frac{5000 - m'}{5000} \times 100$

Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau suivant :

Tableau I.15 : Mesure du coefficient Los Angeles des granulats 15/25 et 8/15

| Nature du matériau | Classe granulaire (mm) | Nombre de boulets | Masse(g) | | | Coefficient Los Angeles « LA » |
|--------------------|------------------------|-------------------|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| | | | Initial | Supérieur au tamis 1.6mm | Inférieur au tamis 1.6mm | |
| 15/25 | 10/25 | 11 | 5000 | 3542 | 1458 | 29 |
| 8/15 | 10/14 | 11 | 5000 | 3558 | 1442 | 28 |
| 8/15 | 6.3/10 | 09 | 5000 | 3512 | 1488 | 29 |

I.2.10 Classification des granulats (XP P 18 - 540) [27]

I.2.10.1 Résultats des essais effectués au laboratoire

Le tableau ci-dessous, résume les résultats de tous les essais effectués au laboratoire.

Tableau I.16 : Récapitulatif de tous les résultats des essais

| Echantillons | Granulométrie | | | ES | P(%)) | MF | LA | MDE | Masses volumiques | |
|----------------------|---------------|-----|---------|-------|-----------|------|----|-------|-------------------|----------------|
| | %> D | %<d | %<6 3µm | | | | | | ρ _P | ρ _S |
| Sable 0/3 | 20 | / | 10 | 67.50 | / | 3,19 | / | / | 1.16 | 2.72 |
| Gravier 8/15 | 13 | 21 | / | / | 1.35 | / | 28 | 14.86 | 1.28 | 2.64 |
| Gravier 15/25 | 02 | 18 | / | / | 0.66 | / | 29 | 14.65 | 1.38 | 2.81 |

I.2.10.2 Caractéristiques applicables aux gravillons

➤ Los Angeles (NF P 18-573)

Tableau I.17 : Los Angeles

| Catégorie | V _{SS} |
|------------------------------------|-----------------|
| LA _A | 30 |
| LA _B et LA _C | 40 |
| LA _D | 50 |

D'après ce tableau, c'est à dire du point de vue dureté, ces gravillons peuvent être classés en catégorie LA_A.

➤ Granularité (NF P 18-560)

Tableau I.18 : Granularité des graviers

| Catégorie | Passants (%) | | | | | |
|-----------------|--------------|--------|-------|---------|------|-------|
| | 2D | 1.58D | D | (d+D)/2 | D | 0.63d |
| Gr _A | Vsi 100 | Vsi 99 | Li 80 | Li 25 | Li 1 | Vss 5 |
| Gr _B | | | Li 99 | Li 75 | | |
| Gr _C | | | e 15 | e 35 | e 15 | |
| | | | e 19 | | e 19 | |

A partir du tableau ci-dessus, on déduira les pourcentages des différentes classes granulaires indiquées dans le tableau suivant :

Tableau I.19 : Résultats sur la granularité des graviers

| Catégorie | Passants (%) | | | | | |
|-----------|--------------|-------|----|---------|----|-------|
| | 2D | 1.58D | D | (d+D)/2 | D | 0.63d |
| 8/15 | 100 | 100 | 87 | 56 | 21 | 02 |
| 15/25 | 100 | 100 | 98 | 83 | 18 | 00 |

A partir des deux tableaux précédant, ces gravillons peuvent être classés comme suit :

A partir des deux tableaux précédant, ces gravillons peuvent être classés comme suit :

- 8/15 en catégorie Gr_A.
- 15/25 en catégorie Gr_A.

➤ Propreté (NF P 18-591)

On a $V_{ss1.5} = 1.5\%$ (valeur spécifiée supérieure).

- $P(\%) 8/15 = 1.35 < 1.5 \longrightarrow 8/15$ est propre.
- $P(\%) 15/25 = 0.66 < 1.5 \longrightarrow 15/25$ est propre.

I.2.10.3 Caractéristiques applicables aux sables

⇒ Granularité (NF P 18-560).

Tableau I.20 Granularité du sable

| Catégorie | Passants (%) | | |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------------|
| | 2D | 1.58D | D |
| Gr _A à Gr _D | V _{si} 100 | V _{si} 99 | V _{si} 85 V _{ss} 99 |

Tableau I.21 Résultats sur la granularité du sable

| Catégorie | Passants (%) | | |
|-----------|--------------|-------|----|
| | 2D | 1.58D | D |
| 0/3 | 100 | 98 | 81 |

A partir des deux tableaux précédant, on classera ce sable comme suit :

- Sable 0/3 en catégorie Gr_A.

⇒ Module de finesse.

Tableau I.22 Module de finesse

| Catégorie | MF | |
|-----------------|------------------|-------|
| MF _A | Li 1.8 Ls 3.2 | e 0.6 |
| MF _B | | e 0.7 |
| MF _C | e 0.7 | |
| MF _D | e 0.8 | |

Le module de finesse (MF) du sable 0/3 est égal à 3,2, on remarque que cette valeur est comprise entre Li = 1.8 et Ls = 3.2 (Li=1.8 < MF < Ls=3.2), alors on classera ce sable comme suit :

- Sable 0/3 en catégorie MF_B.

⇒ Teneur en fines (f).

Tableau I.23 Teneur en fines

| Catégorie | Passants (%) au tamis de 0.08 mm |
|----------------|--|
| f _A | L _S 12 e 3 ou CV ≤ 20% |
| f _B | L _S 15 e 5 ou CV ≤ 20% |
| f _C | L _S 18 e 6 ou CV ≤ 20% |
| f _D | pas de spécifications mais FTP renseigné |

D'après le tableau I.4 (Analyses granulométriques du sable 0/3) on constate que la teneur en fines du sable 0/3 est égale à 01%, alors on peut le classer comme suit :

- Sable 0/3 en catégorie **f_A**.

A partir du tableau I.9 (Equivalent de sable) on a

ES = 67.50%, donc on peut classer ce sable comme suit :

- ✦ Sable 0/3 en catégorie **PS_A**.

Conclusion

D'après les résultats obtenus lors de la classification des granulats on conclut que :

- **Sable 0/3** : Catégorie A.
- **Gravillon 8/15** : Catégorie A.
- **Gravillon 15/25** : Catégorie A.

I.3 ESSAIS SUR LES CIMENTS

I.3.1 Essais sur la pâte de ciment

Le ciment utilisé, est le ciment CPA CEM I-42.5 NA443

Toutes les caractéristiques de ce ciment sont données dans l'annexe A

↳ Masse spécifique

La masse volumique absolue du ciment est : $\rho_s = 3,1 \text{ g/cm}^3$.

La masse volumique apparente du ciment est : $\rho_p = 1 \text{ g/cm}^3$.

➔ Essai de prise

↳ Mesure des temps de début et de fin de prise (EN 196-3) [19]

◆ Définition

Par addition d'eau en quantité convenable donne formation d'une pâte plastique qui se solidifie au bout d'un temps. Le nom de prise est donné à la phase de cristallisation.

◆ L'objectif de l'essai

L'objectif de l'essai est de déterminer le temps de début et de fin de prise d'un ciment.

◆ Principe de l'essai

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée ; l'appareil utilisé est l'appareil de **Vicat** équipé d'une aiguille de 1.13 mm de diamètre, quand sous l'effet d'une charge de 300 g, l'aiguille s'arrête à une distance **d** du fond du moule telle que; $d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. (Figure I.11)

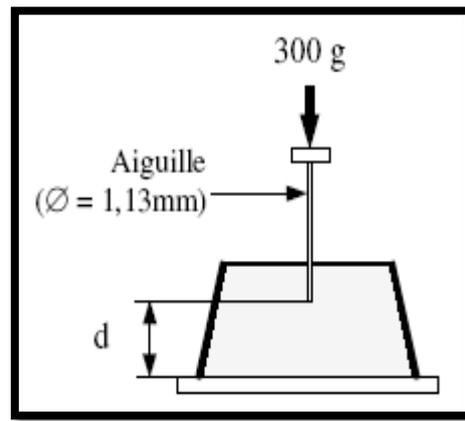


Figure I.11 appareil de vicat

On dit que le début de prise est atteint, ce moment, mesuré à partir du début de malaxage, est appelé "temps de début de prise".

Le "temps de fin de prise" est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de $0,5 \text{ mm}$.

◆ **Equipement nécessaire**

- Une salle climatisée. L'essai doit se dérouler dans une salle dont la température est de $20 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ et dont l'humidité relative soit supérieure à 90% .
- Un malaxeur normalisé décrit dans la norme EN 196-1. Ce malaxeur est muni d'une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente et rapide) ; 140 et 285 tr/min .
- Un appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1.13 mm . (Figure I.12)

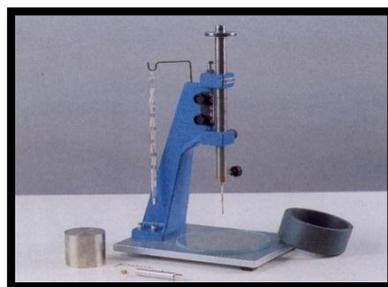


Figure I.12 appareil de vicat

- Un moule tronconique de 40 mm de hauteur et de 70 à 80 mm de diamètre, avec une plaque en verre servant à supporter le moule.

- Une balance permet de peser à 1 g près.
- Une truelle.
- Un chronomètre.

➔ Conduite de l'essai

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme EN 196-3. Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée ; soit 400g de ciment sont pesés et introduits dans la cuve du malaxeur. La quantité d'eau choisie est de 100g, elle est ajoutée au ciment en un temps compris entre 5 et 10 secondes (auquel cas E/C = 0.25).

Le temps zéro est celui où l'eau a fini d'être ajoutée au ciment dans la cuve du malaxeur. La pâte une fois malaxée est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque en verre, sans tassement ni vibration excessifs ; il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface du moule ; puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

L'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon est relâcher sans vitesse initiale.

Après 30 secondes d'attente, on mesure la distance « d » séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base, et on note l'heure.

On Répète l'opération à intervalles de temps convenablement espacés. (Figure I.13)

Après chaque essai de pénétration, l'aiguille doit être remontée et nettoyée.

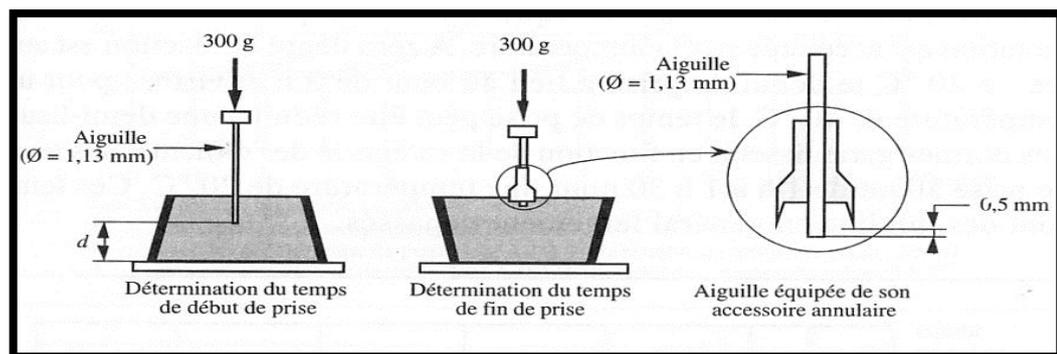


Figure I.13 Méthode de mesure du temps de début et de fin de prise

➤ **Résultats Obtenus.**

Tableau I.24 temps de début et de fin de prise.

| | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Temps de début de prise | 2 heures et 45 minutes (2h 45') |
| Temps de fin de prise | 4 heures et 20 minutes (4h 20') |

↪ **Interprétation des résultats**

Le début de prise se manifeste après 2h 45'. Ce ciment est donc classé en catégorie des liants à prise lente.

I.3.2 Détermination de la stabilité par l'essai Le Chatelier ou essai d'expansion (EN 196-3) [21]

• **Définition**

Il s'agit de déterminer dans quelle mesure le mortier fabriqué avec un liant hydraulique déterminé réagit sous l'effet des corps susceptibles de provoquer son expansion.

• **Objectif de l'essai**

Les essais d'expansion, à froid ou à chaud, ont pour but de déterminer la stabilité aux expansifs des liants hydrauliques.

Il s'agit d'apprécier l'augmentation de volume que seraient susceptibles de provoquer, au cours de la réaction d'hydratation. Les oxydes de calcium ou de magnésium contenus dans le ciment sont responsables de cette augmentation de volume. La teneur en sulfate est aussi responsable.

• **Principe de l'essai**

La réaction d'hydratation est accélérée par un traitement thermique de la pâte, de façon à pouvoir constater l'expansion éventuelle du ciment dans un délai très court.

• **Équipement nécessaire**

- Un malaxeur normalisé.
- Moules en laiton élastique de 0.5 mm d'épaisseur ; deux aiguilles soudées de part et d'autre. Si le matériau placé dans le moule gonfle (augmentation de volume de la pâte) ; l'extrémité des aiguilles s'écarte. Ces moules sont appelés "appareil Le Chatelier". (Figure I.14)

- Un bain d'eau muni d'un moyen de chauffage, dans lequel il est possible d'immerger les éprouvettes et de porter la température de l'eau de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à ébullition en $30\text{ min} \pm 5\text{ min}$.
- Une salle ou une armoire humide maintenue à une température de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et à au moins 98 % d'humidité relative.



Figure I.14 Appareil le Chatelier

- Conduite de l'essai

Le mode opératoire est décrit par la norme EN 196-3.

Il faut confectionner une pâte de consistance normalisée, à l'aide d'un malaxeur normalisé.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Ciment} = 200\text{g.} \\ \text{Eau} = 100\text{g.} \end{array} \right\} \text{E/C} = 0.5$$

Cette pâte sera introduite dans trois (03) moules, en les posant sur une plaque en verre ; recouvrir d'une autre plaque de verre. Ces moules sont conservés 24 h dans la salle ou l'armoire humide. Au bout de ce temps il convient de mesurer l'écartement **A** entre les pointes des aiguilles. Après prise les moules sont alors entreposés dans le bain d'eau à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ qui doit être porté à ébullition en $30\text{ min} \pm 5\text{ min}$. Ce bain sera maintenu à la température d'ébullition pendant $3\text{h} \pm 5\text{mn}$. (Figure I.15)

- Soit **B** l'écartement entre les pointes des aiguilles au bout de ce temps.
- Soit **C** l'écartement des aiguilles lorsque le moule, après refroidissement, est revenu à la température de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- La stabilité est caractérisée par la valeur **C-A** exprimée en mm à 0,5 mm près :

$$\text{Stabilité (ST)} = (\text{C}-\text{A}) \pm 0,5\text{ mm.}$$

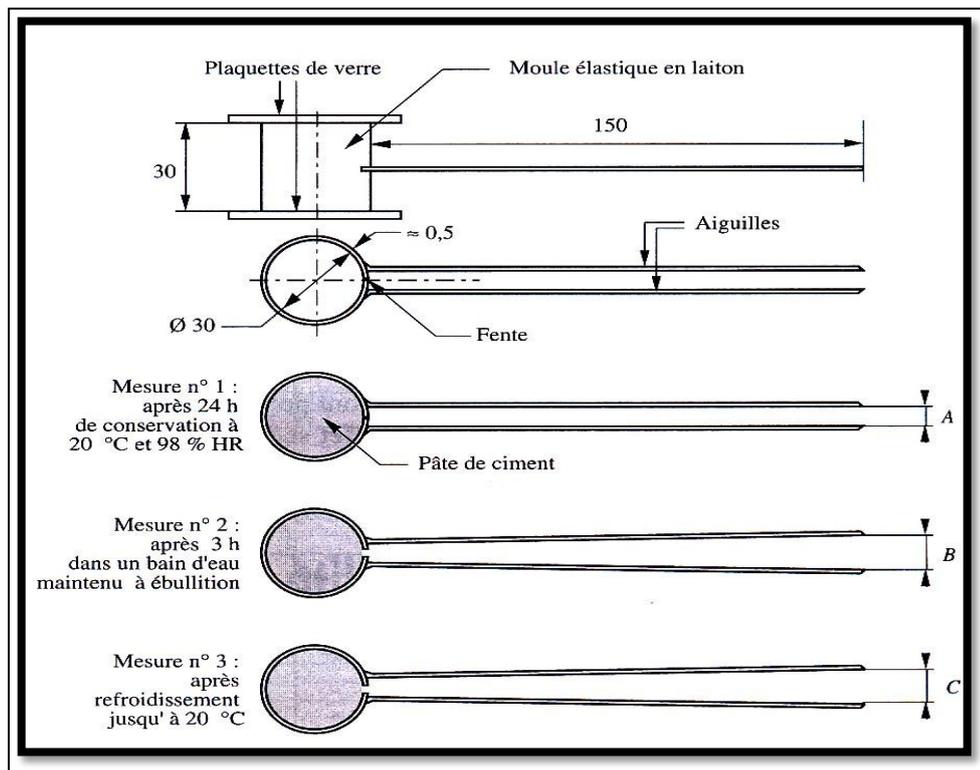


Figure I.15 Mesure d'écartement A, B et C

↳ Résultats obtenus.

Tableau I.25 Les résultats obtenus à partir de cet essai

| N° du moule | Mesure N°1 : A (mm) | Mesure N°2 : B (mm) | Mesure N°3 : C (mm) | Stabilité (ST) : C - A (mm) |
|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 3 | 3 | 3.5 | 0.5 |
| 2 | 3.5 | 3 | 4 | 0.5 |
| 3 | 4 | 4 | 4.5 | 0.5 |

On prend la valeur moyenne des gonflements des 3 moules :

D'après la norme, le gonflement ou l'expansion devront être inférieur à **10 mm**, pour toutes les classes de ciments, et c'est le cas dans notre ciment étudié.

↳ Interprétation des résultats

On a obtenu une stabilité égale à $0,5 \pm 0,5$ mm, qui est très inférieure à 10 mm ; ce qui nous laisse dire que notre ciment est à une stabilité très acceptable. Les teneurs en CaO , MgO et SO_3 sont optimales, les retraits à mesurer sur les mortiers ne seront pas influencés par l'expansion de ciment.

I.4 METHODES PHYSIQUES D'ANALYSES

I.4.1 Analyse par diffraction des rayons X (DRX) [28]

✦ Définition

La diffraction des rayons X est une méthode d'analyse minéralogique des matériaux cristallisés. Elle s'applique sur des poudres ou des échantillons massifs pour déterminer la nature des phases minérales et de les quantifier. Actuellement la diffraction des rayons x intervient dans la quasi-totalité des thématiques et constitue un complément indispensable aux observations optiques, microscopiques ou spectroscopiques.

Les rayons x sont indissociables de quelques grands noms de la physique tels Röntgen le découvreur de ce rayonnement électromagnétique en 1895, Bragg, Laue, Debye, Scherrer, Miller et tant d'autres noms qui évoquent, une loi physique découverte ou une méthode expérimentale[28].

La condition de la réflexion est donnée par l'équation de Bragg :

$$n \cdot \lambda = 2 d \sin \Theta$$

Avec n : ordre de la diffraction (entier) ;

λ : La longueur d'onde des rayons x ;

Θ : L'angle entre le faisceau incident et les plans diffractant, il dépend que du réseau du cristal ;

d : La distance inter réticulaire entre deux plans diffractant d'un cristal ;

✦ Principe

La méthode générale consiste à bombarder le matériau par un faisceau de rayons X monochromatique ($0,1 \text{ \AA} < \lambda < 10 \text{ \AA}$) de longueur d'onde $1,54051 \text{ \AA}$, produit par une anticathode de cuivre, à mesurer l'angle par rapport au rayonnement incident des rayons X diffractés et l'intensité des rayonnements X diffractés au moyen d'un compteur à scintillation. Celui-ci tourne autour du même axe que l'échantillon mais à une vitesse double de celle de l'échantillon. Pour un angle d'incidence Θ , l'angle mesure par le déplacement du compteur sera donc de 2Θ .

Le traitement des diffractogrammes ou spectres s'effectue à l'aide d'un logiciel basé sur les fiches d'une base de données faisant correspondre les distances inter réticulaires d aux angles 2Θ enregistrés. La position des pics de diffraction permet l'identification des structures ou phases cristallines présentes et donc la détermination de la composition cristallographique de l'échantillon analysé.

L'un des principaux intérêts de cette méthode est la mesure précise d'intensité et la possibilité d'effectuer des estimations semi quantitatives, en considérant que l'intensité d'une raie est proportionnelle à la quantité de la substance correspondant dans l'échantillon. Cependant, les substances mal cristallisées ou amorphes ne pourront pas être observées par cette technique. (Figure I.16)

Les analyses par DRX sont effectués dans le laboratoire de LTMGP de l'université A/Mira de Bejaia à l'aide d'un diffractomètre.

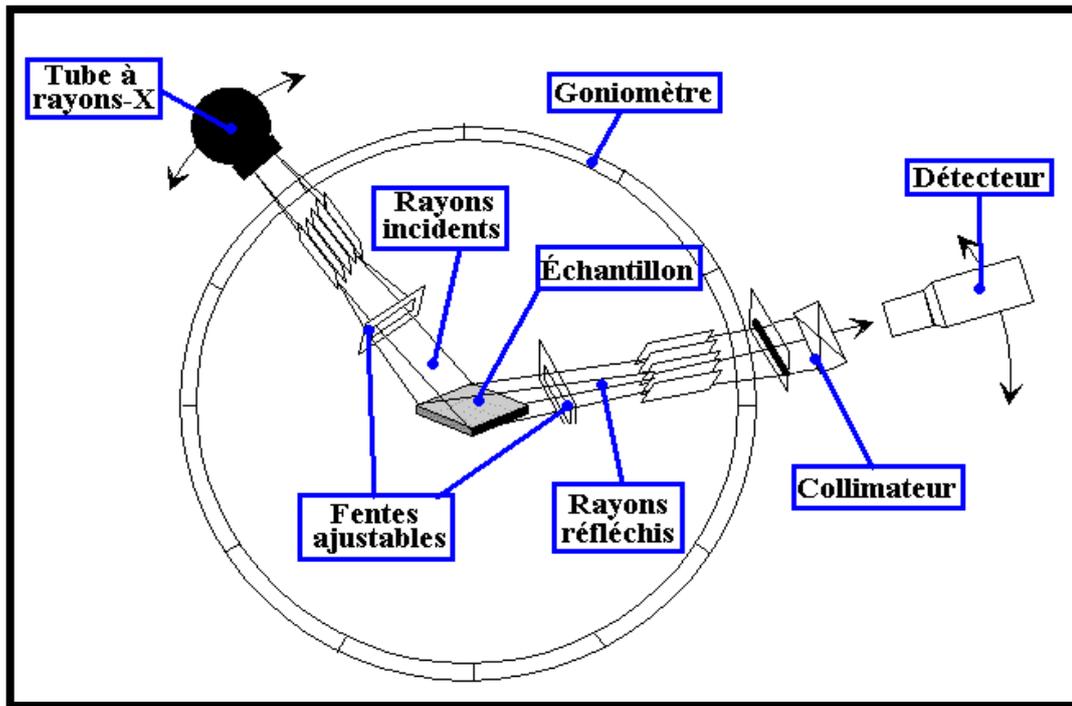


Figure I.16 Schéma d'un spectromètre de diffraction des rayons X [28].

I.4.1.1 Analyse granulométrique des fibres métalliques utilisées

✦ Analyse granulométrique par tamisage NF P 18 – 560 et NF EN 933 – 1

L'analyse granulométrique consiste à fractionner un matériau en différentes coupures au moyen de tamis. Les masses des différents refus (ou des tamisats) sont rapportées à la masse initiale du matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme d'une courbe granulométrique.

✦ Préparation de l'échantillon pour l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme P 18-553. La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0,2 D$, avec M exprimé en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable normalisée et des fibres métalliques (déchet BCR) sont représentés dans le (Tableau I.26) suivants :

Tableau I.26 Classement dimensionnel par tamisage du déchet.

| Masse de l'échantillon soumis à l'essai : P = 1164 grs | | | |
|---|-------------------------------|---|--|
| Ouvertures des tamis (mm) | Refus cumulés Rn (grs) | Refus cumulés en (%) $R(\%) = (R_n/P) \times 100$ | Tamisât cumulés en (%) $T(\%) = 100\% - R(\%)$ |
| 6,3 | 4 | 0,3 | 100 |
| 5 | 8 | 0,7 | 99 |
| 2,5 | 70 | 6 | 94 |
| 1,25 | 412 | 35 | 65 |
| 1 | 838 | 72 | 28 |
| 0,315 | 1156 | 99 | 1 |
| 0,25 | 1160 | 100 | 0 |
| 0,125 | 1160 | 100 | 0 |
| Fond du tamis | 0 | 100 | 0 |

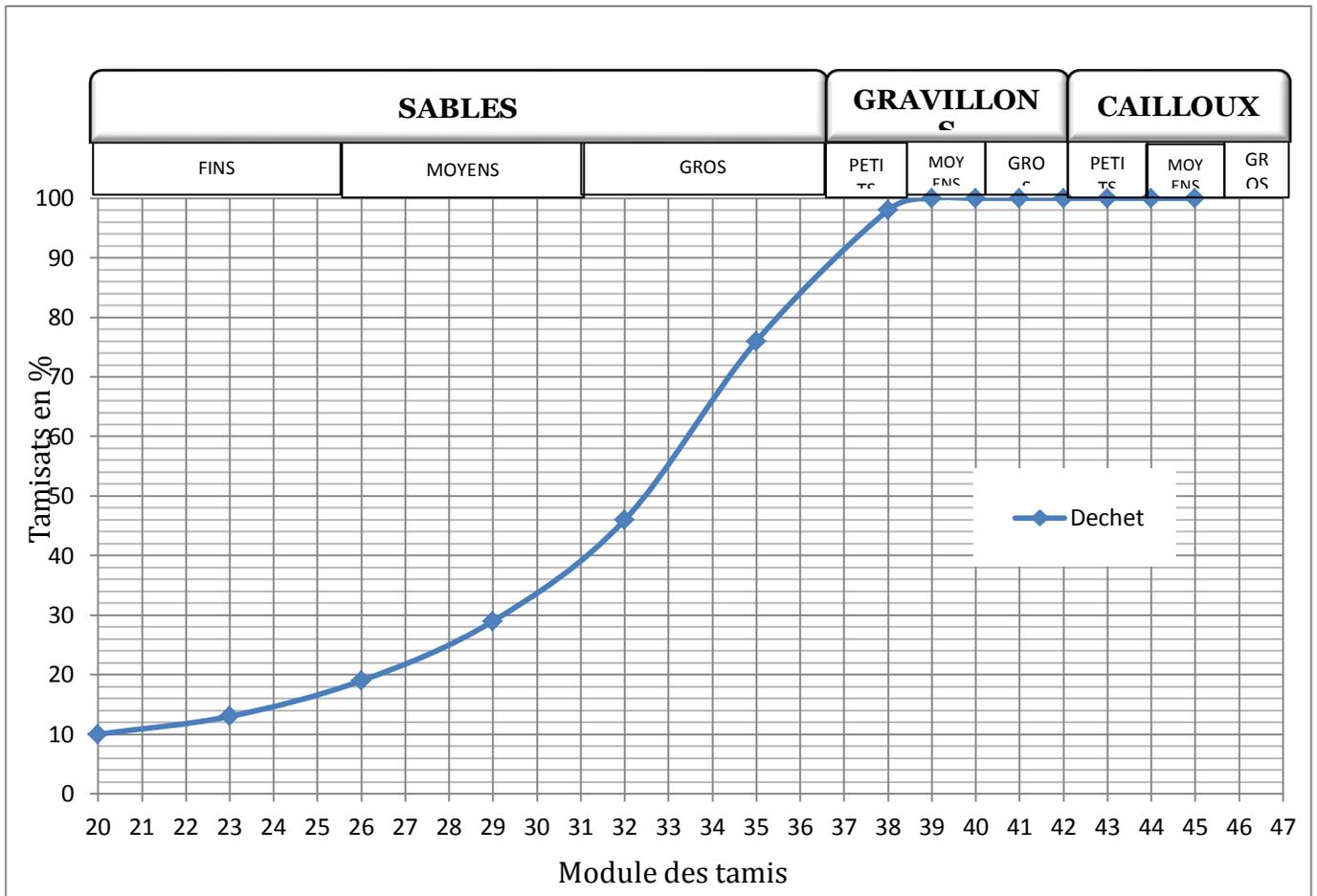


Figure I.17 analyse granulométrique du déchet

↳ Masses Volumiques des fibres métalliques B.C.R

La masse volumique absolue des fibres métalliques est : $\rho_s = 3 \text{ g/cm}^3$.

La masse volumique apparente des fibres métalliques est : $\rho_p = 0.25 \text{ g/cm}^3$.

I.4.1.2 caractérisation des matériaux par des rayons X (DRX) [28]

Cette méthode a pour objectif la détermination des distances interreticulaires et l'identification des principales phases cristallisées présentées dans le déchet et le ciment ainsi que la caractérisation de l'arrangement des réseaux cristallins.

Les résultats obtenus par la diffraction des rayons X sont illustrés dans la (figure

I.18 et figure I.19).

S

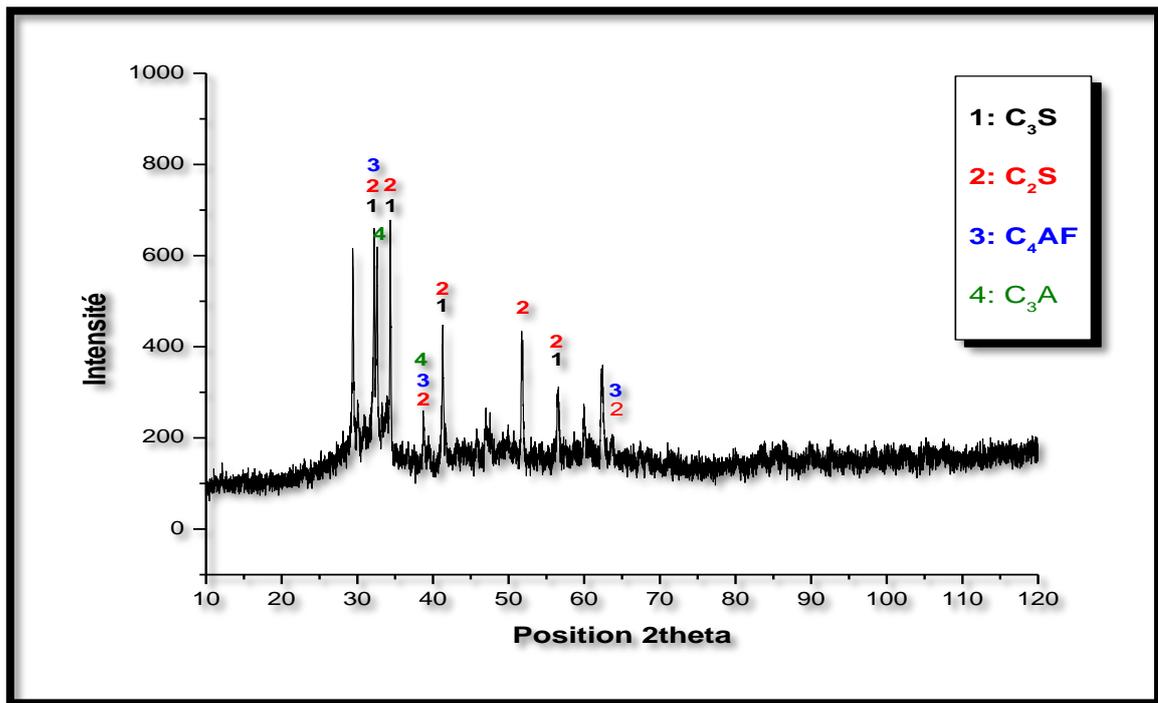


Figure I.18 spectre obtenu par DRX pour le liant hydraulique utilisé ; ciment CPA SCÉM I

D'après le spectre DRX obtenu pour le ciment, les principaux constituants du ciment sont détectés à des valeurs d'angles de diffraction différentes :

- ♦ C_2S à $2\theta = 32.601^\circ, 34.351^\circ, 38.740^\circ, 41.301^\circ, 51.723^\circ$ et 56.464° .
- ♦ C_3S à $2\theta = 32.599^\circ, 34.349^\circ, 41.300^\circ$ et 56.464° .
- ♦ C_3A à $2\theta = 32.207^\circ$ et 38.742° .
- ♦ C_4AF à $2\theta = 32.206^\circ, 38.741^\circ$ et 67.388° .

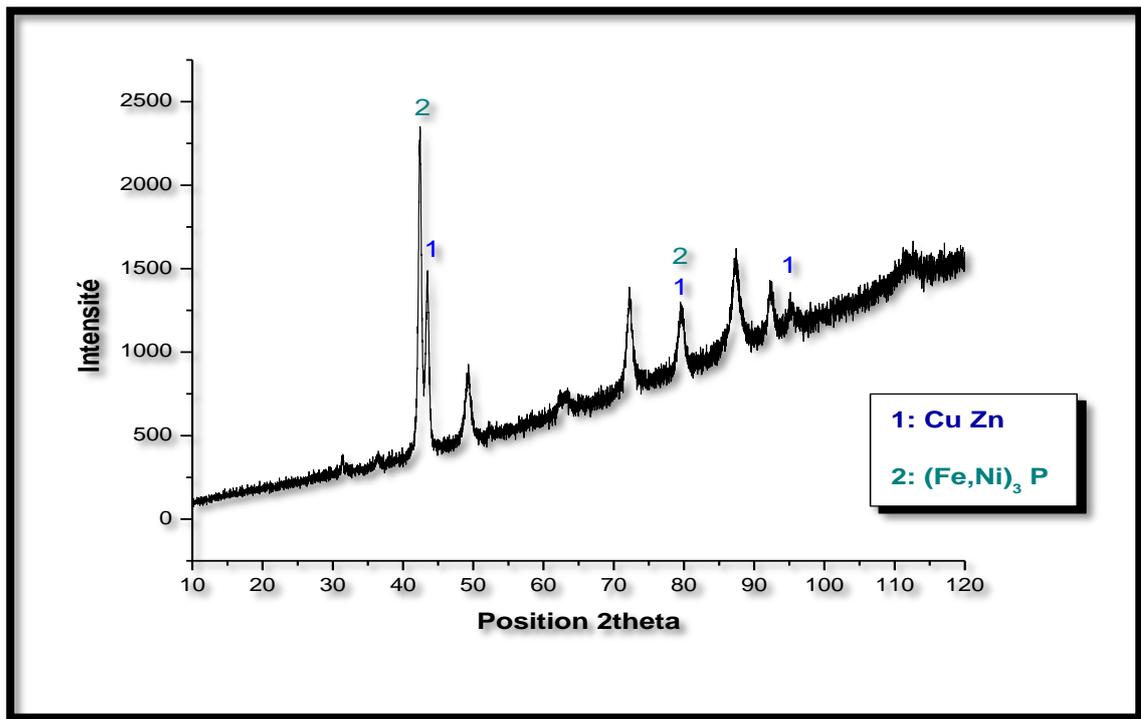


Figure I.19 spectre obtenu par DRX pour le déchet réel.

D'après le spectre DRX obtenu pour le déchet réel, les phases minéralogie détecté à des angles de diffractions différents :

- ◆ Cu,Zn à $2\theta = 43.449^\circ$, 79.542° et $95,258^\circ$.
- ◆ $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ à $2\theta = 42.466^\circ$ et $79,543^\circ$.

I.4.2 Microscopie électronique à balayage MEB couple a l'EDX

Le principe du MEB consiste à utiliser des électrons émis par la surface d'un solide, lorsqu'elle est bombardée par un faisceau d'électrons dont l'énergie est de l'ordre de quelque keV. Le faisceau d'électrons émis par un filament de tungstène est d'abord accéléré puis concentré sur une partie de la surface d'un matériau. Un dispositif intermédiaire permet au faisceau de balayer la surface à examiner. Au point d'impact, plusieurs rayonnements sont émis, mais seuls les électrons secondaires et rétro diffusés contribuent à la formation de l'image et de la topographie de l'échantillon. Cette technique apporte des informations sur la morphologie des minéraux et des matériaux, des produits de calcination et des hydrates formés au cours du durcissement par chauffage [29].

Les observations en microscopie électronique à balayage ont été réalisées avec un microscope de type FEI Quanta 200. Les échantillons déchet et matériaux

stabilisé/solidifié sont analysés en état solide (pastille) afin d'exposer le maximum de la couche superficielle aux électrons incidents. (Voir la figure I.20)



Figure I.20 Appareil du MEB

➤ Les résultats obtenus pour le déchet par le MEB

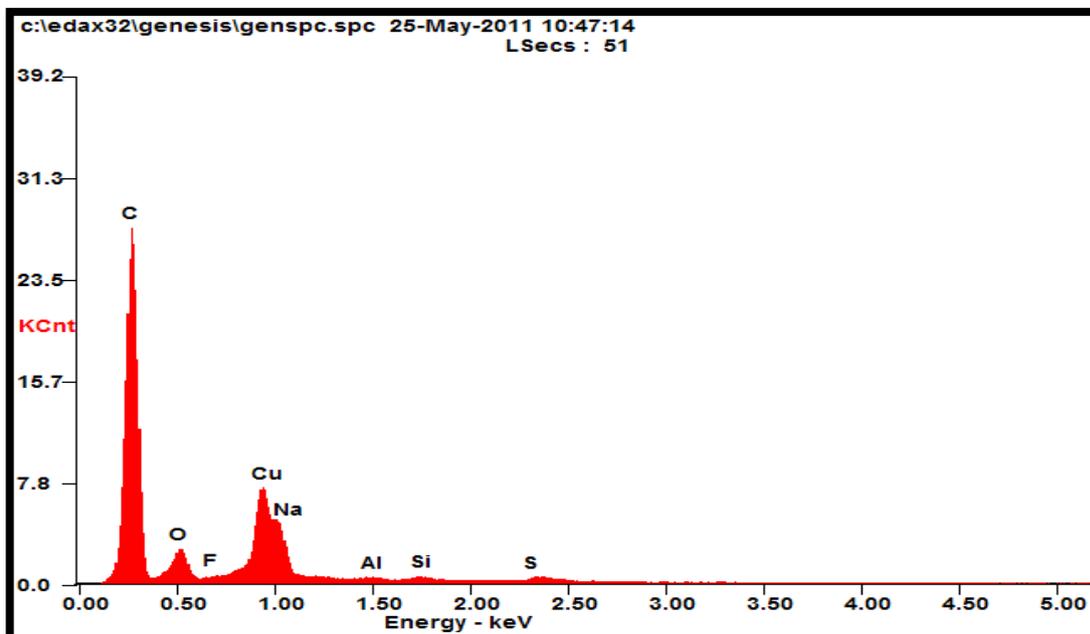


Figure I.21 spectre EDX du déchet réel.

Tableau I.27 Analyse du déchet par l EDX

| Elément | Wt% | At% |
|-----------|--------------|--------------|
| C | 68.97 | 86.40 |
| O | 05.00 | 04.71 |
| F | 00.18 | 00.15 |
| Cu | 18.96 | 04.49 |
| Na | 05.18 | 03.39 |
| Al | 00.29 | 00.16 |
| Si | 00.55 | 00.29 |
| S | 00.87 | 00.41 |

↳ Expression des résultats

L'analyse EDX montre que la composition élémentaire de la surface examiné est de 18,96 pour le cuivre (Cu) qui est le composé majoritaire des fibres métalliques utilisé dans notre étude.

I.5 METHODES CHIMIQUES D'ANALYSES

I.5.1 Résultats des analyses chimiques

I.5.1.1 Analyses chimiques du sable.

Tableau I.28 Analyse chimique du sable 0/3

| Désignation de l'échantillon | % Insoluble | % Carbonates CaCO ₃ | % Chlorures Nacl | % Gypse CaSO ₄ , 2H ₂ O | Teneur en anions de sulfate SO ₄ ⁻ |
|------------------------------|-------------|--------------------------------|------------------|---|--|
| Sable 0/3 BOUANDAS | 02.84 | 96.89 | Néant | Néant | Néant |

Les Analyses chimiques du sable BOUANDAS a été réalisées au niveau du laboratoire LTP-Est (Direction régional Sétif)

A partir de ces résultats, on constate que les sables 0/3 (BOUANDAS) ne sont pas agressifs pour les bétons et sont, riches en CaCO₃ (>96,89 %). Donc ce sont des matériaux calcaires.

I.5.1.2 Analyse minéralogique du ciment

Le ciment utilisé, est le ciment CPA CEM I-42.5 NA443. Toutes les caractéristiques de ce ciment sont données dans l'annexe A.

CONCLUSION

Après la présentation de différentes caractéristiques de nos constituants et les essais qui sont effectués sur l'ensemble des matériaux, nous présenterons dans le chapitre suivant l'étude de formulation des bétons.

Toutes les caractéristiques de ce ciment sont données dans l'annexe A

CHAPITRE II

FORMULATIONS DES BETONS

INTRODUCTION

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

Les méthodes proposées sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes, elles aboutissent à des dosages volumétriques ou de préférence pondéraux, le passage de l'un à un autre pouvant toujours se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats.

Le présent chapitre, sera consacré à l'étude de formulation des bétons qui consiste à définir les pourcentages des différents granulats dont on dispose, ainsi que les dosages en eau et en ciment, afin de réaliser un béton dont les caractéristiques soient celles recherchées pour l'ouvrage considéré.

II.1 COMPOSITION DU BETON

L'étude d'une composition de béton consiste presque toujours, à rechercher la consistance, la durabilité et la résistance à la compression ; or la résistance et l'ouvrabilité sont deux qualités liées l'une à l'autre, quant aux facteurs dont elles dépendent varient en sens inverse comme indiqué le tableau suivant :

Tableau II.1 : Qualités de divers paramètres en fonction soit de l'ouvrabilité, soit de la résistance recherchée pour un béton. [30]

| Facteurs de composition du béton | Pour une bonne ouvrabilité | Pour une bonne résistance |
|----------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Finesse du sable | Plutôt fin | Plutôt grossier |
| Rapport G/S (gravier/Sable) | A diminuer | A augmenter |
| Dosage en eau | A augmenter | A diminuer |
| Granularité | Continue préférable | Discontinue, légèrement préférable |
| Dimension maximale des granulats | Plutôt petite | Plutôt forte |

II.2 QUELQUES METHODES DE COMPOSITION DE BETON

Pour déterminer la composition des bétons à mettre à en œuvre, il existe plusieurs méthodes, telles que :

- Méthode de BOLOMEY.
- Méthode de VALLETTE.
- Méthode de FAURY.
- Méthode de DREUX-GORISSE.
- Méthode de JOISEL.
- Méthode des VOLUMES ABSOLUS.
- Méthode de BARON-LESAGE.

Dans ce qui suit, nous n'allons exposer qu'une seule méthode : la Méthode de DREUX-GORISSE ; celle qu'on a utilisé pour la détermination des dosages de nos bétons.

II.3 METHODE DREUX-GORISSE [30]

Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier, et ayant donné satisfaction. Elle est d'autre part rapide et très simple d'utilisation puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés.

Nous allons établir toutes les courbes granulaires sur un graphique du type normalisé AFNOR, qui comporte en abscisse une graduation logarithmique, ce qui présente l'avantage d'une graduation équidistance en module successifs ; outre l'intérêt que présente l'utilisation d'un graphique normalisé, cette linéarité en module a l'avantage de la simplicité d'établissement.

◆ Détermination de la composition du béton pour les granulats de la carrière de BOUANDAS

Sur le graphique semi-logarithmique, on trace les courbes granulométriques des granulats 0/3, 8/15 et 15/25.

↳ Tracé de la courbe granulaire de référence

La composition granulométrique optimale est représentée par une ligne brisée OAB, cette courbe nous permet de déterminer les différents pourcentages (%) des entrants dans la composition du béton.

↳ Coordonnées des points O, A et B :

➡ Le point d'origine **O** :

- Abscisse : $X_O = 0$ mm
- Ordonnée : $Y_O = 0\%$

➡ Le point d'extrémité **B** :

A l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulat.

- Abscisse : $X_B = D = 25$ mm
- Ordonnée : $Y_B = 100\%$

➡ Le point A (point de brisure), à des coordonnées ainsi définies :

- En abscisse :

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

Si $D > 20$ mm, l'abscisse X_A est située au milieu du segment délimité par D et le tamis de maille 5 mm

Dans notre cas : $D > 20$ mm ($D = 25$ mm)

Alors l'abscisse du point A est située au milieu du segment délimité par 25 mm et par le tamis 5 mm ; donc entre les tamis de mailles 10 mm et 12.5 mm.

- Ordonnée :

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

K : un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage et de la forme des granulats roulés ou concassés. Voir le (Tableau II.2) ci-dessous

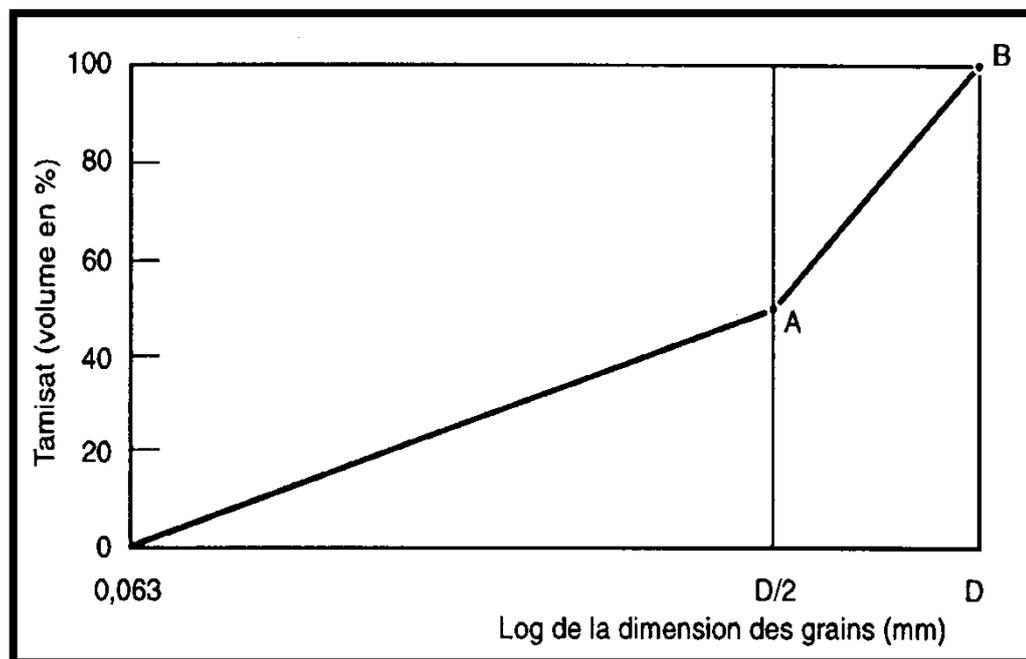


Figure II.1 Courbe de référence

Tableau II.2 Valeurs de K [31]

| Vibration | | Faible | | Normale | | Puissante | |
|--|----------------------|--------|----------|---------|----------|-----------|----------|
| Forme des granulats (du sable en particulier) | | Roulé | Concassé | Roulé | Concassé | Roulé | Concassé |
| Dosage en Ciment | 400+Superplastifiant | - 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 |

Sachant que le dosage en ciment est de 350 Kg/m^3 et que notre sable est concassé et choisissant une vibration normale, donc d'après le tableau : $\mathbf{K} = +2$

K_s : correction supplémentaire.

$$\mathbf{K_s = 6 MF-15}$$

$$\mathbf{K_s = 6 \times 3.2 - 15 = 4.20}$$

$$\mathbf{Y_A = 50 - \sqrt{25 + 2 + 4.20} = 51.2\%}$$

A partir de graphique ,on aura :

$$\left. \begin{array}{l} G_1 (\text{pourcentage du graviers } 15/25) = 36\% \\ G_2 (\text{pourcentage du graviers } 8/15) = 20\% \\ S (\text{pourcentage du sable } 0/3) = 44\% \end{array} \right\} \Rightarrow G_1 + G_2 + S = 100\%$$

II.4 TRACE DE LA COURBE DU MELANGE DES GRANULATS

Les valeurs des tamisats en % de la courbe de mélange, sont calculées à partir des analyses granulométriques des granulats et des pourcentages de ces derniers, obtenus précédemment.

Ces valeurs des tamisats sont données par le tableau suivant :

Tableau II.3 : Les valeurs des tamisats (%) de la courbe de mélange

| Tamis (mm) | Tamisats (%) S (0/3) | Tamisats (%) G ₁ (8/15) | Tamisats (%) G ₂ (15/25) | Mélange 0.41S +0.27 G ₁ +0.32 G ₂ |
|---------------|----------------------------|--|---|--|
| 25 | 100 | 100 | 98 | 100 |
| 20 | 100 | 100 | 83 | 95 |
| 16 | 100 | 95 | 22 | 74 |
| 12.5 | 100 | 67 | 09 | 62 |
| 10 | 100 | 40 | 06 | 54 |
| 8 | 100 | 21 | 0 | 47 |
| 6.3 | 100 | 04 | 0 | 42 |
| 5 | 98 | 02 | 0 | 41 |
| 2.5 | 76 | 0 | 0 | 31 |
| 1.25 | 46 | 0 | 0 | 19 |
| 0.63 | 29 | 0 | 0 | 12 |
| 0.315 | 19 | 0 | 0 | 08 |
| 0.16 | 13 | 0 | 0 | 05 |
| 0.08 | 10 | 0 | 0 | 04 |
| 0.063 | 10 | 0 | 0 | 04 |

Après le tracé de la courbe de mélange (voir la courbe de mélange), on remarque que cette dernière s'approche bien de la courbe de référence (elles sont presque confondues) ; donc la granulométrie du mélange est bonne.

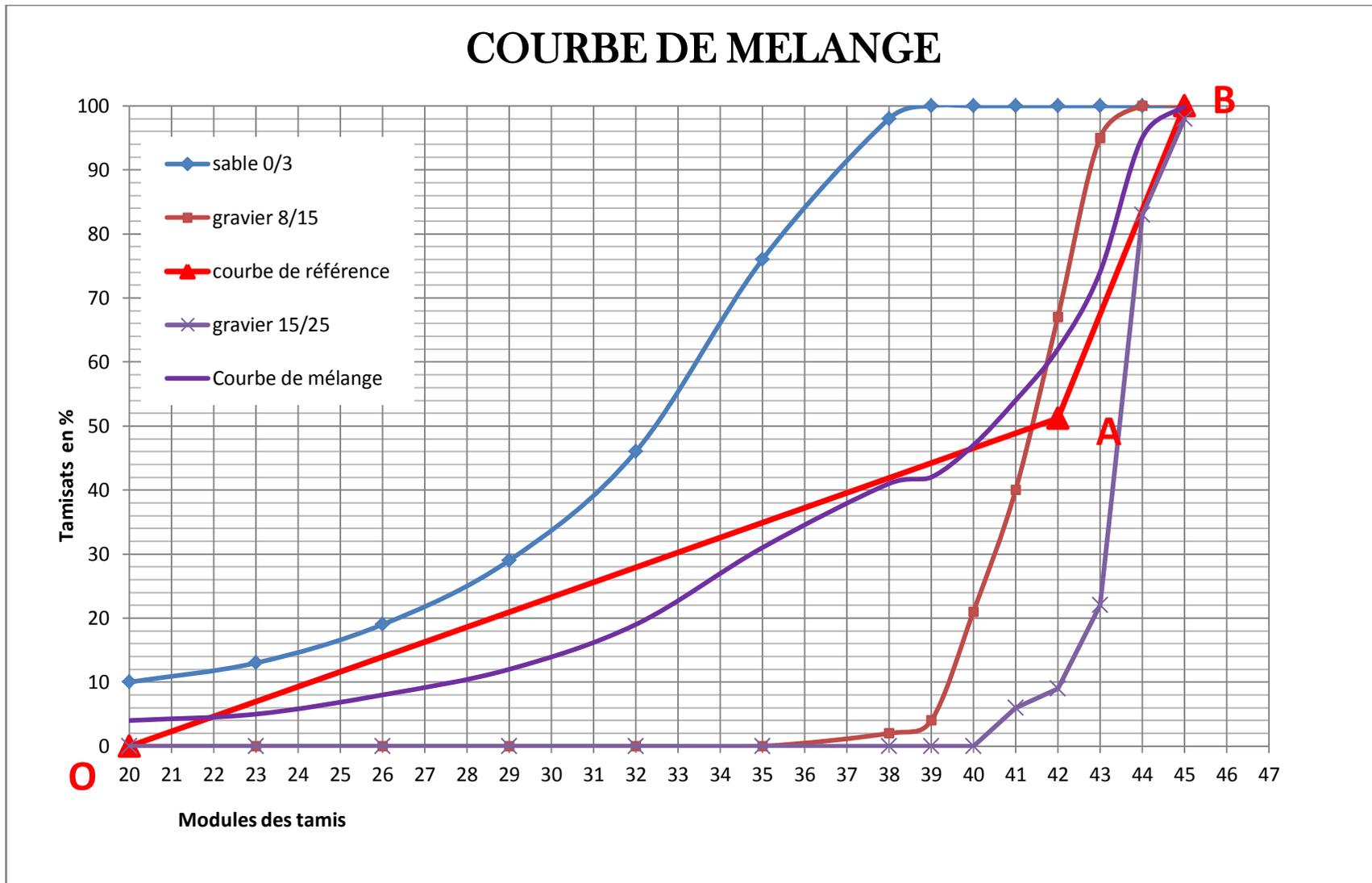


Figure II. 2 Courbe de mélange selon Dreux-Gorisse

II.4.1 Dosage en ciment

Le dosage en ciment le plus courant pour un béton de qualité est général de 350 Kg/m³. Nous allons donc, adopter cette valeur que nos résultats couvrent les cas les plus courants de la pratique.

II.4.2 Dosage en eau :

Connaissant le dosage en ciment ($C=350 \text{ Kg/m}^3$), et fixant un rapport d'eau sur ciment égal à 0.5 ($\frac{E}{C}=0.5$), on peut déterminer la quantité d'eau à utiliser pour 1m³ de béton.

$$\text{On a: } \frac{E}{C} = 0.5 \Rightarrow E = 175 \text{ Kg/m}^3.$$

II.4.3 Dosage des granulats :

↳ **Calcul du coefficient de compacité (γ)**

- **Définition :**

Le coefficient de compacité γ est le rapport d'un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un mètre cube de béton frais.

$$\gamma = V_m / 1000$$

Avec :

- V_m : volume absolu des matières solides.
- $V_m = V_G + V_S + V_C$ (litres).
- V_G : volume des gravillons.
- V_S : volume du sable.
- V_C : volume du ciment.

Les valeurs du coefficient de compacité (γ) sont données dans le tableau E.

D'après ce dernier tableau, on détermine γ comme suit :

$$\text{Pour } D=20 \text{ mm} \Rightarrow \gamma=0.825$$

$$\text{Pour } D=25 \text{ mm} \Rightarrow \gamma = ?$$

$$\text{Pour } D=30 \text{ mm} \Rightarrow \gamma=0.830$$

Et ça, pour une consistance plastique et un serrage de vibration normale.

Donc, on aura $\gamma=0.827$ Pour $D=25$ mm.

↪ Volumes absolus des constituants solides

- Volume total absolu = $1000 \times \gamma = 797$ litres
- Volume absolu du ciment = $350/3.1=113$ litres (la valeur moyenne spécifique des grains de ciment est 3.1)
- Volume absolu des trois (03) granulats est : $797-113 = 684$ litres

⇒ Alors les volumes absolus des constituants sont les suivants :

- Volume absolu du sable 0/3..... $684 \times 0.44 = 300.96$ litres
- Volume absolu du gravier 8/15..... $684 \times 0.20 = 136.80$ litres
- Volume absolu du gravier 15/25..... $684 \times 0.36 = 246.24$ litres
- Volume absolu du ciment..... 113.00 litres.

Total= 797 litres.

◆ Dosage des granulats et de ciment (Kg/m^3)

On obtient ces dosages, en multipliant le volume absolu de chaque granulats par sa masse volumique absolue (ρ_s).

- Sable 0/3..... $300.96 \times 2.72 = 818.61 \text{ Kg/m}^3$
- Gravier 8/15..... $136.80 \times 2.64 = 361.15 \text{ Kg/m}^3$
- Gravier 15/25..... $246.24 \times 2.81 = 691.93 \text{ Kg/m}^3$
- Ciment..... $113.00 \times 3.10 = 350 \text{ Kg/m}^3$

⇒ Influence du rapport G/S

Pour garantir une bonne résistance du béton, Dreux recommande d'avoir un rapport en masse G/S (Gravier/Sable) voisin de 2

- **Calcul de G/S :**

$$G/S = (361.15 + 691.93) / 818.61 = 1.28$$

Le rapport G/S est loin de la valeur 2, on va modifier les pourcentages des granulats pour avoir une valeur proche de 2.

Après plusieurs essais de calculs, on choisit les pourcentages (%) suivants :

- 34% pour le sable 0/3
- 34% pour le gravier 8/15
- 32% pour le gravier 15/25

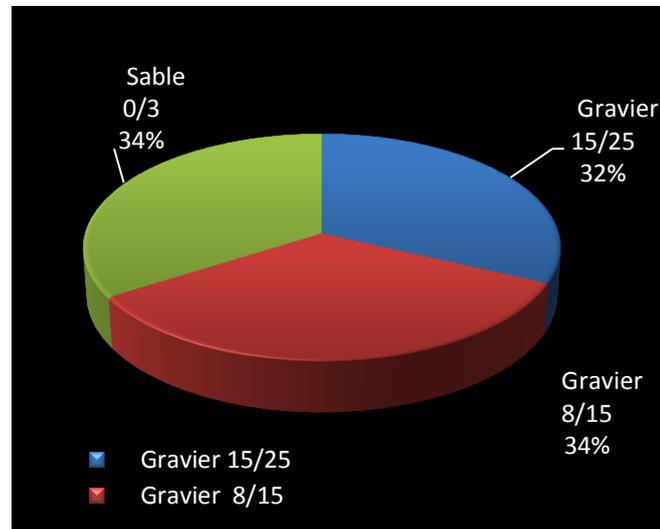


Figure II.3 Les pourcentage des différentes fractions granulaires

↪ Nouveaux volumes absolus et dosages en Kg/m^3 des granulats

➤ Nouveaux volumes absolus des granulats

- Volume absolu du sable 0/3..... $684 \times 0.34 = 239.56$ litres
- Volume absolu du gravier 8/15..... $684 \times 0.34 = 239.56$ litres
- Volume absolu du gravier 15/25..... $684 \times 0.32 = 218.88$ litres

➤ Nouveaux dosages des granulats en Kg/m^3

- Sable 0/3..... $684 \times 0.34 \times 2.72 = 632.56 \text{ Kg/m}^3$
- Gravier 8/15..... $684 \times 0.34 \times 2.64 = 613.95 \text{ Kg/m}^3$
- Gravier 15/25..... $684 \times 0.32 \times 2.81 = 615.05 \text{ Kg/m}^3$

◆ $G/S = (613.95 + 615.05) / 632.56 = 1.94 \approx 2$.

II.4.4 Densité théorique du béton frais (Δ_0)

La densité théorique du béton frais est égale à la somme des densités de tous les constituants du béton (eau, ciment, sable, graviers 8/15, graviers 15/25).

| | |
|----------------------|--------------------------|
| - sable 0/3..... | 632.56 Kg/m ³ |
| - gravier 8/15..... | 613.95 Kg/m ³ |
| - gravier 15/25..... | 615.05 Kg/m ³ |
| - Ciment..... | 350 Kg /m ³ |
| - Eau..... | 175 Kg /m ³ |

$$\Delta_0=2386.56 \text{ Kg/m}^3.$$

II.4.5 Dosage des granulats (litres/m³)

Les dosages des granulats, en « litres/m³ », sont obtenus en divisant le dosage de chaque granulat par sa masse volumique apparente (ρ_p).

$$\text{Sable 0/3} \dots\dots\dots 632.56 / 1.16 = 545.31 \text{ litres/m}^3$$

$$\text{Gravier 8/15} \dots\dots\dots 613.95 / 1.28 = 479.64 \text{ litres/m}^3$$

$$\text{Gravier 15/25} \dots\dots\dots 615.05 / 1.38 = 445.68 \text{ litres/m}^3$$

II.4.6 Récapitulation de la composition du béton.

Tableau II.4 Récapitulatif de la composition du béton

| Composants | % des granulats | Volume absolu des composants (litres) | ρ_s (g/cm ³) | Dosage des composants (Kg/m ³) | ρ_p (g/cm ³) | volume des composants (litres/m ³) |
|---------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|--|
| Eau | - | 175.00 | 1 | 175.00 | 1 | 175 |
| Ciment | - | 113.00 | 3.1 | 350.00 | - | - |
| Sable 0/3 | 34 | 232.56 | 2.72 | 632.56 | 1.16 | 545.31 |
| Gravier 8/15 | 34 | 232.56 | 2.64 | 613.95 | 1.28 | 479.64 |
| Gravier 15/25 | 32 | 218.88 | 2.81 | 615.05 | 1.38 | 445.68 |
| TOTAL | 100 | 972 | 12.27 | 2386.56 | 4.82 | 1645.63 |

CONCLUSION

Le béton est un mélange dont la composition a une profonde influence sur ses caractéristiques; mais si les caractéristiques attendues sont la plupart du temps bien définies, la mise au point d'un béton approprié peut s'avérer plus délicate. Les paramètres sont en effet nombreux :

- les données du chantier : matériel de mise en œuvre, conditions climatiques, etc.
- les données liées aux propriétés du béton : maniabilité, compacité, durabilité, etc.

Après avoir présenté dans ce chapitre, la méthode de formulation que nous avons utilisée durant cette étude, nous allons présenter dans le prochain chapitre les résultats obtenus durant nos différentes expérimentations ainsi que les discussions associées.

CHAPITRE III

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

INTRODUCTION

Le béton est un matériau de construction formé par le mélange de ciment, de granulats et d'eau, éventuellement complété par des adjuvants et des additions. Il peut adopter des formes très diverses parce qu'il est modulable. L'objectif est d'obtenir, en place, le béton le plus compact et le plus homogène possible avec les constituants et les moyens de mise en œuvre qui sont disponibles.

On essaye d'étudier au cours de ce chapitre, l'effet des différents paramètres sur les propriétés des béton à l'état frais et durci

III.1 ESSAIS D'ETUDE

Les essais d'études sont les essais qui permettent de vérifier, en laboratoire, les qualités des bétons, notamment leur maniabilité et leur résistance.

III.2 CONFECTION DES EPROUVETTES

⇒ Dimension des moules (NF P18-400)

Les moules les plus fréquemment utilisés sont les moules cylindriques. Leurs dimensions doivent être choisis en fonction du diamètre maximal des granulats (D) entrant dans la composition du béton. Pour notre étude, on utilisera des moules de $16 \times 32 \text{ cm}^2$.

↳ Gâchée d'essai

La gâchée exécutée au laboratoire, doit permettre d'obtenir un volume de béton frais excédant celui des éprouvettes.

Les constituants sont introduits dans la cuve dans l'ordre suivant :

Gravillons, sable, ciment + ajout et enfin eau+ adjuvant.

L'eau de gâchage doit être rajoutée après un malaxage à sec de l'ordre de 1 min ; le malaxage est alors poursuivi pendant 2 min.

Remarque

Dans notre étude, on compte réaliser des bétons plastiques avec un affaissement voisin de 8 cm. Sachant qu'on a besoin pour chaque gâchée d'essai de :

- Remplir 8 cylindres de $16 \times 32 \text{ cm}$
- Remplir le cône d'Abrams (ce cône prend presque le même volume qu'un cylindre de 16×32)
- Remplir le récipient de l'Aéromètre

Donc on a besoin de remplir un volume voisinant 8 cylindres

Pour remplir un cylindre ($16 \times 32 \text{ cm}$) de béton on aura besoin d'un poids **P** (Kg), qu'on calculera comme suit :

$$M = V \times D_0, \text{ tel que :}$$

V : volume du cylindre et $D_0 = 2.36$: densité théorique du béton frais. Alors :

$$P = \pi r^2 h \times \Delta_0 = (3.14 \times 8^2 \times 32 \times 2,36) \cdot \frac{1}{1000} = 15,22 \text{ Kg. ; } 16 \text{ Kg.}$$

↳ Masse total de la gâchée

Pour une série de six (06) éprouvettes :

$$P' = 6 \times P = 96 \text{ Kg.}$$

Lors de malaxage du béton, on mesurera son affaissement au cône d'Abrams, ce cône prend presque le même poids qu'une éprouvette de $16 \times 32 \text{ cm}^3$, et en faisant l'essai à l'aéromètre, ce dernier à une capacité égale au moins cinq (05) litres, presque une capacité d'une éprouvette de $16 \times 32 \text{ cm}^3$.

Alors le poids total de la gâchée est :

$$P_t = 16 \times 8 = 128 \text{ Kg.}$$

Ce poids total, est celui du béton frais qu'on doit obtenir à la fin de la gâchée. Il reste à déterminer le poids nécessaire pour chaque composant de ce béton (gravier, sable, ciment et eau). Il est obtenu, en divisant Ce poids total (P_t) par un coefficient ξ , tel que :

$$\xi = \frac{\text{poids total des composants par un mètre cube de béton}}{\text{poids total du béton frais}}$$

$$\xi = \frac{A_0}{P_t}$$

$$\xi = 2386.56/128 = 18.64 \approx \mathbf{19}$$

Donc, pour une gâchée, la masse nécessaire de chaque composant est de :

- Eau..... (175/19) = 9.210 Kg/m³
- Ciment..... (350/19) = 18.421 Kg/m³
- Sable 0/3.....(632.56/19) = 33.292 Kg/m³
- Gravier 8/15..... (613.95/19) = 32.313 Kg/m³
- Gravier 15/25.....(615.05/19) = 32.371 Kg/m³

↳ Dosages en fonction de l'ajout des fibres métalliques :

Connaissant le dosage en ciment (18.421 Kg) pour un béton témoin (avec 0% des fibres métalliques) nécessaire pour une gâchée, on peut déterminer la masse de ciment et les masse des fibres métalliques aux différents pourcentages.

- Ciment à 0% de fibres métalliques

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Poids du ciment : } P_c = 18.421 \text{ Kg} \\ \text{Poids des fibres métalliques: } P_{fm} = 0 \text{ Kg} \end{array} \right.$$

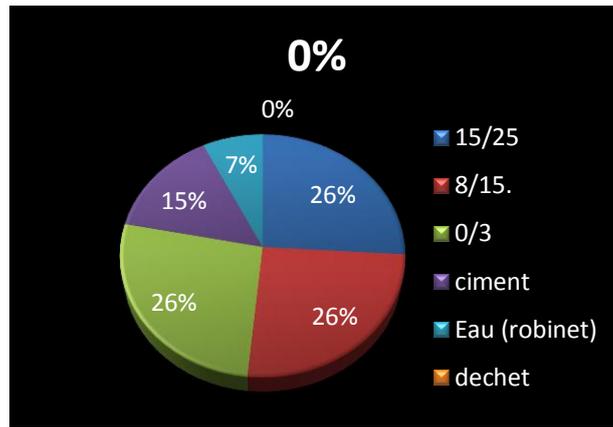


Figure III.1 Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 00%

- Ciment à 10% de fibres métalliques

$$\left. \begin{aligned}
 P_{total} &= (P_c + P_{fm}) = 18.421 \text{ Kg.} \\
 P_t &\rightarrow 100\% \\
 P_{fm} &\rightarrow 10\% \\
 P_{fm} &= 1.84 \text{ Kg}
 \end{aligned} \right\}$$

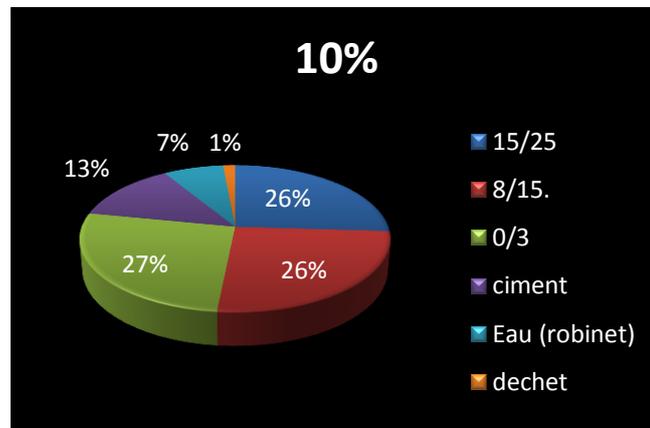


Figure III.2 Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 10%

- Ciment à 20% de fibres métalliques

$$\left. \begin{aligned}
 P_{total} &= (P_c + P_{fm}) = 18.421 \text{ Kg.} \\
 P_t &\rightarrow 100\% \\
 P_{fm} &\rightarrow 20\% \\
 P_{fm} &= 3.68 \text{ Kg}
 \end{aligned} \right\}$$

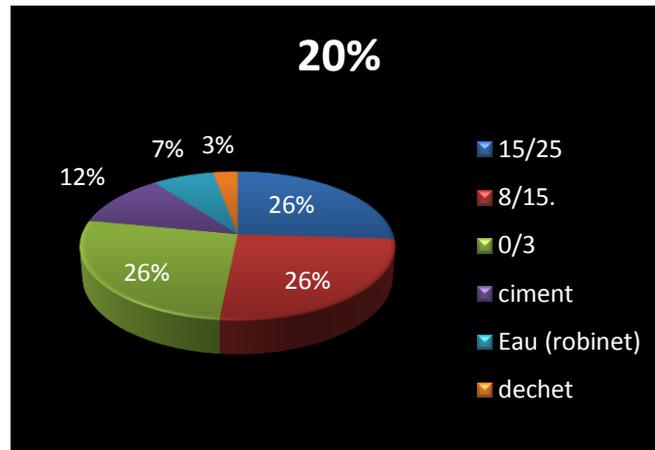


Figure III.3 Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 20%

-Ciment à 30% de fibres métalliques

$$P_{total} = (P_c + P_{fm}) = 18.421 \text{ Kg.}$$

$$P_t \rightarrow 100\%$$

$$P_{fm} \rightarrow 30\%$$

$$P_{fm} = 5.53 \text{ Kg}$$

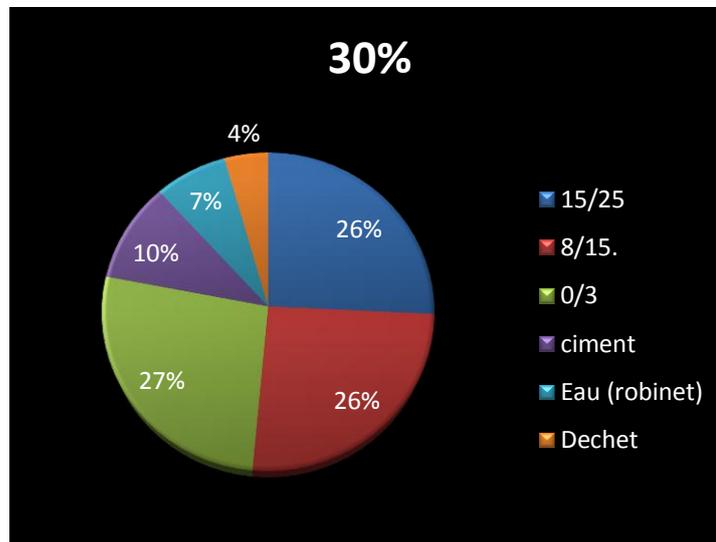


Figure III.4 Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton à 30%

III.3 RECAPITULATION DE LA COMPOSITION DES DIFFERENTES GACHEES

Tableau III.1 Récapitulatif de la composition des gâchées

| N° Série | Gravier 15/25 (Kg) | Gravier 8/15 (Kg) | Sable 0/3 (Kg) | Ciment (Kg) | Eau (Kg) | Fibres métalliques BCR (Kg) |
|-----------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|-------------|--------------------------------------|
| BT (00%) | 32.371 | 32.313 | 33.292 | 18.421 | 9.210 | - |
| BT (10%) | 32.371 | 32.313 | 33.292 | 16.58 | 9.210 | 1.84 |
| BT (20%) | 32.371 | 32.313 | 33.292 | 14.74 | 9.210 | 3.68 |
| BT (30%) | 32.371 | 32.313 | 33.292 | 12.89 | 9.210 | 5.53 |

III.4 ESSAIS SUR BETON FRAIS

Les principaux essais effectués sur les bétons frais sont les suivants :

L'ouvrabilité, le pourcentage d'air occlus dans le béton et la masse volumique.

➤ Essai de consistance

Le problème est de quantifier la maniabilité qui est une qualité, évolutive dans le temps, du béton avant prise.

C'est le but des essais de consistance qui classe (en 04 classes) les bétons suivant une échelle de fluidité croissante : ferme, plastique, très plastique et fluide (F, P, TP, FI).

Tableau III.2 les quatre classes de consistances [31]

| Affaissement | Classe de consistance | Désignation simplifiée | Ecart toléré |
|----------------------|-----------------------|------------------------|--------------|
| de 0 à 4 cm | Béton ferme | F | ± 1 cm |
| de 5 à 9 cm | Béton plastique | P | ± 2 cm |
| de 10 à 15 cm | Béton très plastique | TP | ± 3 cm |
| ≥ à 16 cm | Béton fluide | FI | ± 3 cm |

➤ Essai d'affaissement au cône d'Abrams (NF P 18-451)

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre, il peut être effectué directement sur chantier. Il est utilisable à tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm.

↪ Principe de l'essai

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre. Plus cet affaissement sera grand, plus le béton sera fluide.

↪ Matériel utilisé

L'appareillage se compose de 4 éléments :

- un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut, 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure ;
- une plaque d'appui.
- une tige de piquage.
- un portique de mesure.



Figure III.5 Cône d'Abrams

↪ Conduite de l'essai

La plaque d'appui et le moule (fixé sur la plaque) sont légèrement humidifiés. Le béton est introduit dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 25 fois par couche.

Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule, le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution. Le béton n'étant plus maintenu s'affaisse plus ou moins suivant sa consistance.

Celle-ci est caractérisée par cet affaissement, noté (A), mesuré grâce au portique et arrondi au centimètre le plus proche. La mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage.

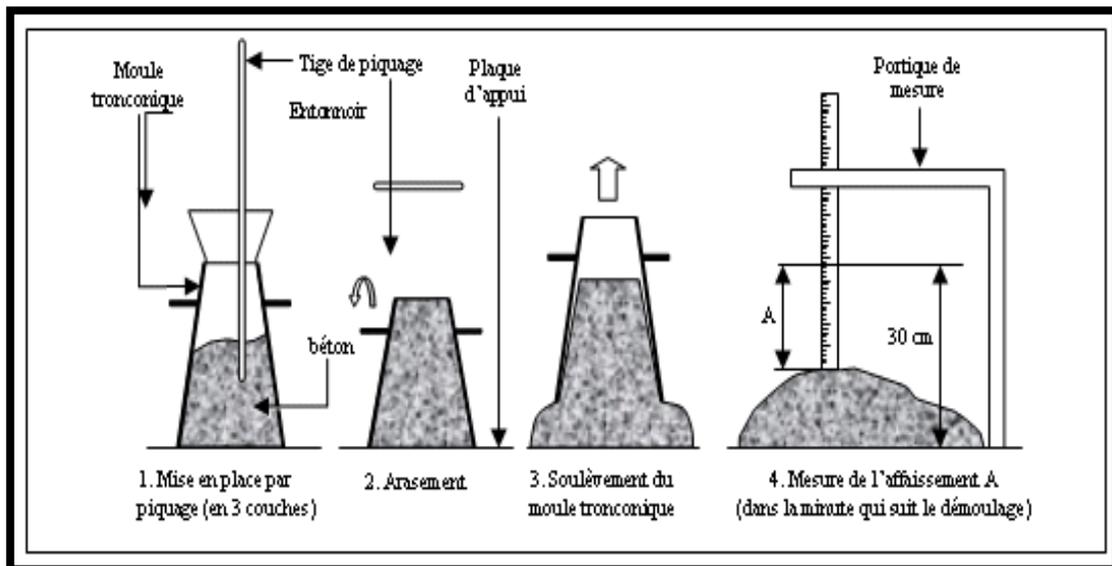


Figure III.6 Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

↳ Expression des résultats

Les résultats obtenus sont récapitulés dans l'annexe B, et ils sont schématisés par la courbe suivante :

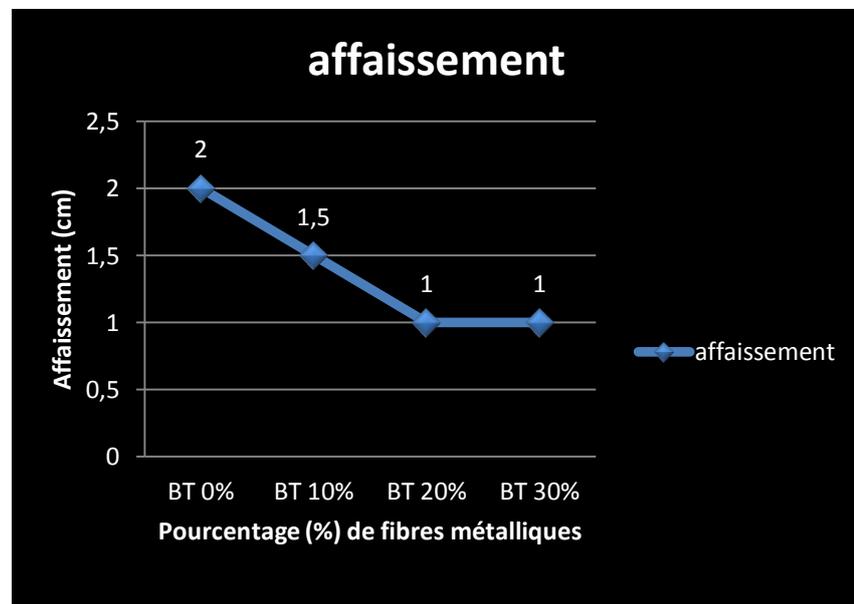


Figure III.7 Variation de l'affaissement en fonction de Différentes séries du béton

↪ Interprétation des résultats

Cet essai est exécuté sur le béton frais pour déterminer et quantifier l'ouvrabilité du béton. Les valeurs de l'affaissement obtenus montre que :

Pour un rapport $E/C=0,5$, on a obtenu une consistance ferme pour le béton témoin ainsi que pour les bétons à l'ajout de fibres métalliques.

➔ Essai de la teneur en air du béton (l'Aéromètre) (NF P 18-443)

↪ Principe de l'essai

Cette méthode consiste à introduire de l'eau sur une hauteur prédéfinie au-dessus d'un échantillon de béton compacté de volume connu se trouvant dans une enceinte étanche et à appliquer sur l'eau une pression d'air prédéterminée. On mesure la diminution du volume d'air contenu dans l'échantillon de béton en observant la valeur de la baisse du niveau d'eau.



Figure III.8 Aéromètre

↪ Conduite de l'essai

- Placer le béton dans le récipient d'une manière à éliminer autant d'air occlus que possible.
- Introduire le béton en deux couches d'épaisseur approximativement égale qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 25 fois par couche. Afin d'éliminer les bulles d'air occlus mais pas l'air entraîné.
- Nettoyer soigneusement les rebords du récipient et l'ensemble du couvercle.

- Plaquer le couvercle et fixer l'ensemble, s'assurer de la bonne étanchéité sous pression entre le couvercle et le récipient.
- Remplir l'appareillage d'eau et éliminer l'air adhérent aux surfaces intérieures du couvercle. Amener le niveau d'eau à zéro dans le tube vertical en purgeant par le petit robinet.
- A l'aide de la pompe à air, appliquer la pression $P = 1$ bar.

Mesurer la diminution du volume d'air contenu dans l'échantillon de béton en observant la valeur de la baisse du niveau d'eau.

↳ Expression des résultats

Les résultats obtenus sont récapitulés dans l'annexe B, et ils sont schématisés par la courbe suivante :

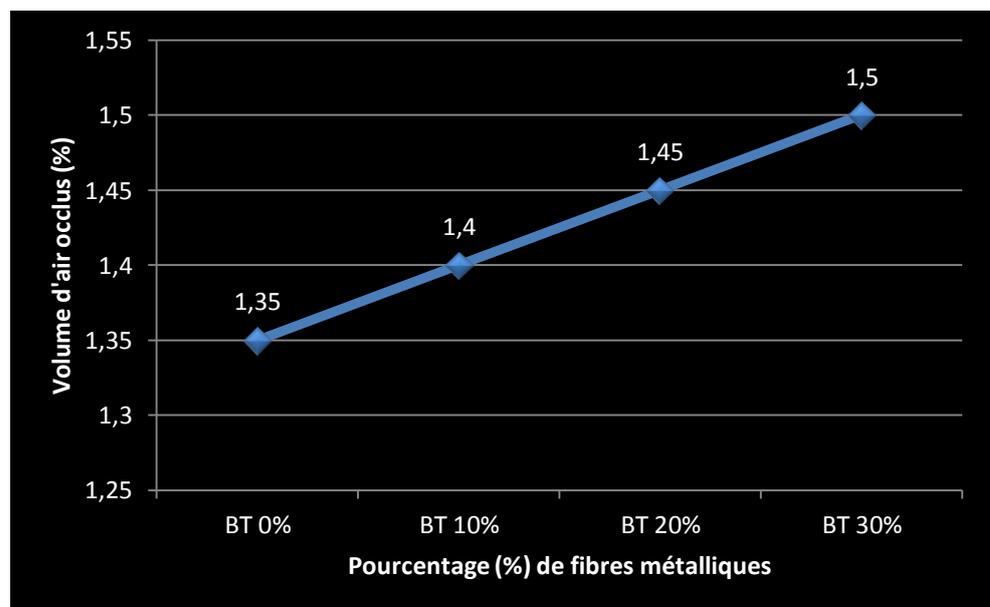


Figure III.9 Evolution du volume d'air entrainé en fonction de différentes série du béton

↳ Interprétation des résultats

Lors de malaxage des bétons, il y a eu création de bulles d'air, et la mise en place du béton forme toujours une certaine quantité d'air occlus.

La quantité de volume d'air augmente en fonction du dosage en fibres métalliques à chaque fois qu'on diminue la quantité du ciment.

Car le ciment est une poudre fine a la propriété d'obturer les vides entre les grains.

↳ Mise en place des bétons

Après avoir effectué l'essai d'affaissement et l'aéromètre, il convient de mettre en place le béton frais dans les moules en trois couches et en vibrant chaque couche à l'aide d'un vibreur pour éliminer les bulles d'air entraînées lors du malaxage. Le béton se trouvant au-dessus du bord supérieur du moule doit être enlevé en arasant les éprouvettes. Ces derniers doivent rester dans le moule 24h et sans subir des chocs. Après démoulage, les éprouvettes doivent être entreposées dans l'eau jusqu'au moment de l'essai.

➤ Mesure des masses volumiques fraîches.

Cet essai consiste à :

- Peser le récipient (cylindre de volume V) à vide, soit M sa masse en Kg.
- Peser le récipient rempli, soit M_t sa masse en Kg.



Figure III.10 Masse fraîche

La masse volumique des bétons frais sont alors :

$$\rho_{bf} = \frac{M_t - M}{V} \quad (\text{Kg/l})$$

Remarque

La valeur de la masse volumique fraîche d'une série de béton est la moyenne de six (06) éprouvettes.

III.5 ESSAIS SUR BETON DURCI

↪ Conservation des bétons

- Les éprouvettes doivent rester dans le moule et être protégées contre les chocs.

- Après démoulage, les éprouvettes doivent être entreposées dans de l'eau jusqu'au moment de l'essai.



Figure III.11 Conservation des éprouvettes

- Les trois premières éprouvettes de chaque série réalisées sont soumises à l'essai de compression le septième (07) jour après conservation dans l'eau.
- Les trois autres éprouvettes seront écrasées au vingt-huitième (28) jour.

➤ **Mesure des masses volumiques**

- On détermine les masses des bétons à l'âge de 0 h, 24 h, 7, 14, 21 et 28 jours et cela pour chaque série d'éprouvettes.

La détermination de la masse volumique est simple :

- On pèse l'éprouvette après nettoyage, soit M sa masse en (kg).
- Puis détermine le volume du récipient, soit V son volume en (m^3).
- La masse volumique sera alors calculée par l'équation suivante :

$$\rho_{BD} = \frac{M}{V} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

↩ **Expression des résultats**

Les résultats obtenus sont récapitulés dans l'annexe C, et ils sont schématisés par les courbes suivantes :

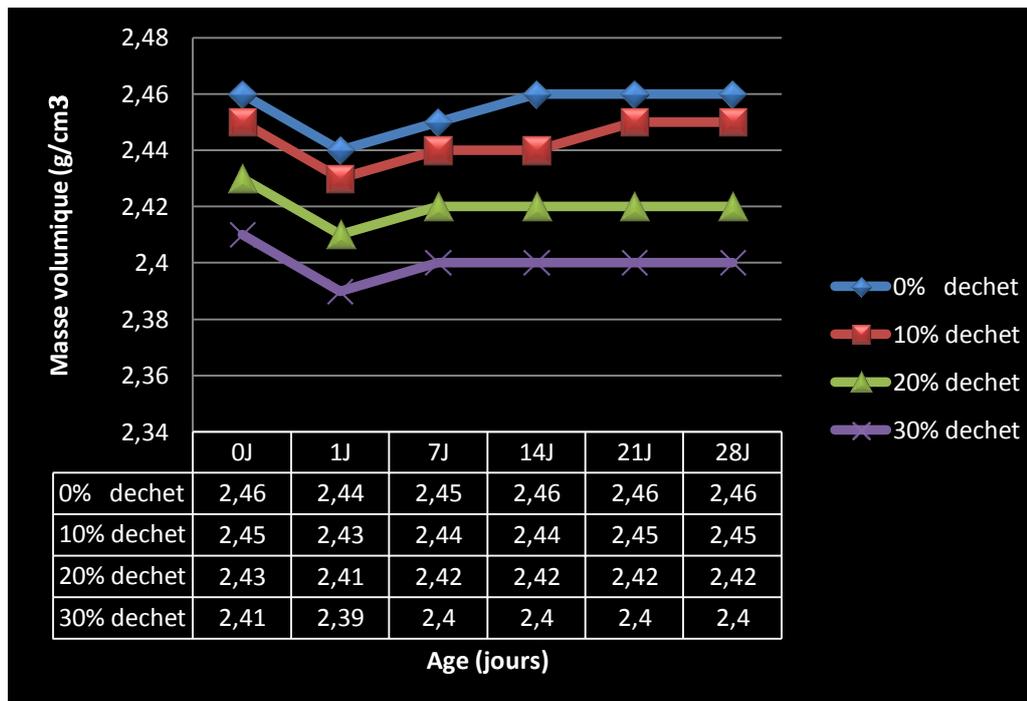


Figure III.12 Evolution des masses volumiques en fonction du temps

↳ Interprétation des résultats

A partir des courbes tracées, nous avons remarqué que :

Entre le jour de confection (0 jour) et 1 jour, on remarque une forte diminution de la masse volumique de tous les bétons et cela revient à l'exposition des éprouvettes à l'air ambiant, ce qui dit le séchage du béton et l'évaporation de l'eau.

A partir du 1^{er} jour jusqu'aux 7^{ème} jours, on observe une augmentation des masses volumiques des bétons, qui s'explique par l'hydratation continue des grains de ciment, sachant que les éprouvettes de bétons ont été conservées dans l'eau (absorption de l'eau).

Nous remarquons qu'à partir du 14^{ème} jour la masse reste constante pour tous les bétons (se stabilises), donc pas d'absorption d'eau (saturation).

L'hydratation qui est de plus en plus lente n'est jamais entièrement achevée, une petite partie de ciment reste non hydratée.

A chaque fois qu'on diminue le ciment en le remplaçant par les fibres métalliques, la masse volumique diminue et cela revient aux masses volumiques (apparente et absolue) des fibres métalliques qui sont plus léger que le ciment.

➤ **Essai de compression (NF P 18 – 406) [24]**

C'est l'essai le plus couramment utilisé sur béton durci. Les résultats de l'essai de résistance à la compression sont affectés par plusieurs paramètres : le type de l'éprouvette et ses dimensions, la préparation des faces d'essai etc.

Actuellement, cet essai est le plus révélateur des décisions à prendre pour juger de la qualité d'un béton durci.

↳ **But de l'essai**

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton, qui peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes.

↳ **Principe de l'essai**

Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

↳ **Equipement nécessaire**

- Une machine d'essai qui est une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester.
- Un moyen pour rectifier les extrémités des éprouvettes : surfaçage au ciment prompt.

↳ **Le surfaçage des éprouvettes**

Conformément à la norme (NF P 18-406), l'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cylindriques dont les extrémités ont été préalablement rectifiées. En effet, La rectification consiste donc à rendre les surfaces de l'éprouvette planes.



Figure III.13 Surfaçage des éprouvettes

↪ Conduite de l'essai

- L'éprouvette, une fois rectifiée elle doit être centrée sur la presse d'essai.
- Appliquer le chargement jusqu'à la rupture de l'éprouvette (figure III.15).
- Soit (S) la section orthogonale de l'éprouvette, la résistance f_{cj} , est exprimée en

MPa et a pour expression $f_{cj} = \frac{P}{S}$ Avec :

P : charge de rupture exprimée en MN.

S : surface de l'éprouvette exprimée en m^2 .



Figure III.14 Presse de compression



Figure III.15 Ruptures des éprouvettes

↳ Expression des résultats

Les résultats obtenus sont récapitulés dans l'annexe C, et ils sont représentés par la courbe suivante (Figure III.16)

- Série 1 pour le septième jour (7j).
- Série 2 pour le vingt-huitième jour (28j).

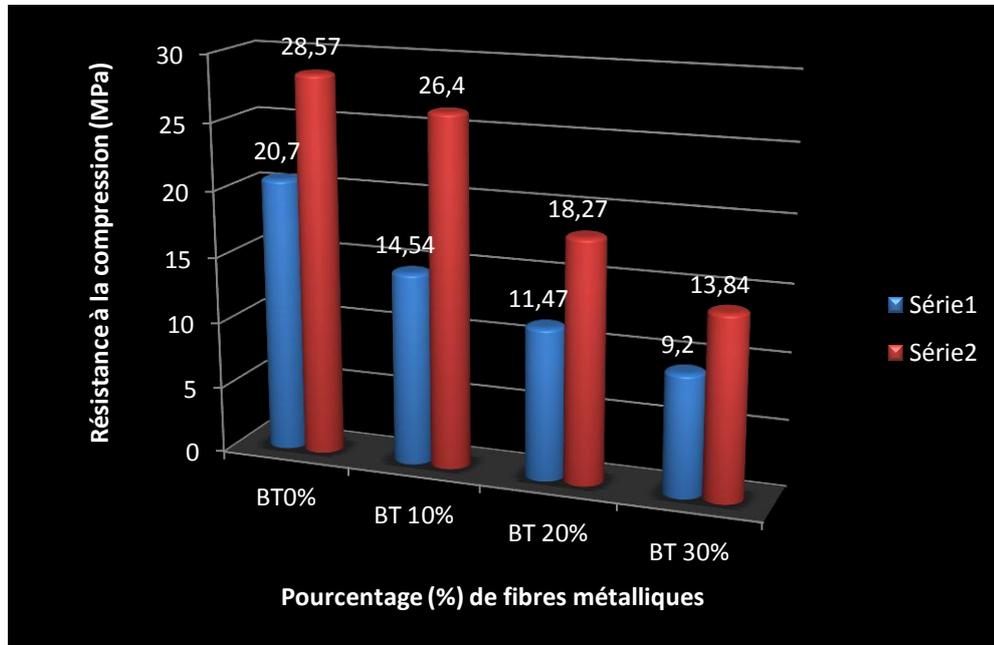


Figure III.16 Résistance à la compression en fonction de différentes séries du béton.

↳ Interprétation des résultats

On remarque que le dosage à 0% de fibres métalliques « Béton Témoin » a donné une meilleure résistance à la compression.

Pour le dosage à 10% de fibres métalliques on remarque une légère diminution de résistance par rapport au béton témoin et cela revient à la quantité de ciment qui est remplacé par les fibres métalliques.

Donc en présence de F.M à grande quantité, la compacité des bétons diminue et qui cause une chute de résistance, et c'est le cas pour les dosages à 20% et 30% de fibres métalliques, d'après le spectre DRX obtenu pour les fibres métalliques on a déterminé la présence de Zn et le Ni qui sont des éléments susceptibles de retarder l'hydratation.

III.6 CALCUL DE LA MASSE VOLUMIQUE SECHE

III.6.1 Calcul de la masse volumique sèche théorique [32] et [33]

Une formule théorique permet d'évaluer la masse volumique sèche du béton et la comparer avec celle calculée.

- La formule est :

$$\rho_{\text{sèche théorique}} = 1.25C + G' \quad (\text{Kg/m}^3) \quad \text{Avec}$$

- G' : masse des granulats sec, en Kg/m^3
- C : masse de ciment en Kg/m^3
- 1.25 : facteur composé de 100% de la teneur en ciment + le ciment qui lie chimiquement une quantité de 25%.

Sachant que les masses des granulats G' des différents compositions de béton sont données par le tableau 3, béton d'ENOF BOUANDAS.

Rappelons que la masse « G' » contenue dans 1 m^3 de béton, pour les compositions de béton d'ENOF BOUANDAS est $G' = 1861.56 \text{ Kg/m}^3$

Le poids de ciment est $C = 350 \text{ Kg/m}^3$

$$\rho_{\text{sèche théorique}} = 1.25(350) + 1861.56 = 2299.06 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{sèche théorique}} = 2.290 \text{ g/cm}^3$$

III.6.2 Calcul de la masse volumique sèche au 28^{ème} jour

Pour calculer la masse volumique sèche, on suit les étapes suivantes :

- Après l'essai destructif des éprouvettes, un échantillon de béton est immédiatement récupéré.
- On prend le poids de l'échantillon.
- On étuve ce dernier à $105 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 24h.
- Après séchage, et refroidissement, on prend son poids.
- Connaissons la masse d'une éprouvette à 28 jours, et son volume (6434 cm^3), et aussi les masses calculées précédemment (avant et après étuvage), il suffit de

procèdes à la règle de trois ;afin de déduire la masse de l'éprouvette ''M'' à l'état sec .

- On calcul, enfin la masse volumique sèche : $\rho_{\text{sèche}} = M/6434 \quad (\text{g/cm}^3)$

Exemple de calcul :

♦ **Béton à 0% de fibres métalliques**

- La masse moyenne des éprouvettes à 28 jours est égale à 15817g (voir tableau III.3)
- La masse de l'échantillon récupéré (après écrasement) est égale à 620.7g
- La masse de l'échantillon après étuvage est égale à 586g
- On peut donc, déduire la masse de l'éprouvette après étuvage. Soit ''M'' sa masse.

Avant étuvage :

Après étuvage :

620,70g.....586g

15817g.....M= ?

$$M=14933g \Rightarrow \rho_{\text{sèche calculée}} = 2.322 \text{ g/cm}^3.$$

Tableau III.3 Valeurs des masses volumique calculées des différents Bétons étudiés.

| N° de série | Méch avant séchage (g) | Méch après séchage (g) | Masse de l'éprouvette avant séchage (g) | Masse de l'éprouvette après séchage (g) | $\rho_{\text{sèche}} (\text{g/cm}^3)$ |
|---------------|------------------------|------------------------|---|---|---------------------------------------|
| BT 00% | 620.70 | 586.00 | 15817 | 14933 | 2.322 |
| BT 10% | 395.50 | 371.40 | 15796 | 14833 | 2.306 |
| BT 20% | 346.90 | 321.30 | 15580 | 14430 | 2.244 |
| BT 30% | 299.80 | 279.23 | 15461 | 14400 | 2.239 |

↳ **Interprétation des résultats**

On constate que les masses volumiques calculées au 28^{ème} jour sont presque égales à celles théoriques ; ce qui nous renseigne sur l'homogénéité du béton.

III.7 METHODES PHYSIQUES DE CARACTERISATION DES MATERIAUX

III.7.1 Préparation mécanique

Après une période de (28 jours), les échantillons sont préparé en vue de la réalisation des tests de caractérisation physico-chimique et de test de lixiviation des matériaux sur poudre (<100µm).

III.7.1.1 Préparation de la poudre à analyser

Les matériaux granulaires sont obtenues par broyage à sec jusqu'à une granulométrie inférieure à 100µm.

◆ Echantillonnage

Avant de procéder à une analyse quelconque d'un échantillon solide, nous lui faisons subir un traitement mécanique qui est la phase la plus délicate pour préparer un échantillon représentatif. Pour atteindre ce but, nous appliquons les opérations suivantes :

◆ Concassage

Cette opération sert à réduire les dimensions de la matière première à une granularité de l'ordre de quelques millimètres.

Pour cela, nous avons utilisés un concasseur à mâchoires. Dans notre cas le concassage concerne la boue (déchet) à un calibre de 2mm.

◆ Broyage

C'est une opération qui consiste à réduire les dimensions des grains de la matière première à une granularité assez fine, atteignant quelques micromètres. L'opération de broyage est réalisée manuellement.

III.7.1.2 Tamisage

Le tamisage consiste à répartir les grains d'un échantillon brut à travers une série de tamis de norme AFNOR (4.0, 2.0, 1.0, 0.5, 0.25, 0.125, 0.09, 0.063, 0.045 mm) de plus en plus de petites ouvertures allant de 4mm jusqu'à 45µm. ces ouvertures sont formées par des mailles carrées faites dans des toiles métalliques (cas de tamisage par voie sèche).

III.7.1.3 Homogénéisation

C'est un procédé mécanique qui consiste à mélanger l'échantillon de manière à le rendre homogène.

III.7.1.4 Quartage

La matière finement broyée est mise en forme d'un cercle partagé en quatre parties égales, dont nous prenons les deux parties opposées. C'est une opération de réduction de poids de l'échantillon souhaité pour l'analyse. Sa réalisation, nécessite application de la loi de Richards donnée par la relation suivante :

$$Q \geq Kd^2.$$

Q : poids de l'échantillon.

K : coefficient de la préparation de la minéralisation, il dépend de la nature de l'échantillon. Mais en général nous prenons $K \geq 0,1$ pour un échantillon hétérogène.

d : diamètre de plus gros grain.

III.7.1.5 Représentativité de l'échantillon

Soit : la représentativité d'un échantillon est déterminée par la loi de Richards [34]:

$$Q = p.$$

$$Kd^2 = p'.$$

$Q \geq Kd^2 \Rightarrow p \geq p'$ la loi de Richards est vérifiée donc l'échantillon est représentatif.

III.7.1.6 Réduction sans broyage

$$Q \geq Kd^2 \Rightarrow m \leq Q / Kd^2 \text{ et } m = 2^n \Rightarrow \ln m = n \ln 2 \Rightarrow n = \ln m / \ln 2.$$

n : le nombre de quartage qui vérifie $(m=2^n) \leq Q / Kd^2$.

La quantité initiale d'échantillon, Q_i dépend du coefficient K de répartition minérale caractéristique de l'hétérogénéité du déchet, du diamètre du plus gros grain de l'échantillon, la quantité de l'échantillon m_i à utiliser doit être toujours inférieure au rapport maximal Q / Kd^2 . de cette relation, nous tirons la valeur du nombre de quartage maximal n à réaliser pour trouver la quantité minimale qui est la plus représentative de l'échantillon destinée aux analyses physico-chimiques. La **figure III. 17** représente l'exemple de traitement des échantillons d'une masse initiale 4295 g et de diamètre de 2 mm [35].

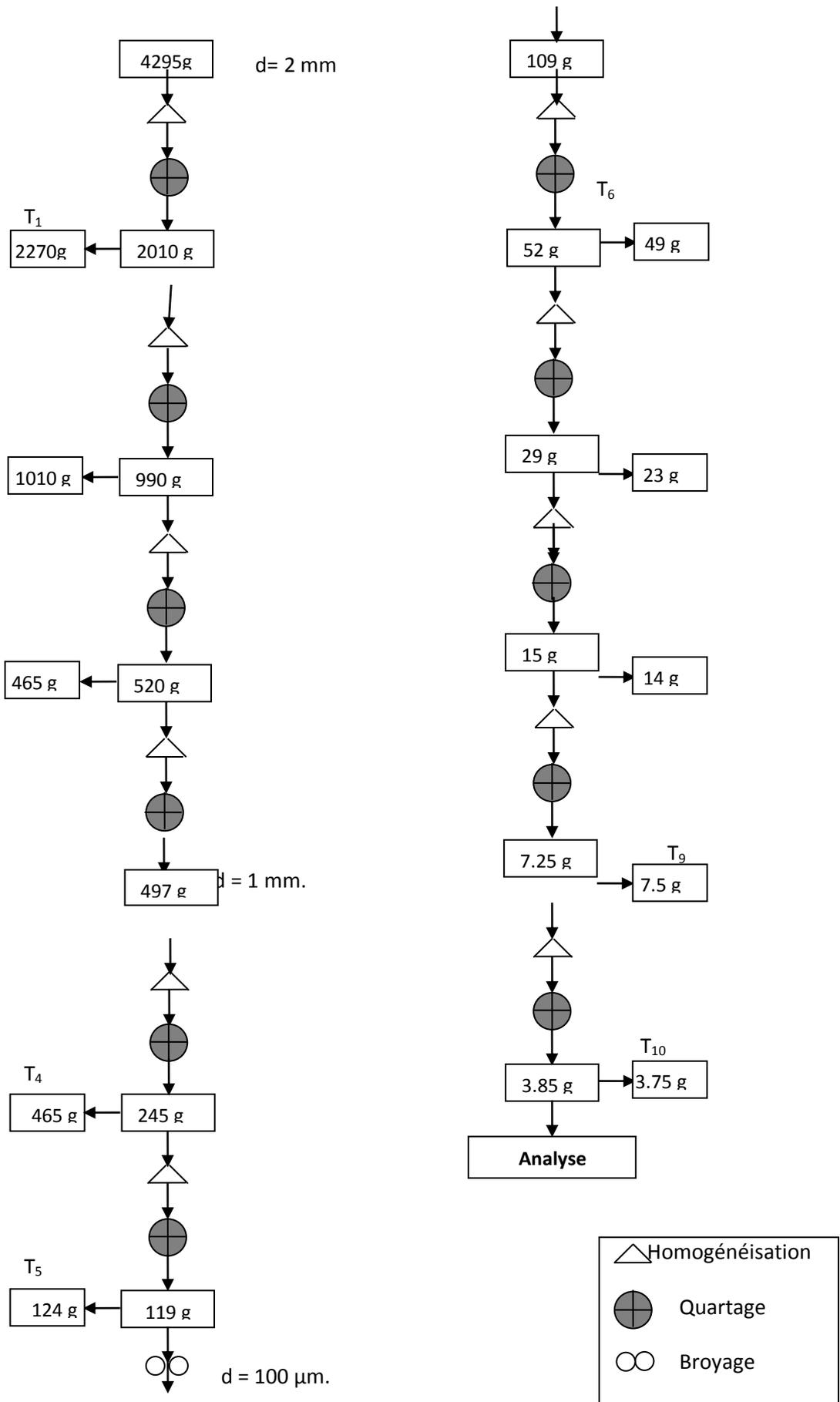


Figure III.17 Exemple de préparation mécanique.

III.7.2 METHODES DE CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUES DES MATERIAUX

III.7.2.1 caractérisation des matériaux par des rayons X (DRX) [28]

Les figures III.18, III.19, III.20, III.21 présentent les spectres de diffractomètre aux rayons x des échantillons, broyés et passés aux tamis de 100 μm .

Nous constatons que tous les spectres obtenus présentent une série de pic de diffraction bien définis qui correspondent à des phases solides majoritairement bien cristallisées, et un bruit de fond (phase amorphe) dont la forme indique la présence des phases males cristallisées. Les échantillons sont majoritairement composés de la portlandite, des silicates de calcium et de la silice. L'attribution des pics restants est délicate car ils sont de faibles intensités et les phases sont parfois présentées en faibles proportions.

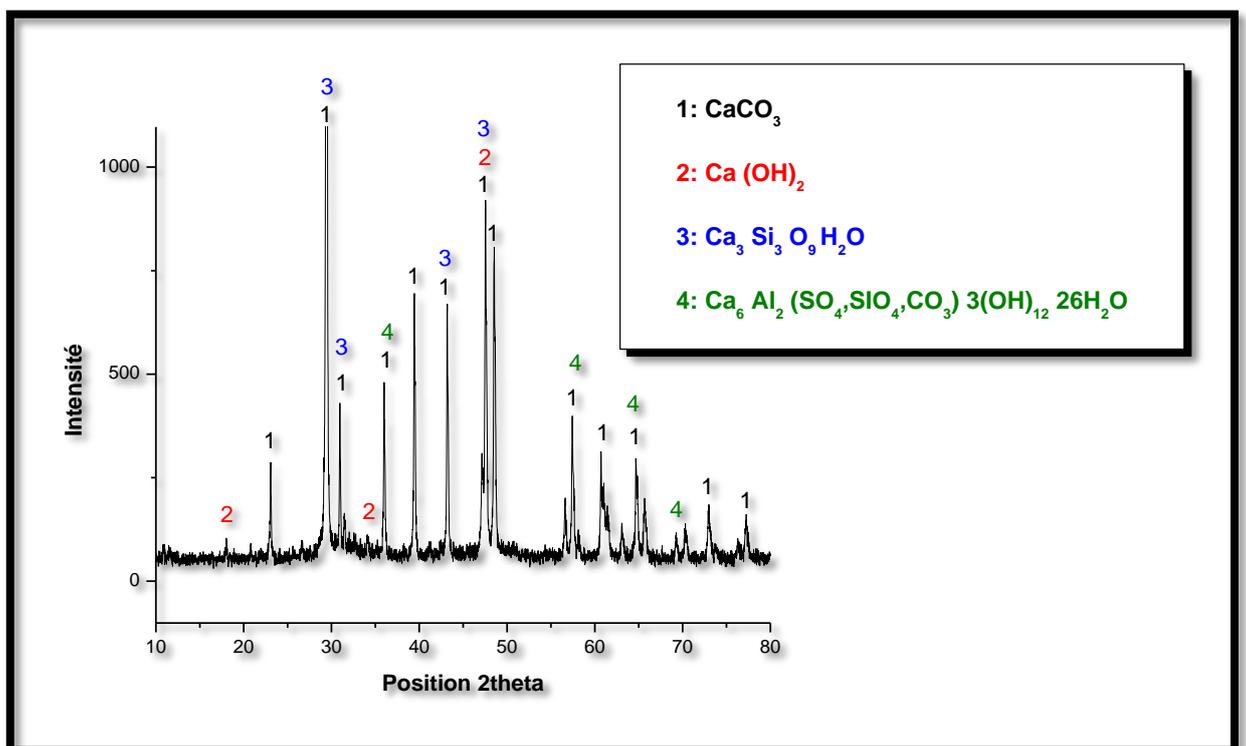


Figure III.18 Spectre obtenu par DRX pour le béton 00%

Le spectre DRX obtenu pour le béton 00% indique l'existence de la calcite de la portlandite de l'Ettringite et du silicate de calcium hydraté (C-S-H) sont détectés à des valeurs d'angles de diffraction différentes :

- CaSO_3 à $2\theta = 23.070^\circ, 29.430^\circ, 31.544^\circ, 35.984^\circ, 39.428^\circ, 47.537^\circ, 48.517^\circ, 57.436^\circ, 60.705^\circ, 64.677^\circ, 73.945^\circ$ et 77.216° .
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à $2\theta = 18.051^\circ, 34.123^\circ, 47.120^\circ$.
- C-S-H à $2\theta = 29.430^\circ, 30.954^\circ, 43.183^\circ$ et $47,122^\circ$.
- $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ à $2\theta = 35.984^\circ, 57.436^\circ, 64.678^\circ, 69.241^\circ$.

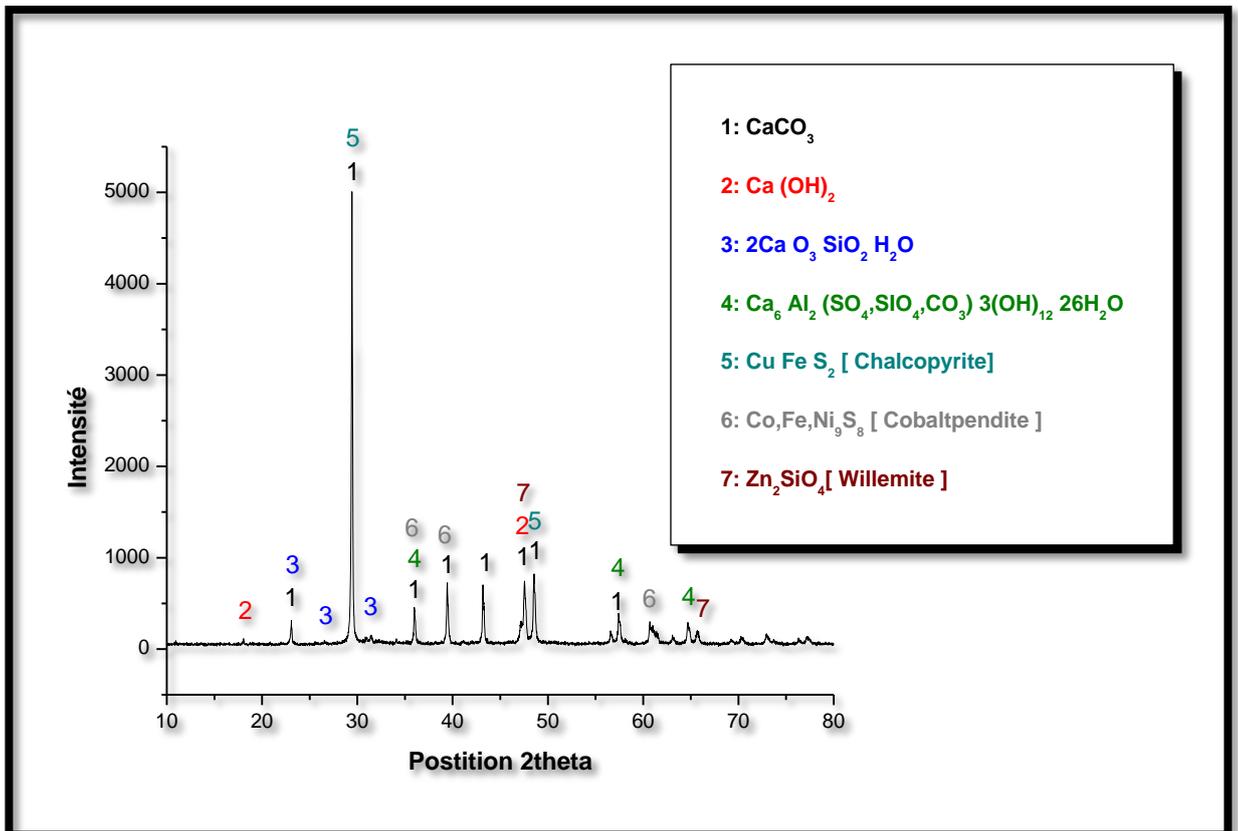


Figure III.19 Spectre obtenu par DRX pour le béton 10% avant lixiviation.

Le spectre DRX obtenu pour le béton 10% indique l'existence de la calcite de la portlandite de l'Ettringite et du silicate de calcium hydraté (C-S-H) sont détectés à des valeurs d'angles de diffraction différentes :

- CaSO_3 à $2\theta = 23.091^\circ, 29.423^\circ, 35.985^\circ, 39.427^\circ, 43.176^\circ, 47.117^\circ$ et 57.396° ,
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à $2\theta = 18.067^\circ, 47.115^\circ$.
- C-S-H à $2\theta = 23.092^\circ, 26.544^\circ$ et 31.440° .
- $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ à $2\theta = 35.984^\circ, 57.398^\circ$ et 64.665° .

Ainsi que des métaux lourds suivants :

- Cuivre : Cu Fe S_2 à $2\Theta = 29,426^\circ$ et 48.541° .
- Nickel: $(\text{Co, Fe, Ni})_9\text{S}_8$ à $2\Theta = 35.983^\circ, 39.427^\circ$ et 60.694° .
- Zinc: Zn_2SiO_4 à $2\Theta = 47.117^\circ$ et 65.672° .

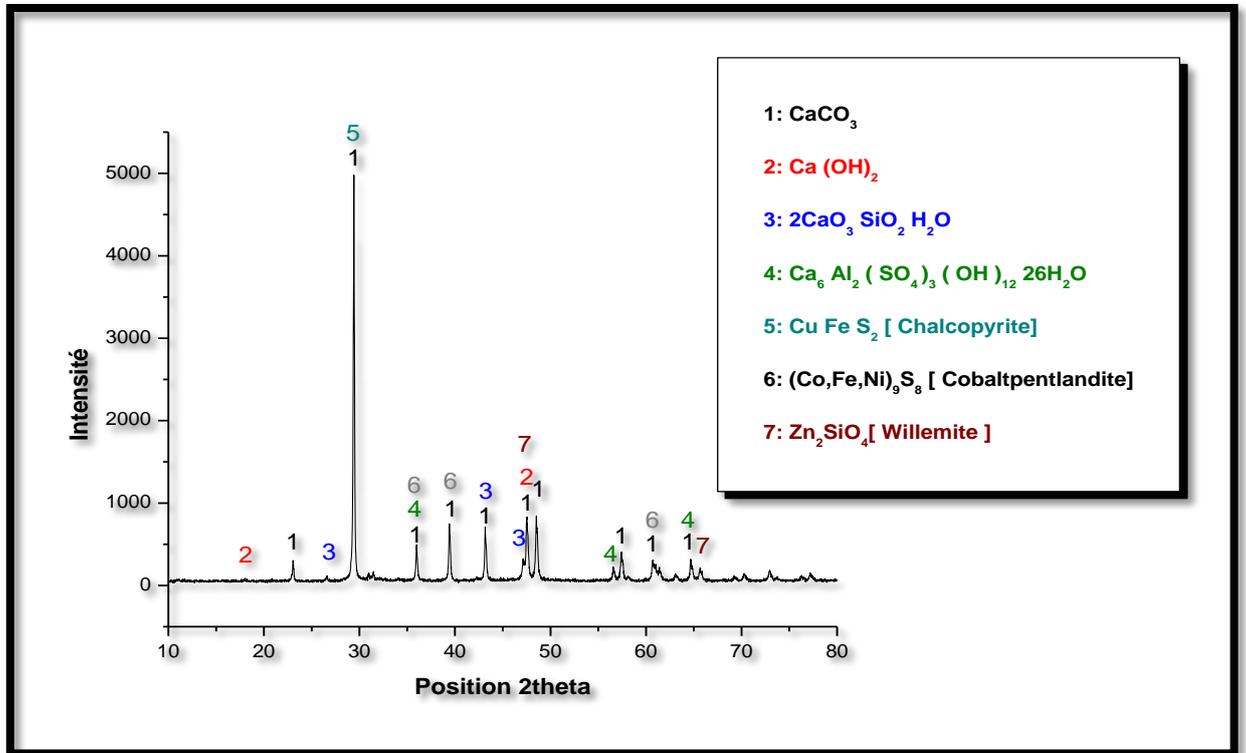


Figure III.20 Spectre obtenu par DRX pour le béton 20%

Le spectre DRX obtenu pour le béton 20% indique l'existence de la calcite de la portlandite de l'Ettringite et du silicate de calcium hydraté (C-S-H) sont détectés à des valeurs d'angles de diffraction différentes :

- CaSO_3 à $2\Theta = 23.038^\circ, 29.409^\circ, 35.991^\circ, 39.406^\circ, 43,156^\circ, 47.505^\circ, 48.510^\circ, 57.392^\circ, 61.388^\circ$ et 64.684° .
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à $2\Theta = 18.036^\circ, 47.113^\circ$.
- C-S-H à $2\Theta = 26.578^\circ, 43.154^\circ$ et $46,512^\circ$.
- $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ à $2\Theta = 35.963^\circ, 56.585^\circ, 57.393^\circ, 64.214^\circ$.

Ainsi que des métaux lourds suivants :

- Cuivre : Cu Fe S_2 à $2\Theta = 29,406^\circ$.
- Nickel: $(\text{Co, Fe, Ni})_9\text{S}_8$ à $2\Theta = 35.965^\circ, 39.408^\circ$ et 60.702° .
- Zinc: Zn_2SiO_4 à $2\Theta = 47.112^\circ$ et 65.634° .

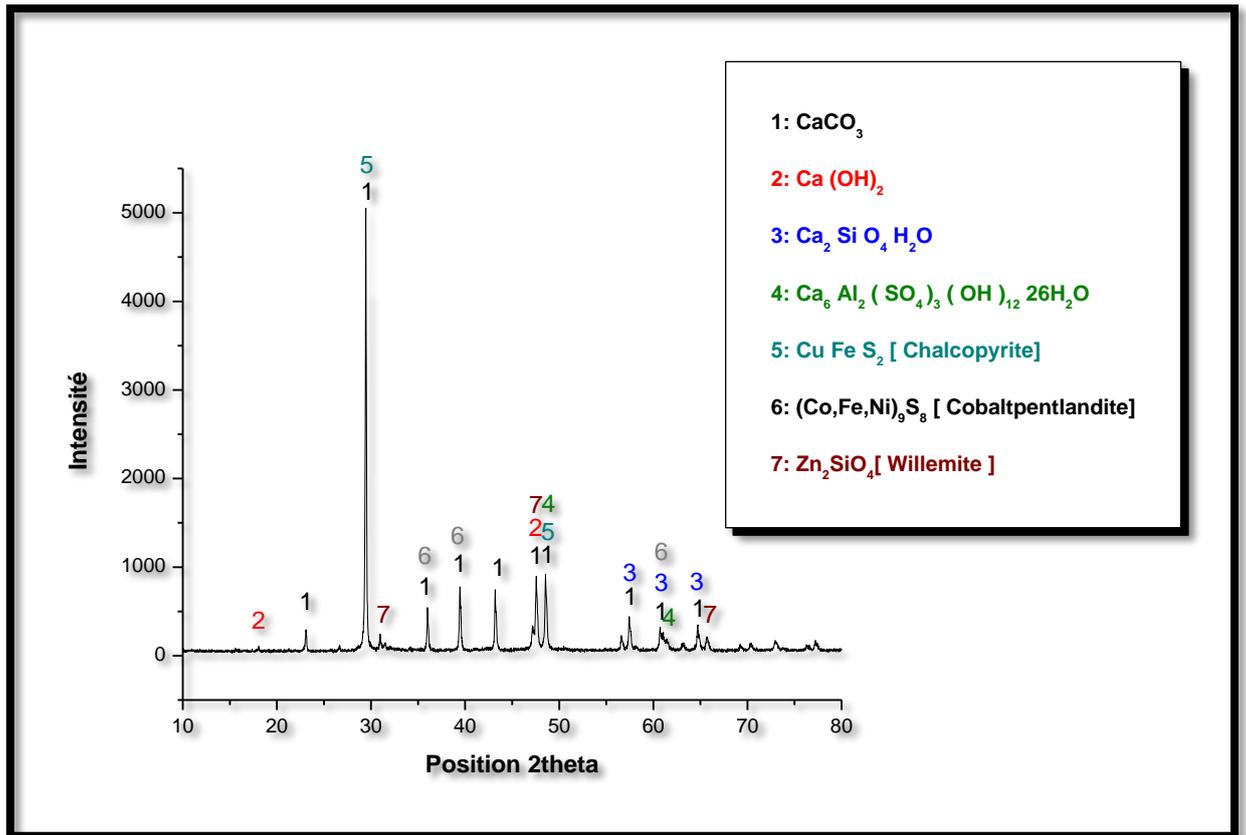


Figure III.21 Spectre obtenu par DRX pour le béton 30%

Le spectre DRX obtenu pour le béton 30% indique l'existence de la calcite de la portlandite de l'Ettringite et du silicate de calcium hydraté (C-S-H) sont détectés à des valeurs d'angles de diffraction différentes :

- CaSO_3 à $2\Theta = 23.096^\circ, 29.439^\circ, 36.002^\circ, 39.452^\circ, 43.190^\circ, 47.551^\circ, 48.538^\circ, 57.436^\circ, 60.707^\circ$ et 64.704° .
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à $2\Theta = 18.073^\circ, 47.141^\circ$.
- C-S-H à $2\Theta = 57.439^\circ, 61.505^\circ, 64.703^\circ$.
- $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ à $2\Theta = 48,537^\circ, 61.510^\circ$.

Ainsi que des métaux lourds suivants :

- Cuivre : Cu Fe S_2 à $2\Theta = 29,440^\circ$.
- Nickel: $(\text{Co, Fe, Ni})_9\text{S}_8$ à $2\Theta = 36.006^\circ, 39.451^\circ$ et 60.707° .
- Zinc: Zn_2SiO_4 à $2\Theta = 31,510^\circ, 47.143^\circ, 65.681^\circ$.

III.7.2.2 Test de lixiviation TCLP (Toxicité characteristic leaching procédure)

◆ Généralité

L'agence de protection de l'environnement des Etats unis à identifier 40 produits chimiques toxiques. Pour déterminer le potentiel des pertes spécifiques de ces produits chimique dans les déchets et dans les eaux souterraines, l'agence de protection de l'environnement a développé un procède de lixiviation sous le nom de TCLP. Il est employé pour évalue et estimer la quantité de contenu toxiques déchargé dans l'environnement et la quantité d'un produit chimique particulier libérée dans des conditions d'essais dépasse des limite de la normalisation. [36]

La lixiviation ou la percolation d'un matériau peut se produire sur le terrain, par exposition du matériau à l'infiltration naturelle ou aux précipitations ou au laboratoire par la mise en œuvre de test TCLP. [37]

Le procédé de lixiviation (TCLP), est employé par l'agence de protection environnemental des Etats unis pour déterminer la mobilité des produits organiques et inorganiques (40 constituant) dans le liquide, le solide et les pertes multiphasiques.

◆ Principe

Le principe des tests de lixiviation est de déterminer les phénomènes de fixation des contaminants et de comprendre les mécanismes de relargage. Le principal agent susceptible de véhiculer les éléments toxiques vers l'environnement est l'eau.

Sont des tests caractéristiques du comportement à lixiviation de déchet.

Ces tests sont effectués un déchet sous forme d'une boue. Le test TCLP vise à caractériser le comportement du déchet en cours du temps, nous mettons en contact le déchet avec solution de lixiviation de volume fixe.

◆ Objectif

Le but de TCLP est de simuler la mobilité des substances dans des conditions très particulières dans un déchet.

◆ Facteurs influençant sur l'application de la TCLP

De nombreux facteurs influencent sur l'application de la TCLP et sur la vitesse de lixiviation des éléments contenus dans une matrice solides. Ces facteurs peuvent être regroupés en facteurs physiques et chimiques :

◆ Facteurs physiques

Les facteurs physiques qui influencent la TCLP ou la lixiviation incluent :

- La taille des particules, qui conditionne les surfaces des matériaux exposés.
- L'homogénéité ou l'hétérogénéité de la matrice solide en termes de phase minéral.
- L'échelle de temps visée (18heures).
- Le début de lixiviation.
- La température.

◆ **Facteurs chimiques**

Les facteurs chimiques susceptibles d'influencer la TCLP qui favorise le relargage sont :

- Le contrôle par l'équilibre thermodynamique ou par la cinétique chimique.
- Le potentiel lixiviable des constituants.
- Le pH du matériau ou le pH imposé par l'environnement.
- La composition des composés inorganiques ou organiques.
- Les conditions d'oxydo-réduction.
- Les processus de désorption. [38]

◆ **Mode opératoire**

Nous avons préparé une solution qui contient : 64.3 ml de la Soude 1N, 5.7 ml de l'Acide Acétique et nous ajustons le volume jusqu'à 1L avec l'eau distillée de façon d'avoir un pH = 4.93, ensuite nous introduisons le déchet d'une taille >2mm dans la solution en assurant le rapport L/S = 20, le récipient est soigneusement fermé pour éviter au maximum l'admission d'air et l'évaporation des solutions et agités pendant 18h et nous avons fait un prélèvement qu'il faut pour mesurer les paramètres physico-chimiques et déterminer la composition. Nous filtrons la solution et nous l'acidifions à un pH = 2 avec l'Acide Nitrique 68% pour l'analyse des cations. Les flacons sont mis à l'abri à une température ambiante [39].

◆ **Séchage et broyage de l'échantillon solide**

L'échantillon solide doit être broyé, si nécessaire, avant d'effectuer la lixiviation. La grosseur des particules du solide dépend du type de lixiviation à effectuer. La grosseur maximale est de 9,5mm.

Si l'échantillon possède des particules plus grosses ou s'il est de forme monolithique, broyer ou couper de façon à ce que tout le solide passe à travers un tamis de 9,5 mm

✦ **Détermination de la solution de lixiviation pour l'échantillon solide (pré-test pour l'évaluation de la mobilité des espèces inorganiques seulement)**

Peser 5 g d'échantillon non séché dans un bécher (broyer si nécessaire l'échantillon solide afin d'obtenir une granulométrie inférieure à 5 mm).

Ajouter 96,5 ml d'eau dans le bécher. Couvrir avec un verre de montre et agiter vigoureusement avec un barreau aimanté pendant 5 minutes. Ajouter 3,5 ml de la solution d'acide chlorhydrique 1 N et mélanger légèrement. Placer un verre de montre et chauffer à $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 10 minutes en agitant. Retirer le bécher de la plaque chauffante.

Attendre une heure pour laisser refroidir la solution. Homogénéiser l'échantillon et mesurer le pH tout en agitant légèrement.

Remarque

- Le pH de l'échantillon peut varier en fonction du temps. Il est donc important de respecter le temps recommandé entre le moment où le bécher est retiré de la plaque et la mesure du pH.
- Si le pH est inférieur à 5,0, utiliser la solution de lixiviation numéro 1 (numéro=1 si le $\text{pH}=4,93\pm 0,05$).
- Si le pH est supérieur ou égal à 5,0, utiliser la solution de lixiviation numéro 2 (numéro=2 si le $\text{pH}=2,88\pm 0,05$).

✦ **Lixiviation pour l'évaluation de la mobilité des espèces inorganiques (TCLP)**

Les échantillons solides sont lixiviés avec la solution de lixiviation appropriée dans un rapport solide-liquide de 1 : 20.

✦ **Remarque**

- L'échantillon ne doit pas être séché. Si l'échantillon ne contient qu'une seule phase solide, il est considéré comme 100 % solide.

Dans un bécher, peser 20 g d'échantillon solide préalablement broyé, si nécessaire, à 9,5 mm et ajouter 400 ml de la solution de lixiviation appropriée et le laissé agiter pendant 18 heures \pm 2 heures.

✦ **Remarque**

- Si l'échantillon ne semble pas homogène, utiliser un poids d'échantillon et de tampon plus grand, par exemple 40 g de solide et 800 ml de tampon.

Couvrir le bécher avec le parafilm et placer sur l'appareil de lixiviation pendant 18 heures \pm 2 heures avec une vitesse de rotation de 30 ± 2 tours/minute.

✦ **Remarque**

Certains échantillons contenant des carbonates peuvent dégager du gaz durant la lixiviation. Il est souhaitable de s'assurer l'absence de gaz dans la bouteille, après une heure en ouvrant le parafilm sous une hotte.

- Après la lixiviation, laissé décanter le solide pour faciliter la filtration.
- Filtrer sur un filtre ayant une porosité de 0,45 μm .
- Mesurer le pH après la lixiviation.
- Si les analyses ne sont pas faites durant la journée, préserver l'échantillon selon les paramètres demandés (acide nitrique pour les métaux, acide sulfurique pour les huiles et graisses et aucun préservatif pour les nitrites, les nitrates et les fluorures).

➤ **Les résultats obtenus après lixiviation du béton 10%**

Tableau III.04 Lixiviation du béton 10% à l'eau déminéralisée pendant 18h.

| Echantillon | pH | Conductivité (ms) | Température (°C) |
|--------------------|--------------|--------------------------|-------------------------|
| BT 10% | 12.85 | 5.05 | 23.00 |

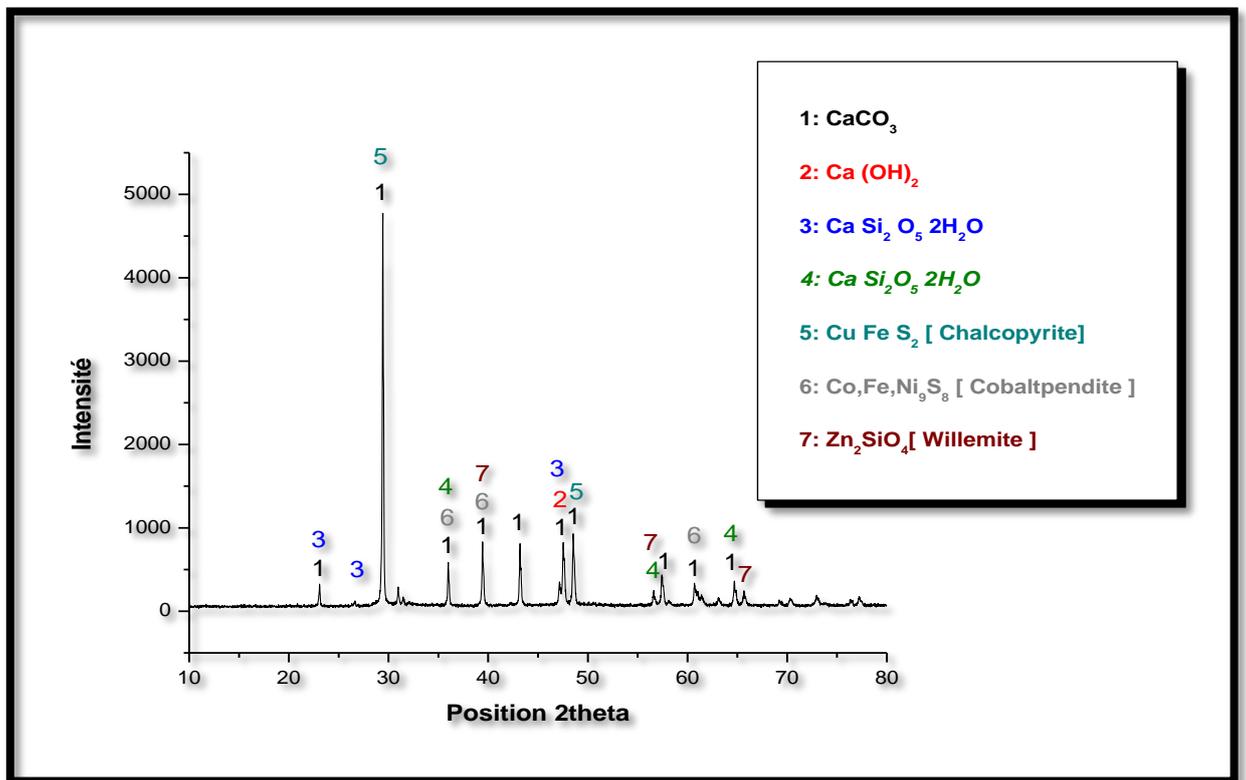


Figure III.22 Spectre obtenu par DRX pour le béton 10% après lixiviation.

Le spectre DRX obtenu pour le béton 10% après lixiviation indique l'existence de la calcite de la portlandite de l'Ettringite et du silicate de calcium hydraté (C-S-H) sont détectés à des valeurs d'angles de diffraction différentes :

- ♦ CaSO_3 à $2\Theta = 23.087^\circ, 29.429^\circ, 35.993^\circ, 39.430^\circ, 43.185^\circ, 47.148^\circ$ et $48.527^\circ, 57.404^\circ, 60.672^\circ, 64.697^\circ$.
- ♦ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à $2\Theta = 47.150^\circ$.
- ♦ C-S-H à $2\Theta = 23.086^\circ, 26.658^\circ$ et 47.526° .
- ♦ $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ à $2\Theta = 35.922^\circ, 56.595^\circ$ et 64.697° .

Ainsi que des métaux lourds suivants :

- ♦ Cuivre : Cu Fe S_2 à $2\Theta = 29,426^\circ$ et 48.526° .
- ♦ Nickel: $(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ à $2\Theta = 35.992^\circ, 39.432^\circ$ et 60.672° .
- ♦ Zinc: Zn_2SiO_4 à $2\Theta = 39.430^\circ, 56,604^\circ, 65,660^\circ$.

◆ Comparaison

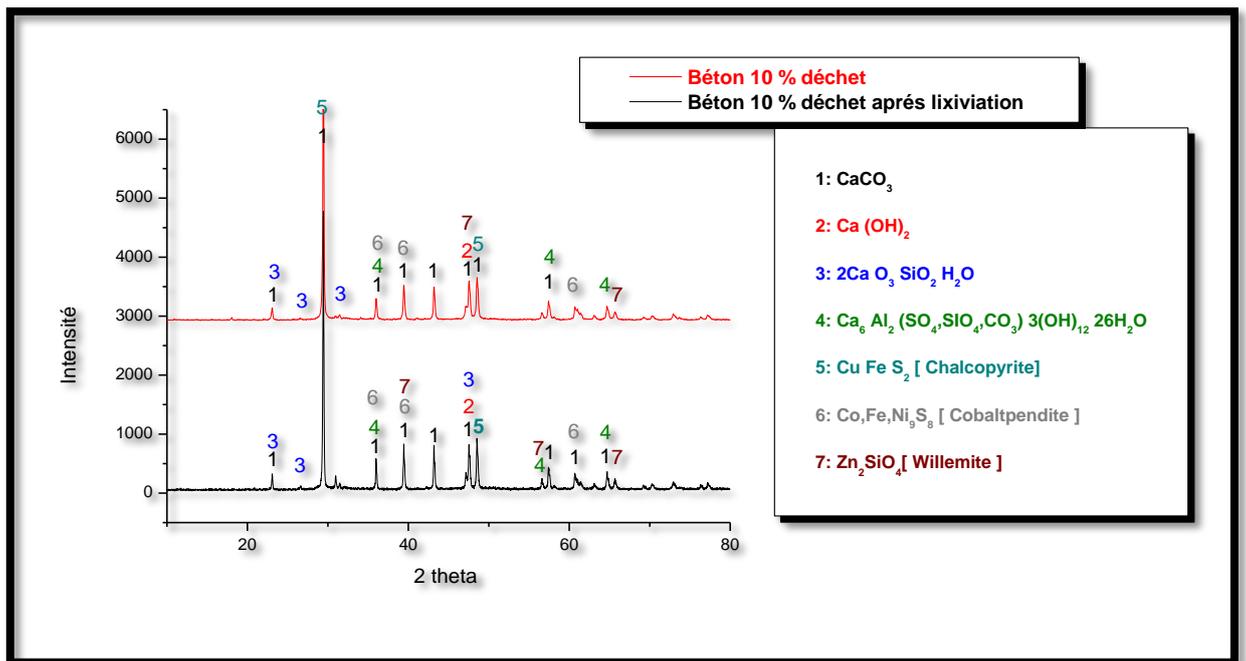


Figure III.23 Spectre obtenu par DRX pour le béton 10% avant et après lixiviation.

Les diffractogrammes illustrés sur la Figure III.25 présente l'analyse par DRX de la partie du béton 10% avant et après lixiviation.

La comparaison des intensités des pics de diffractogrammes avant et après lixiviation montre d'une part concordance entre les intensités des pics et d'autre part une diminution importante dans les intensités des pics.

III.7.2.3 Dosage Des Chlorures

◆ Principe

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent [40] (2009+2010). Pour réaliser ce dosage on a utilisé les solutions suivantes :

Solution de chromate de potassium (K_2CrO_4) à 10% comme indicateur coloré ; Chromate de Potassium (10g) et Eau distillé (100ml), et solution de nitrate d'argent (AgNO_3) de 0,01N pour le titrage ; Nitrate d'argent (0.4247g) et Eau distillé (250ml).

◆ Mode opératoire

A 20 ml de l'échantillon, On ajoute 1ml d'indicateur coloré (K_2CrO_4) à l'aide d'une pipette, après on titre progressivement par nitrate d'argent ($AgNO_3$) jusqu'au changement de couleur. Le mécanisme réactionnel de cette opération et de la forme suivante :



La formule suivante est utilisée pour obtenir la concentration du chlorure

$$[Cl^-] = \frac{(N * V)_{AgNO_3} * 35.5 * 1000}{V_{\text{échant}}}$$

Avec

N_{AgNO_3} : normalité de $AgNO_3 = 0,01N$.

V_{AgNO_3} ; Volume de $AgNO_3$.

$V_{\text{échant}}$: Volume d'échantillon ($V_{\text{échant}} = 20ml$); masse atomique de (Cl) égale à 35,5 g/mol.

$$[Cl^-] = \frac{(0.1 * 0.3) * 35.5 * 1000}{20}$$

$$[Cl^-] = 53.25 \text{ mol/l} * 20 = 1065 \text{ mg/kg}$$

III.7.2.4 Analyse par Infrarouge (IR)

◆ Définition

La technique Infrarouge (IR) vient compléter l'analyse par diffraction des rayons X dans l'étude des matériaux mal cristallisés. Cette méthode d'analyse est non destructive pour l'échantillon. Le rayonnement infrarouge (IR) fut découvert par Frédéric Wilhem Herschel en 1800. La première hypothèse sur l'existence d'une relation entre le spectre IR et la structure chimique appartient à Abney et Festing qui, en 1881, ont montré que les différents groupes fonctionnels se caractérisent par des bandes en infrarouge, de

sorte que l'apparition de certaines bandes dans le spectre correspond nécessairement à la présence de certains groupes fonctionnels dans la molécule.

La spectroscopie infrarouge est une technique d'analyse exploitée surtout dans l'identification des groupements fonctionnels présents dans une molécule organique.

Lorsqu'une radiation infrarouge traverse une molécule, nous constatons pour certaines longueurs d'onde une absorption sélective de la lumière correspondant aux fréquences de vibrations et de rotation caractéristique des différentes liaisons chimiques. Le spectre d'absorption infrarouge d'un composé est donc constitué d'un certain nombre de bandes dont l'identification fournit des renseignements précis sur la structure de ce produit.

◆ **Domaine de l'infrarouge**

Un spectre IR se divise approximativement en deux parties :

Région comprise entre 4000 cm^{-1} et 1800 cm^{-1} facile à interpréter, cette région représente le domaine des vibrations de valences caractéristiques des fonctions principales.

Région située entre 1500 cm^{-1} et 600 cm^{-1} complexe appelée zone des empreintes digitales, utilisée le plus souvent pour des comparaisons des spectres des produits avec des témoins.

◆ **Intérêt d'un spectre Infrarouge (IR)**

L'intérêt principal d'une étude d'une molécule organique par IR est :

L'analyse qualitative : Les spectres infrarouges peuvent identifier des substances pures, ou détecter et identifier des impuretés, le spectre d'absorption IR d'un composé pur consiste en une sorte d'empreinte digitale de ce corps ainsi pour identifier une substance pure, il suffit d'établir son spectre IR et de le comparer à ceux des divers composés possibles.

L'analyse quantitative : Pour calculer la concentration de la substance à analyser ou à étudier, nous utilisons la loi de BEER LAMBERT. L

$$\text{Log } I^0/I = \xi \cdot C \cdot L$$

Avec: I^0/I : L'absorbance.

L : L'épaisseur de la cellule à échantillon (cm).

ξ : Coefficient d'extinction ($\text{mole}^{-1} \cdot \text{L} \cdot \text{cm}^{-1}$).

D'après la loi de BEER LAMBERT, nous constatons que l'intensité du pic est proportionnelle à la concentration de la substance à étudier c'est-à-dire, plus la concentration est grande plus l'intensité du pic augmente, plus la concentration est faible plus l'intensité de pic diminue.

✦ **préparation des échantillons**

Nous préparons une poudre (concentration entre 3 à 5% de déchet) en broyant finement le produit solide avec le Bromure de Potassium KBr, préalablement étuvé à $102 \pm 03^\circ\text{C}$. La poudre est ensuite placée dans un moule qui est inséré dans une presse avec laquelle le produit est comprimé en forme de pastille, sous une pression de 10 tonnes pendant 03 mn.

✦ **Le principe fonctionnel**

Le principe fonctionnel est commun aux deux types de spectrométries :

Une source de lumière IR émet un rayonnement qui est affaibli en fonction des fréquences qui traverse l'échantillon.

Le rayonnement résultant est enregistré et transformé électroniquement en un spectre.

Il est impératif que la source de rayonnement émette continûment dans l'ensemble de la zone des fréquences présentant un intérêt.

Le détecteur a la charge de saisir le rayonnement sortant et de transformer les signaux optiques en signaux électriques. Le plus utilisé est le détecteur dit DTGS (sulfate de tri glycine deutérié).

Tandis que la source lumineuse et le détecteur sont identiques dans les deux types d'appareils, la mesure de l'absorption du rayonnement dépendant de la fréquence ainsi que le traitement si le signal est fondamentalement différent. Le schéma de principe d'un spectrophotomètre IR à double faisceau [41].

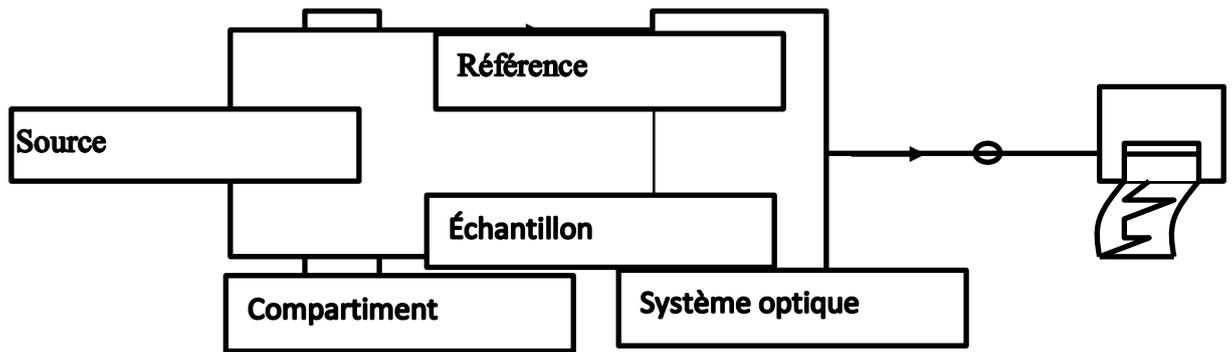


Figure III.24 Schéma de principe d'un spectrophotomètre IR à double faisceau [41].

✦ **Caractérisation de matériau par infrarouge (IR)**

Le spectromètre IR conduit à l'obtention d'un spectre IR représentant pour chaque longueur d'onde, le rapport des intensités transmises. Ce rapport, appelé transmittance (T), est exprimé en pourcentage (%T) sur les spectres que nous avons obtenus. De même les longueurs d'ondes sont exprimées sous forme de nombre d'onde ν (cm^{-1}) sachant que $\nu=1/\lambda$ (pour le moyen IR : $400\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$). L'absorption dans le moyen infrarouge (IR) provient de l'interaction de la composante électrique des ondes électromagnétiques incidentes avec les dipôles électriques des liaisons non symétriques. A chaque groupe d'atomes, susceptible d'entrer en vibration ou en rotation suivant une fréquence propre, correspond une bande d'adsorption à une longueur d'onde déterminée.

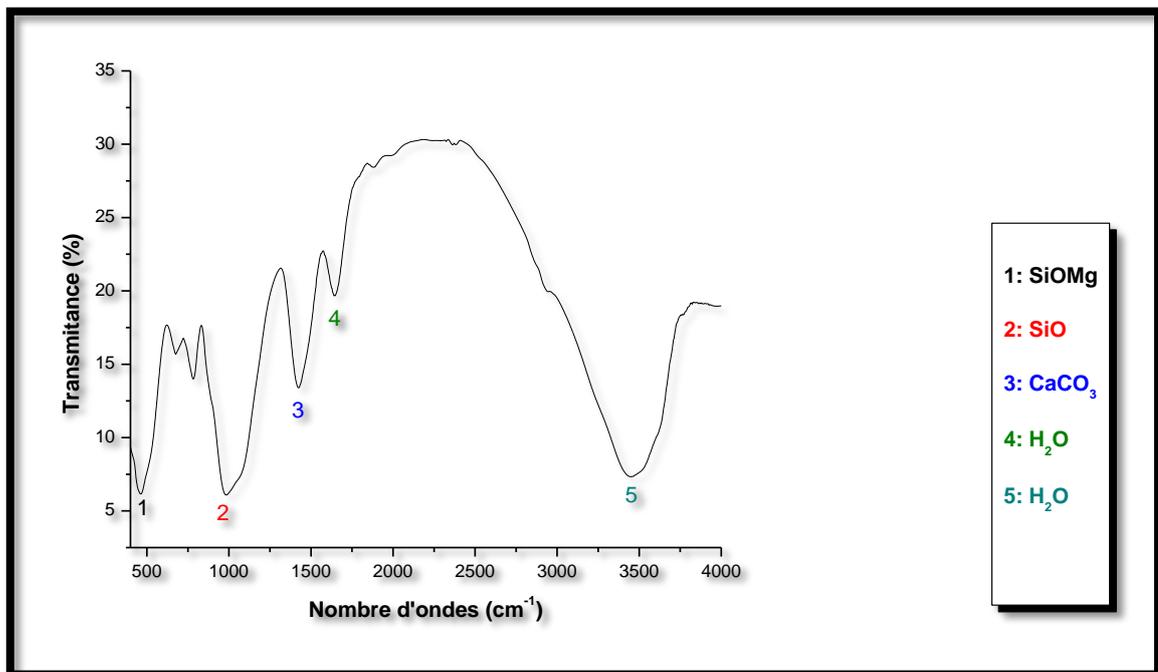


Figure III.25 Spectre Infrarouge du matériau après lixiviation.

La spectrométrie infrarouge confirme l'existence des phases suivantes dans notre échantillon après lixiviation tel que :

- (1) SiOMg
- (2) SiO
- (3) CaCO₃
- (4) H₂O
- (5) H₂O

CONCLUSION

Les résultats obtenus dans cette étude peuvent mener aux conclusions suivantes :

Bien que la résistance à la compression, diminue à chaque remplacement du ciment par les fibres métalliques, cette dernière présente une résistance admissible à une teneur de 10%.

Malgré l'attaque acide (TCLP) effectué sur le béton à 10% de fibres métalliques les phases des éléments détectés par la DRX sont toujours présent

Donc on peut dire qu'il y a eu un bon piégeage de ces derniers.

CONCLUSION GENERALE

Notre travail s'inscrit dans la perspective de caractérisation des fibres métalliques issu de l'unité BCR de Bordj-Menaiel en vue de les valorisées tout en substituant le ciment. Les résultats obtenus de l'étude des caractéristiques mécanique et physico-chimiques nous permettent de conclure que :

Les fibres métalliques peuvent être utilisées comme remplaçant du ciment a 10%, après avoir présenté une résistance à la compression acceptable (> 25 MPa), c'est un gain économique concernant le ciment, et un plus environnemental permettant de dégagé des espaces de stockage au niveau de l'usine.

Après l'attaque acide (TCLP), il a été constaté un bon piégeage des éléments dangereux dans le béton, ce qui permettra éventuellement l'utilisation de ces fibres métalliques dans les bétons de structures.

Les fibres métalliques peuvent être utilisées pour la fabrication des bétons légers.

En ce qui concerne les orientations futures, nous pensant qu'il serait intéressant de :

- Montrer les résultats de la résistance à la compression pour une période d'hydratation du ciment plus longue, allant jusqu'à 90 jours.
- Déterminer le dosage optimal des fibres métalliques a ajouté au béton en le faisant varier par pas de 3, allant de 0% à 15%.
- Faire la même étude mais avec de nouvelles analyses basées cette fois si sur des fibres métalliques réduites en poudre.
- Diminuer les sections d'armatures en béton armé, et de les remplacer par les fibres métalliques.
- Analyser la répartition des fibres métalliques après l'ajout de ces dernières dans le béton.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

- [1] G.DREUX et J. FESTA : « Nouveau guide du béton ». Édition EYROLLES.1997.
- [2] V.PHOUMMAVONG «Cours en ligne Matériaux de Construction». Université national LAOS 2006.
- [3] commission permanente de la normalisation des matériaux de construction :
« Composition et Spécification » clauses technique. Ciment C.T.2/1994
- [4] R.DALLEMAGNE et J.GOURGAND :«les bétons dans la construction». CIB béton, 2005.
- [5] J.BARON, et J.P. OLIVIER: « Les bétons bases et données pour leur formulation». Edition EYROLLES, 1999.
- [6] M. ADAM, et NEVILLE: «Propriétés des bétons». Édition EYROLLES.2000
- [7] 4eme séminaire sur les technologies du béton: « le béton : durabilité, solutions et innovation ». Édition LAVOISIER 2007.
- [8] Construction Chemicals France: « Technologie de béton ». BASF.2001
- [9] THOMAS.D, BENZAAZOUA.M, BRUNO.B, TIKOU.B et MAMERT.M,
« Mécanismes de rétention des métaux lourds en phase solide : cas de la stabilisation des sols contaminés et des déchets industriels », VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 7 Numéro 2 | septembre 2006, mis en ligne le 08 septembre 2006
- [10] N.CHELOUAH: «Cours 3eme année licence sur les matériaux de construction». Université de Bejaia. 2010

[11] A. BRESSON « Influence de la minéralogie sur le comportement des mortiers de ciment au jeune âge » Université de Laval 2009.

[12] A. TAGHNIT-HAMOU « Cours de matériaux de construction : L'hydratation du ciment portland » Université de SHERBROOKE 2008.

[13] A. PERTUÉ : Thèse de Doctorat « étude expérimentale du retrait endogène, du fluage propre et de la fissuration des matrices cimentaires aux jeune et très jeune âges » Université de Nantes 2008.

[14] MAC FARLANE F. 2004 : « Méthode de gestion des matériaux de dragage maritime – Application au Port Autonome de Dunkerque », Thèse de doctorat, Université d'Artois, 244p.

[15] ALZIEU.C et al. 1999 : « Dragages et environnement marin », Ifremer, Brest et Nantes, Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, Paris, p 27 – 35, ISBN 2-84433-014-2, 223p.

[16] JEROME .R « Les métaux et métalloïdes dans l'environnement: Transfert et impacts environnementaux » CEREGE (UMR 6635 CNRS/ Université Paul Cézanne Aix –Marseille III) -IFRE PSME 112.

[17] OUFNI Kaci et MERZOUK Khaled, « méthodologie d'évaluation environnementale et cinétique de relargage de métal lourd (Ni) stabilise /solidifie par des liants hydrauliques dans les matrices cimentaires », université de Bejaïa, 2009.

[18] Abdou Ket Houari H « Effet des fibres métalliques sur la caractérisation et les variations dimensionnelles et pondérales des matrices cimentaires renforcées de fibres » Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Université Mentouri Constantine (Algérie) 2003.

[19] ACHOURA Djamel et BOUTERFA Meriem « Effet du dosage en fibres métalliques ondulés sur le comportement mécanique des bétons à haute performances » Laboratoire de Génie Civil, Université de Annaba, Annaba, Algérie

[20] Bensaid Boulekbachea, Mostefa Hamrata, Mohamed Chemroukb & Sofiane Amzianec « Influence de la rhéologie des bétons renforcés de fibres métalliques sur leurs propriétés mécaniques » European Journal of Environmental and Civil Engineering, Volume 13, Issue 4, 2009

- [21] R.DUPAIN et R.LANCHON et J.C.ARROMAN :« Granulats, sols, ciments et Bétons» .Édition Casteilla 2004.
- [22] S.KHERBACHE :« Etude de l'influence de l'ajout de particules fines dans les sables concassé sur le retrait et la résistance des bétons », thèse de magister, Université de Bejaia. 2006.
- [23] Recueil de normes françaises du « Bâtiment et travaux publics granulats ». 1ère édition .AFNOR.1982.
- [24] Meme S.ATTIL : « TP 3eme année licence sur les matériaux de construction » Université de Bejaia. 2010
- [25] R. LANCHON ; « Granulats, béton, sols : Cours de laboratoire ». Editions DESFORGES. 1977.
- [26] Document de qualité ''ISO'' de L.T.P.E de Bejaia.
- [27] Normalisation française pour la classification ''Granulats'' XP P 18-540.
- [28] Agence Française de Normalisation Qualité des sols: Sols, sédiments, boues de Station d'épuration. Mise en solution d'éléments métalliques en traces (Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn) par attaques acides n°X31-151, 1993, p. 7-7.
- [29] B.BENSTAALLI « Méthodes et technique d'analyses physique » 1ere édition. 2003
- [30] S.KHERBACHE et R.GOUDJIL : « Influence des fines contenus dans les sables concassé sur la résistance des bétons », thèse de l'ingénieur, Université de Bejaia. 2003
- [31] G. DREUX, J. FEST, « Nouveau Guide du Béton et de ces constituants », 8ème édition, Eyrolles, Mai 1998. 6
- [32] K.WESCHE; Baustoffe fur tragende bauteile ; Béton and masswerk ; Bauverlag Wiesbaden/Berlin, 1993. (Matériaux de construction pour élément de support)
- [33] G. LOHMEYER; Béton- technique ; Handbuch fur planer and konstrukteur, béton Verlag, Dusseldorf, 1989.
- [34] D.MERABET et All, Homogénéisation et calcul de mélange des matières premières à ciments, projets de recherches J0601/01/05/1996 et AC39704, Laboratoire de Technologie des matériaux, Université de Bejaia, 2003.

[35] K .MOUSSACEB, Optimisation du système de gestion de l'homogénéisation du cru et du processus technologique de fabrication du ciment dans le système carrière usine de fabrication, Application aux cimenteries algériennes. Laboratoire de technologie des matériaux et de génie des procédés (LTMGP), Université de Bejaïa, 2007, 58 p.

[36] IBID ; Bob Horner, Product Group Manager, Sylvania, March 3 ;2003; Joe Howley, Environmental Marketing Manager, GE Lighting February 24,2003.

[37] GARRABRANTS, A.C, KOSSON, D, S use of à chelating agent to determine the metal availability for leaching from soils and wastes.in Waste matriels in construction: putting theory into practice goumans/sende/van der sloot, editors, Elsevier science, Bv, 1997: 229-239.

[38] D.BLANCHARD. CLAIRE. Thèse caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués 2000, p.73-77.

[39] C.Vipulandan, S. Wang Remediation of hexavalent, Chromium contamination soil, proceding of in situ remediation of the geoenvironnement, ASCE, New York, 1997, 363-373p.

[40] BARNA, R « Etude de la diffusion des polluants dans les déchets solidifier par un liant hydraulique. Thèse de doctorat des sciences, institut national des sciences appliquées de Lyon, 1994, 210p.

[41] N. Kerboua, K. Bouras, D. Chebli, N. Gharzouli, encadré par : Dr, L.Sibous, Des Rapports sur les méthodes spectrales, présentés par les post-gradués de Sétif, 1998, 98p.

Ciment Résistant aux Sulfates CPA CEM I - 42.5 NA443

Le ciment résistant aux sulfates est manufacturé en broyant du clinker contenant un taux réduit d'aluminates de calcium avec une proportion plus faible de gypse que celle du ciment portland composé.

Usages :

Le ciment résistant aux sulfates est généralement utilisé pour les ouvrages en béton exposés à des conditions sévères dues à l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau souterraine tels que :

- Les fondations et les structures dans les milieux agressifs
- Les travaux maritimes
- Les stations de désalement et d'épuration
- Les travaux hydrauliques
- Les barrages et les digues de soutènement collinaire

Analyses et propriétés physiques :

Analyses chimiques :

| | |
|--|-------------|
| Perte au feu % | < 1.50 |
| Résidus insolubles % | < 0.70 |
| Teneur en anhydride sulfurique SO ₃ % | 1.80 - 2.00 |
| Teneur en magnésie MgO % | 1.60 - 1.80 |
| Teneur en chlorures % | 0.01 - 0.03 |

Composition hypothétique du clinker :

| | |
|---|---------------|
| Silicates tricalciques, C ₃ S % | 55.00 - 59.00 |
| Silicates bicalciques, C ₂ S % | 17.00 - 21.00 |
| Aluminates tricalciques, C ₃ A % | 2.80 - 3.20 |
| Aluminoferrites t tricalciques, C ₄ AF % | 13.00 - 15.00 |

Propriétés physiques :

| | |
|--|---------------|
| Consistance normale de la pâte de ciment % | 25.50 - 26.50 |
| Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /gm) | 3000 - 3200 |
| Retrait à 28 jours µm/m | < 1000 |
| Expansion mm | < 5 |

Temps de prise à 20° C :

| | |
|-------------------------------|--------|
| Début de prise (heure : min) | 3 : 00 |
| Fin de prise (heure : min) | 4 : 20 |

Résistance à la compression : EN196 - 1/Mortier

| | |
|-----------------|-----------|
| 2 jours (bars) | 160 - 200 |
| 28 jours (bars) | > 425 |



Annexe : A

VII

ANNEXE B

Tableau 1. Les valeurs de résistances, d'affaissement et de l'aire occlus en fonction des différentes séries du béton

| | N° | BT 00% | BT 10% | BT 20% | BT 30% |
|---------------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 7 jours | 1 | 19.90 | 15.30 | 10.70 | 08.20 |
| | 2 | 22.10 | 15.10 | 11.30 | 08.60 |
| | 2 | 20.10 | 13.20 | 12.40 | 10.80 |
| | moy | 20.70 | 14.54 | 11.47 | 9.20 |
| 28 jours | 4 | 29.50 | 27.50 | 17.80 | 14.70 |
| | 5 | 28.30 | 26.40 | 17.00 | 13.00 |
| | 6 | 27.90 | 25.30 | 20.00 | 13.80 |
| | moy | 28.57 | 26.40 | 18.27 | 13.84 |
| Affaissement | cm | 2.00 | 1.50 | 1,00 | 1.00 |
| L'air occlus | % | 1,30 | 1,40 | 1,45 | 1,50 |

Tableau 2. Les valeurs de la masse volumique en fonction des différentes séries du béton

| | BT 10% | BT 10% | BT 20% | BT 30% |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| 0 jours | 15796 | 15787 | 15620 | 15520 |
| 1 jour | 15707 | 15639 | 15523 | 15396 |
| 7 jours | 15757 | 15679 | 15549 | 15434S |
| 14 jours | 15806 | 15719 | 15575 | 15459 |
| 21 jours | 15811 | 15768 | 15577 | 15460 |
| 28 jours | 15817 | 15797 | 15580 | 15461 |

Résumé

Pour atteindre l'objectif visé, nous avons envisagé d'incorporer des fibres métalliques de nature industriel dans des formulations de bétons en teneurs multiples (10% ,20% et 30%) tout en substituant le ciment. Concrètement, nous avons utilisé des fibres métallique issus du rejet à la fins de l'opération d'argentage des outillages ménagers et qui sont stockés dans des sacs en plastique qui sont préservés dans des conteneurs en métal et de trouver de nouvelles voies de valorisation dans le domaine de construction.

Nous présenterons, donc, les résistances du composite en compression, leurs caractérisations en moyen de différentes techniques tel que la DRX (Diffraction par Rayon X) et le comportement vis-à-vis des attaques chimiques tel que la TCLP (toxicité caracteristic leaching procédure) de l'échantillon qui contient des fibres métalliques représentant une meilleurs résistance à la compression.

La constatation faite est que la résistance diminue chaque fois qu'on incorpore les fibres métalliques. Ces dernières jouent un rôle de barrage dans la réaction d'hydratation mais qui donne une résistance admissible pour une teneur de 10%.

Mots-clés : ciment, fibres métalliques, béton, résistance, lixiviation.

Abstract

To reach the aim and to find new ways of valuation in the field of construction, we intended to incorporate industrial metallic fibers into formulations of the Concrete with multiple contents (10 %%, 20 % and 30 %) while substituting the cement. Concretely, the metallic fibers that were employed are a waste product resulting from the silver plating of various home appliances and which are stored in plastic bags which are protected in metal containers.

We thus presented the resistances of the composite in compression, their characterization regarding various techniques such as the XRD (X-ray diffraction) and their behavior towards the chemical attacks such as the TCLP (toxicity caracteristic leaching procedure) of the sample containing metallic fibers and representing a better compression.

We observed that the resistance decreases every time we incorporate the metallic fibers. The latter are found to play a role of dam (roadblock?) in the reactions of hydration but leads to an acceptable (or eligible?) resistance for a concrete content 10 % of metallic fibers.

Keywords: cement, metallic fibers, concrete, resistance, lixiviation.