

*République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur
Et de la recherche scientifique
L'université Abderrahmane MIRA de Bejaia
Faculté de technologie
Département génie civil*

Mémoire de fin d'études

**En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil
Option : Matériaux et Structures**

Thème:

*Influence des fibres métalliques (issues de
l'unité BCR) sur le comportement mécanique
et physico-chimique des mortiers*

Réalisée par :

- M^{elle} : BEN BOUDJEMAA KAHINA
- M^{elle} : DJERROUD MOUNIA
- M^{elle} : MOUSSAOUI SABRINA

Encadré par : M^{me} S.ATTIL
M^R K.MOUSSACEB

Jury :

- M^R : CHELOUAH
- M^R : BOUZEROURA

Promotion 2013

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions Dieu, le Tout Puissant, de nous avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à la finalité de ce modeste travail.

Ensuite, nous remercions nos parents qui nous ont soutenus beaucoup pendant toute la vie et qui continueront à nous aider dans tous les projets de l'avenir. Ainsi que tous les membres de nos familles qui ont participé de près ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre projet.

Nous remercions très sincèrement notre promotrice, *M^{me} S.ATTIL* pour tout le savoir qu'elle nous a apporté, et pour nous avoir encadré et dirigé au cours de notre projet de fin d'étude. Ainsi que *M^R K.MOUSSACEB* qui a été présent pour répondre à toutes nos questions.

Nous remercions les membres de jury, pour accepter d'examiner ce mémoire et juger notre travail, on leur exprime toute notre gratitude pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail.

Sans oublier le technicien *M^R ZOUBIRI* qui nous a aidé pour l'accès au laboratoire MDC afin d'effectuer les opérations et pour son aide dans la plupart de nos essais, ainsi que *M^R AMGHAR*.

Notre reconnaissance va aussi à l'ensemble du personnel des laboratoires de recherches de Génie des Procédés et Hydraulique, qui a permis par son soutien et les ressources mises à notre disposition la réalisation de cette recherche, avec une attention particulière pour *M^{me} CHABANE* et *m^{elle} BELLACHE* pour leur présence et leur précieuse assistance technique et les nombreuses explications qu'elles nous ont patiemment données.

Enfin, nous tenons à exprimer toute notre gratitude à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

A mes chers grands parents ;

*A mes très chers parents, qui m'ont donné autant d'amour
et d'affection et qui se sont toujours éveillé à ce que leur fille
ait de bonnes qualités, je vous remercie pour m'avoir donné
la chance de découvrir le monde du savoir.*

A mon cher frère : Farouk ;

A mes très chères sœurs : Moufida,

Assia, Sassa et Rania ;

A mes très chères tantes et oncles ;

A tous mes cousins et cousines ;

A mes binômes Kahina et Mounia

et leurs familles ;

A tous mes amis(es) : Amel, Safia, Hamou et Nabil ;

A tous ceux qui sont dans mes pensées et que

Je n'ai pas cité.

S.Moussaoui

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

A ma chère grand-mère ;

*A mes très chers parents, qui m'ont donné autant d'amour
et d'affection et qui se sont toujours éveillé à ce que leur fille
ait de bonnes qualités, je vous remercie pour m'avoir donné
la chance de découvrir le monde du savoir.*

*A mes très chers frères : Ameziane et Yacine ainsi
que leur femmes Hamida et Tiziri ;*

*A mes très chères sœurs : Nabila, Kahina
et son mari*

*A mes très chères tantes : Malika, Ouardia et
Farida, leurs maris ainsi que leurs enfants ;*

*A toutes les familles Djerroud, Seddaoui,
Bezzi Et Kessar ;*

*A mes binômes Sabrina et Kahina
et leurs familles ;*

A tous mes amis(es) : Fares, Nabil, Safia ;

*A tous ceux qui sont dans mes pensées et que
Je n'ai pas cité.*

M.Djerroud

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

A mes chers grands parents ;

*A mes très chers parents, qui m'ont donné autant d'amour
et d'affection et qui se sont toujours éveillé à ce que leur fille
ait de bonnes qualités, je vous remercie pour m'avoir donné
la chance de découvrir le monde du savoir.*

A mes très chers frères : Hocine et Arezki ;

A mes très chères tantes et oncles ;

A tous mes cousins et cousines ;

A mes binômes Mounia et Sabrina

et leurs familles ;

A tous mes amis(es) : Sabiha, Salha, Nora, Kahina, Fatima,

Safia, Abdelhak et Nabil.

A tous ceux qui sont dans mes pensées et que

Je n'ai pas cité.

K.Benboudjema

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale..... 1

Partie 1 : Étude bibliographique

Chapitre 1 : Généralités sur les mortiers et les bétons

Introduction	3
1. Caractéristique des composantes du béton et du mortier	3
1.1. Le béton	3
1.1.1. Composants de béton	3
1.1.2. Types de béton	9
1.2 . Les mortiers	10
1.2.1. Composition	11
1.2.2. Caractéristiques principales.....	11
2. Comportement mécanique.....	12
2.1. Résistance à la compression	12
2.1. Résistance à la traction	12
3. Comportement chimique	12
4. Changements volumétriques au jeune âge	13
4.1. Le retrait	13
4.2. Gonflement.....	15
Conclusion	16

Chapitre 2 : Utilisation des fibres dans le domaine de génie civil

Introduction	17
1. Déchet.....	17
1.1. Origine de la production des déchets	17
1.2. Constitution chimique des déchets	18
1.3. Valorisation des déchets.....	18
1.3.1. Gestion des déchets	18
1.3.2. Technique de gestion des déchets	18
2. Les fibres	19
2.1. Choix du type de fibres	19
2.2. Rôle des fibres	19

2.3. Influence du dosage en fibres	21
2.4. Diverses applications.....	22
2.5. Béton renforcé de fibres métalliques.....	23
2.5.1. Composition et mise en œuvre	24
2.5.1.1. Constituants	24
2.5.1.2. Formulation et mise en œuvre	24
2.6. Avantage de la technique du renforcement par fibres.....	25
3. Les recherches effectuées sur les bétons fibrés	25
Conclusion	31

Chapitre3 : Propriétés et notions chimiques

1. Les propriétés thermiques des matériaux.....	32
2. Quelques définitions.....	32
2.1 .La température.....	32
2.2 .La conduction	32
2.3 .PH.....	34
3. L'attaque Sulfatique	34

Partie 2 : Étude expérimentale

Chapitre 1: Les caractéristiques des matériaux utilisés et formulation

Introduction	35
1. matériaux utilisés.....	35
1.1. Ciment.....	35
1.1.1. Essais sur la pate de ciment à l'état frais.....	35
1.1.1.1. Essais de prise	35
1.1.1.2. Détermination de la stabilité par l'essai Le Chatelier ou essai d'expansion ...	37
1.1.2. Analyse par Diffraction des Rayons X du ciment (DRX)	39
1.2. Eau de gâchage.....	41
1.3. Sable normalisé	41
1.3.1. Analyse granulométrique par tamisage du sable normalisé	41
1.3.2. Analyse par Diffraction des Rayons X du sable normalisé	43
1.4. Fibres métalliques (déchet BCR)	45
1.4 .1. Description de l'unité BCR	45
1.4.2 .Analyse granulométrique de déchet BCR	46
1.4.3. Analyse par Diffraction des Rayons X des fibres métalliques utilisées.....	48
1.4.4. Microscopie électronique a balayage MEB couple a l'EDX	48

2. Formulation et mise en œuvre.....	50
2.1. Dosage et pesée des constituants.....	50
2.2. Malaxage de mortier.....	52
2.3. Préparation des éprouvettes.....	52
2.4. Conservation des éprouvettes.....	53
2.5. Démoulage des éprouvettes prismatiques	54

Chapitre 2 : Essais et procédures expérimentales

Introduction	56
1. Essais mécaniques	56
1.1. Essai de traction par flexion	57
1.2. Essai de compression	57
2. Mesure du retrait et du gonflement sur éprouvettes du mortier	58
3-. Tests Physico-Chimiques.....	61
3.1. Test de lixiviation sur monolithe (TLM).....	61
3.2. Test de lixiviation TCLP (Toxicité characteristic leaching procédure)	63
3.3. Dosage des chlorures.....	65
3.4. Analyse par Infrarouge (IR)	65
3.5. Analyse par spectromètre UV Visible.....	67

Chapitre 3: Résultats et Discussion

1. Comportement mécanique.....	70
2. Mesure du retrait et du gonflement sur les eprouvettes du mortier.....	71
2.1. Retait de dissication	71
2.2. Gonflement.....	72
3. Analyse physico-chimique desx milieu de conservation	73
4. Tests de lixiviation dynamique et caractérisation	75
5. Le dosage des chlorures.	78
6. Caractéristiques des matérieaux par rayon X.....	79
7.Analyse par infrarouge	82
Conclusion générale et perspectives.....	84

Références bibliographiques

Annexes

Normes

Liste des tableaux

1. Partie théorique

Tableau 2.1. Domaine d'application privilégiée par type de fibres.

Tableau 3.1. Valeurs moyennes de conductivité thermique de différents types matériaux ou produits.

2. Partie expérimentale

Tableau 1.1. Temps de début et de fin de prise.

Tableau 1.2. Écartement A. B.C.

Tableau 1.3. Dimension nominales des tamis selon la norme NF P 18-560.

Tableau 1.4. Historique de BCR.

Tableau 1.5. Résultats de l'analyse granulométrique des fibres métalliques.

Tableau 1.6. Dosage et pesée des constituants.

Tableau 1.7. Opération de malaxage de mortier.

1. Partie théorique

Figure 1.1. Fabrication du ciment.

Figure 1.2. Courbe granulométrique.

Figure 1.3. Moule des prismes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.

Figure 1.4. Plots.

Figure 1.5. Changements de volume dans la pâte fraîche et durcie causés par les retraits chimiques et endogènes.

Figure 1.6. Relation volumétrique entre le tassement, l'eau de ressuage, le retrait chimique

Figure 1.7. Fissuration due au retrait plastique ressemblant à une déchirure dans la surface de béton.

Figure 1.8. Gonflement au jeune âge d'un échantillon de béton de mûri dans l'eau.

Figure 2.1. Illustration de l'apport du renfort par des fibres [Cotterell 1996].

Figure 2.2. Les facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres.

Figure 2.3. Influence de la nature des fibres sur le retrait (1% et 2%) mode ambiant.

Figure 2.4. Influence du % sur le retrait avec (fibres industrielles) Mode ambiant.

Figure 2.5. Influence du % sur le retrait avec (fibres copeaux) Mode ambiant.

Figure 2.6. Effet des fibres sur les contraintes de compression et de traction.

Figure 2.7. Variation de la résistance à la compression et à la traction fonction du % et de longueurs des fibres à base de CPJ.

Figure 2.8. Essais de traction sur le béton *B25TW30*.

Figure 2.9. Comportement en flexion.

Figure 2.10. Comportement des BFM à la compression en fonction du volume et du type de fibre.

Figure 3.1. Schéma simplifié des processus de détérioration du béton intervenant lors des attaques sulfatique.

2. Partie expérimentale

Figure 1.1. Début et de fin de prise.

Figure 1.2. Bain de le Chatelier.

Figure 1.3. Mesure d'écartement A, B et C.

Figure 1.4. Appareil de Diffraction par des Rayons X.

Figure 1.5. Schéma d'un spectromètre de Diffraction des Rayons X.

Figure 1.6. DRX du ciment CPA.

Figure 1.7. Tamis.

Figure 1.8. La courbe granulométrique du sable normalisé.

Figure 1.9. Opération de quartage.

Figure 1.10. DRX du sable normalisé.

Figure 1.11. Les fibres métalliques (déchets BCR).

Figure 1.12. Courbe granulométrique des fibres métalliques.

Figure 1.13. DRX des fibres métalliques.

Figure 1.14. Appareil de MEB.

Figure 1.15. Fibres métalliques (déchets BCR) sous le MEB.

Figure 1.16. Malaxeur.

Figure 1.17. Table à choc.

Figure 1.18. Conservation des éprouvettes du gonflement dans l'eau distillée.

Figure 1.19. Conservation des éprouvettes pour le retrait à l'air libre.

Figure 2.1. Le dispositif de rupture en flexion et en compression

Figure 2.2. Presse hydraulique.

Figure 2.3. Appareil de mesure du retrait et du gonflement

Figure 2.4. Appareil multi-paramètres.

Figure 2.5. Test Lixiviation Monolithe dans deux milieux.

Figure 2.6. Concasseur du laboratoire L.T.M.G.P.

Figure 2.7. Schéma de principe d'un spectrophotomètre IR à double faisceau.

Figure 2.8. Schéma optique d'une spectrophotométrie simple faisceau.

Figure 3.1. Retrait de dessiccation.

Figure 3.2. Variation de masse.

Figure 3.3. Gonflement.

Figure 3.4. Variation de masses.

Figure 3.5. Évolution du pH.

Figure 3.6. Conductivité électrique.

Figure 3.7. Variation de masse (milieu neutre).

Figure 3.8. Variation de masse (milieu sulfaté).

Figure 3.9. Évolution du pH (milieu neutre).

Figure 3.10. Évolution du pH (milieu sulfaté).

Figure 3.11. Conductivité électrique (milieu neutre).

Figure 3.12. Conductivité électrique (milieu sulfaté).

Figure 3.13. Dosage des chlorures (milieu neutre).

Figure 3.14. Dosage des chlorures (milieu sulfaté).

Figure 3.15. Spectre de DRX de mortier M0.

Figure 3.16. Spectre de DRX de mortier M10.

Figure 3.17. Spectre de DRX de mortier M20.

Figure 3.18. Spectre de DRX de mortier M30.

Figure 3.19. Spectre obtenu par DRX de tous les mortiers.

Figure 3.20. Spectre obtenu par DRX de test TCLP.

Figure 3.21. Spectre infrarouge du mortier M10

Histogrammes

1. Partie théorique

Histogramme 2.1. Résistances à la traction.

Histogramme 2.2. Charges de rupture à la compression.

2. Partie expérimentale

Histogramme 3.1. Les résistances mécaniques des mortiers à 28 jours.

Liste des abréviations

S/S	: Stabilisation /Solidification
TBM	: Traitement Biologique et Mécanique
CPA	: Ciment Portland Artificiel
CPJ	: Ciment Portland aux ajouts
E/C	: Le rapport volume d'Eau / masse sèche du Ciment (en cm^3/g)
L/S	: Le ratio volume de Liquide/masse sèche de Solide (en ml/g)
L/S_f	: Le ratio volume de liquide/surface du bloc monolithique soumis à lixiviation (en cm^3/cm^2)
PVC	: Polyvinylchloride
BRF	: Béton Renforcé de Fibres.
BCR	: Boulonnerie, Coutellerie, Robinetterie.
TLM	: Test de Lixiviation Monolithe.
DRX	: Diffraction par Rayon X
MEB	: Microscope Électronique à Balayage.
IR	: Infra-Rouge.
UV	: Ultra-violet visible.
TCLP	: Toxicité Characteristic Leaching Procedure.
M0	: Mortier à 0% de fibres métalliques.
M10	: Mortier à 10% de fibres métalliques.
M20	: Mortier à 20% de fibres métalliques.
M30	: Mortier à 30% de fibres métalliques.
CPA	: Ciment portland pur
L'ASSO	: Attaque au Sulfate de Sodium
MT	: Mortier témoin.
MC10	: Mortier renforcé de 1 % de fibres copeaux d'acier.
MC20	: Mortier renforcé de 2 % de fibres copeaux d'acier.
MF10	: Mortier renforcé de 1 % de fibres métallique industrielles.
MF20	: Mortier renforcé de 2 % de fibres métallique industrielles
BO	: Béton ordinaire.
BFM	: Béton de fibre métallique
BSF	: Béton sans fibre
BFI50	: Béton avec fibres industrielles
BSP50	: Béton avec 50% sous produit
BSP25	: Béton avec 25% sous produit
L.T.M.G.P	: Laboratoire Technologie Matériaux Génie des Procédés.
FMI	: Fibre Métallique Industriel.

RESUME

L'ajout d'un déchet (les fibres) dans les matériaux de construction, particulièrement, les mortiers et les bétons est une technique de plus en plus utilisée, pour plusieurs raisons, soit écologique, soit économique, soit pour améliorer certaines propriétés à l'état frais ou durci. Les propriétés mécaniques du béton de fibres dépendent de plusieurs facteurs qui sont les conditions de mise en œuvre, le dosage, l'espacement, l'orientation et la distribution des fibres dans le béton ou le mortier.

Dans notre travail nous avons étudié le comportement du mortier à base de fibres métalliques issues de l'unité BCR et qui se trouve à Bordj-Menaiel. Notre travail consiste à l'étude de :

- L'influence des fibres métalliques à différents pourcentages (10%, 20%, 30%) sur le comportement mécanique (traction et compression) du mortier en les comparant à un mortier témoin (0% de déchet).
- L'influence des fibres métalliques sur la variation dimensionnelle du mortier (retrait et gonflement), et les caractéristiques physico-chimiques (pH et la conductivité électrique).
- L'influence des fibres métalliques sur le comportement physico-chimique du mortier.

Nous avons constaté que l'utilisation des fibres métalliques dans un mortier en substitution du ciment diminue ses propriétés de résistance à la compression et à flexion mais à 10% de déchets ces résistances restent acceptables.

Mots clés : mortier, fibres métalliques, résistance, retrait, gonflement, pH, conductivité électrique, béton.

ABSTRACT

The addition of a waste (the fibers) in the materials of construction, particularly, the mortars and the concretes are a more and more used technique, for several reasons, either ecological, either economic or to improve some properties in the cool state or hardened one. The mechanical properties of the concrete of fibers depend on several factors that are the conditions of bets in use dosage, the spacing, orientation and the distribution of the fibers in the concrete or the mortar.

In our work we studied the behavior of the mortar to basis in the metallic fibers descended of the BCR unit and that is in Bordj-Menaiel. Our work consists to the survey of:

- The influence of the metallic fibers of different percentages (10%, 20%, and 30%) on the mechanical behavior (traction and compression) of the mortars in comparing them to a sample mortars (0% of fibers).
- The influence of the metallic fibers on the dimensional variation of the mortar (withdrawal and inflation), and the physic-chemical features (pH and the electric conductivity).
- The influence of the metallic fibers on the physic-chemical behavior of the mortar.

We showed that the use of the metallic fibers in a mortar in substitution of a quantity of cement decreases its properties of strength to the compression and to bending but to 10% of garbage these resistances remain acceptable.

Key words: mortar, metallic fibers, strength, withdrawal, inflation, pH, conductivity electric, concrete.

Introduction Générale

Introduction générale

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde grâce à la simplicité de sa fabrication et de sa mise en place. Depuis sa découverte, ce matériau n'avait que peu évolué mais, ces dernières années, d'importantes avancées ont été réalisées en améliorant certaines caractéristiques existantes, en particulier avec l'apparition des bétons de hautes performances, des bétons de poudres réactives et des bétons de fibre. Ces bétons visent tous un gain de résistance et de durabilité mais nécessitent une mise en œuvre appropriée [1].

Devant les besoins sans cesse croissant des ressources en matériaux et aux exigences et conditions de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et étudier toutes les possibilités et opportunités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine des travaux publics. [2]

La recherche et l'expérience acquises ont permis l'introduction des fibres dans le domaine de la construction, et qui rend la possibilité de produire des éléments minces, plus légers, plus résistants et moins sujets à la fissuration par la simple addition d'une quantité de fibres. L'incorporation des fibres métalliques dans le béton a une influence directe sur sa maniabilité qui se traduit par une mise en œuvre très étudié. [3]

Aujourd'hui, le respect de notre environnement et la sauvegarde des ressources naturelles obligent les autorités, planificatrice et entreprises à encourager sérieusement la valorisation de ses déchets et l'utilisation de matériaux recyclés, en particulier dans le bâtiment. [4]

Notre travail est divisé en deux parties

Après une introduction générale,

La première partie, est une étude bibliographique qui est divisée en trois chapitres : Le premier chapitre s'intitule généralités sur les bétons et les mortiers, dans le deuxième chapitre, nous présentons les différents types de fibres et leurs caractéristiques physiques et mécaniques, ainsi qu'un aperçu sur les déchets

Le troisième chapitre nous allons citer quelques paramètres physico-chimiques intervenants dans le bâtiment.

La deuxième partie, est consacrée pour l'étude expérimentale, elle est divisée en trois chapitres : Le premier s'intéresse à l'étude des caractéristiques des matériaux utilisés et formulation, le deuxième chapitre consiste à étudier les différents essais sur les mortiers ainsi

les propriétés mécaniques (flexion, compression) et rhéologique (retrait et gonflement) et chimique (attaque des sulfates, lixiviation des déchets utilisés) des mortiers contenant des fibres métalliques (rejet BCR) qui ont été utilisés pour pouvoir analyser le comportement de ce matériau, dont l'objectif final est d'établir le bilan de l'influence des fibres sur son comportement.

Le troisième chapitre c'est la discussion des résultats obtenus

Enfin nous présentons, quelques conclusions et recommandations pour mieux valoriser ce nouveau matériau dans les constructions.

partie 1 :
Etude bibliographique

Chapitre 1 :

Généralité sur les bétons et les mortiers

Généralités sur les bétons et les mortiers

Introduction :

Le béton et le mortier sont les matériaux les plus utilisés dans la construction, mais, ils résistent mal à la traction. Les conditions d'environnement chauds et secs, tels que la région saharienne de notre pays, dessèchent ces matériaux hydrauliques ce qui induit à des retraits importants et des fissures dans les structures. [5]

1. Caractéristique des composantes du béton et du mortier**1.1. Le béton :**

Un béton est un matériau composite résultant du mélange judicieusement dosé d'un squelette granulaire (granulats) et d'une matrice pâteuse durcissable composée de ciment, d'eau et, le plus souvent, d'adjuvants.

1.1.1. Composants de béton :

Le béton est composé de plusieurs constituants :

❖ Le ciment :

Est un liant hydraulique constitué de poudre minérale. Il réagit avec l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. Les réactions d'hydratation du ciment conduisent à la formation d'une pâte durcissant progressivement à l'air ou dans l'eau. [6]

Le ciment est la partie « noble » du béton, c'est son développement qui a rendu possible la construction en béton. Il constitue aussi, dans la plupart des bétons, le poste le plus coûteux. Son rôle est en fait celui d'une « colle à cailloux ». [7]

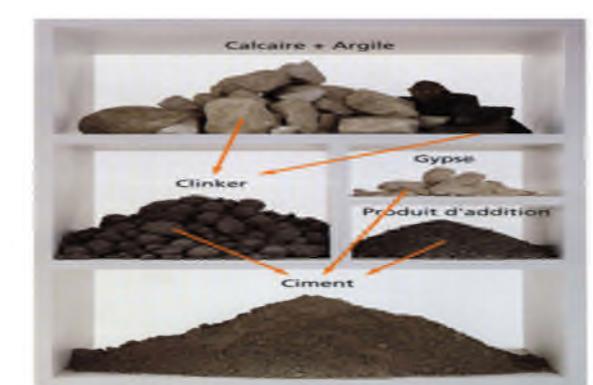


Figure 1.1. Fabrication du ciment

La normalisation européenne retient cinq catégories de ciments utilisables dans des bétons de structure :

- **Les ciments Portland purs (CPA – CEM I)**, qui contient au moins 95 % de clinker. Le pourcentage restant est appelé constituant secondaire.
- **Les ciments Portland composés (CPJ – CEM II/A ou B)**, dont la teneur en addition minérale est de 6 à 20 % pour la sous-catégorie A, et de 21 à 35 % pour la sous-catégorie B.
- **Les ciments de haut-fourneau (CHF – CEM III/A, B ou C)**, dont la teneur en laitier respective est comprise dans les intervalles suivants: [36, 65 %], [66, 80 %], [81, 95 %].
- **Les ciments pouzzolaniques (CPZ – CEM IV/A ou B)**, qui contiennent des pouzzolanes à hauteur de 10 à 35 % pour la catégorie A, et 36 à 55 % pour la catégorie B.
- **Les ciments au laitier et aux cendres (CLC – CEM V/A ou B)**, comprenant un mélange des deux types d'additions dans des proportions de 18 à 30 %, ou de 31 à 50 %, respectivement.

Ces différents ciments sont caractérisés par les différents éléments qui entrent dans leur composition.

✓ **Composition chimique : [8]**

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

Oxyde de calcium	CaO
Silice	SiO ₂
Alumine	Al ₂ O ₃
Oxyde ferrique	Fe ₂ O ₃
Magnésie	MgO
Anhydride sulfurique	SO ₃
Sulfate de calcium	CaSO ₄

Le clinker (K)

Le clinker, commun à tous les ciments courants, est un mélange de 95% de calcaire (calcaire, craie) et de 20% d'éléments secondaires

Le clinker est composé de 4 phases cristallines principales

- **C₃S ou l'alite** : silicate tricalcique de composition chimique 3CaO.SiO₂ qui donne de la résistance mécanique au matériau au jeune âge. L'alite constitue entre 60% et 65% du clinker. L'hydratation du silicate tricalcique est une réaction exothermique conduisant à la formation de silicate de calcium hydraté et d'hydroxyde de calcium. Elle se résume par l'équation (1) :



A l'inverse de la composition de l'hydroxyde de calcium (CH ou Portlandite) qui est un composé cristallin bien défini, la composition des silicates de calcium n'est pas bien définie et est généralement notée C-S-H.

L'alite est le principal composé du clinker et les hydrates formés lors de sa réaction avec l'eau de gâchage sont à la fois impliqués dans la résistance à court et moyen termes du matériau.

- **C₂S ou la bélite** : silicate bicalcique de composition chimique 2CaO.SiO₂ qui permet au matériau d'atteindre des résistances mécaniques plus importantes à moyen et long termes. La bélite constitue entre 5% et 20% du clinker.

L'hydratation du silicate bicalcique est également une réaction exothermique qui conduit à la formation de silicate de calcium hydraté et d'hydroxyde de calcium. Elle se résume par l'équation (2) :

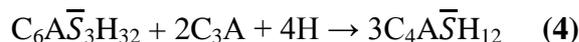


La formation des hydrates est beaucoup plus lente que celle issue de la réaction de l'alite avec l'eau de gâchage, ces hydrates permettent d'assurer la résistance à long terme.

- **C₃A ou la célite** : aluminat tricalcique de composition chimique 3CaO.Al₂O₃ qui participe principalement au phénomène de prise des bétons mais qui ne présente que de faibles résistances mécaniques et chimiques. La célite constitue entre 4% et 12% du clinker. Le processus d'hydratation de l'aluminat tricalcique se déroule en deux temps. Tout d'abord, en présence de sulfate, l'hydratation de C₃A engendre la formation d'ettringite, l'équation (3) :



Ensuite, quand la teneur en sulfate diminue, l'ettringite réagit avec le reste de célite pour former du monosulfo-aluminat hydraté, l'équation (4) :



De part sa forte réactivité avec l'eau de gâchage, la célite a un rôle majeur dans la rhéologie de la pâte et la résistance à court terme du matériau.

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

✓ **Choix des ciments :[9]**

la gamme des ciments courant permet de choisir un ciment en fonction de la résistance visée pour le béton, de l'environnement de l'ouvrage, de la saison de la construction, ainsi que du type d'ouvrage à construire.

✓ Dosage de ciment : [10]

le dosage en ciment des ouvrage varie en général de 200 à 300 Kg par m³ de béton en œuvre pour le non armé et de 300 à 400 kg/ m³ pour le béton armé ; un dosage de 350 kg/ m³ est considéré comme un minimum pour les ouvrage en béton précontraint

En fait, pour des limites de 200 à 500 kg/ m³, les résistances sont sensiblement proportionnelles aux dosages.

✓ Caractéristiques des liants : [11]

Les caractéristiques des liants sont :

- La vitesse de prise.
- La résistance mécanique.
- L'indice d'hydraulicité.

✓ Rôles des liants dans la construction: [12]

Ils assurent la cohésion des éléments de maçonnerie en les reliant entre eux d'où la nécessité de réaliser une pâte plastique et pouvant durcir à l'air ou sous l'eau, ce qui implique :

- un second rôle : le liant devra assurer la prise et le durcissement du mortier.

En outre, dans le béton le liant participe au bouchage des vides, c'est-à-dire à l'accroissement de compacité.

❖ Granulats : [13]

Les granulats sont des matériaux d'origine minérale qui entrent dans la composition des bétons et mortiers.

✓ Classification des granulats :

Les granulats sont répertoriés selon leurs tailles,

- les fillers ou fines (diamètre $D < 2\text{mm}$ et $70\% < 0,063\text{mm}$),
- les sablons qui constituent les granulats les plus fins ($D < 1\text{mm}$ et $70\% < 0,063\text{mm}$),
- les sables ($1\text{mm} < D < 6,3\text{mm}$),
- les gravillons qui constituent les granulats les plus gros ($1\text{mm} < D < 125\text{mm}$).

Avec ; D: dimension supérieure du granulat.

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

• Granulats naturels :

D'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique.

Les granulats de roche meuble, dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion.

Les granulats de roche massive sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes anguleuses.

• **Granulats artificiels:**

D'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.

• **Granulats recyclés:**

Obtenus par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

✓ **Coube granulométrique:**

La courbe granulométrique représente le pourcentage en poids des grains de dimension inférieure à D en fonction de la dimension D d'un grain. On l'obtient par tamisage pour les grains de dimension supérieure à 80 µm et par sédimentométrie pour les grains de dimension inférieure à 80 µm. En sédimentométrie, D est le diamètre d'une sphère de même poids que le grain. En tamisage c'est la maille du tamis.

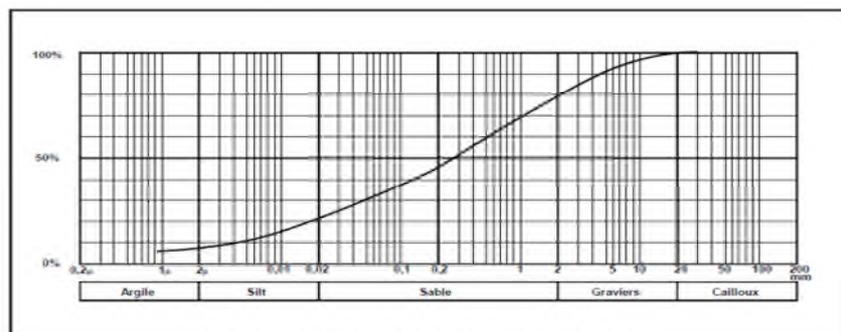


Figure 2 - courbe granulométrique

Figure 1.2 : Courbe granulométrique

❖ **L'eau de gâchage :**

L'eau de gâchage est un ingrédient essentiel du béton et joue deux fonctions principales. Confère au béton sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité, la perméabilité, la résistance mécanique, la durabilité, la microstructure du béton et la cinétique d'hydratation du ciment.

L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences de la norme **NF EN 1008**, les autres eaux comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, eaux d'origine souterraine, eaux naturelles de surface et eaux de rejet

industriel, eaux de mer et eaux saumâtres, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaires

L'eau employée pour le gâchage des bétons doit être propre:

- physiquement (pas de déchets solides, minéraux ou organiques) ;
- chimiquement (valeur limitée de la quantité de sels dissous, ce qui exclut en général l'usage de l'eau de mer).

La norme **NF EN 1008** définit les critères précis d'aptitude à l'emploi.

❖ **Les adjuvants: [14]**

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants:

- les plastifiants (réducteurs d'eau);
- les entraîneurs d'air;
- les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);
- les hydrofuges.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre.

❖ **Les sables [15]**

Les sables utilisés pour le béton sont soit d'origine naturelle, soit artificielles.

✓ **Les sables naturels :**

• **Sable de mer :**

Ce sable est généralement, pur est excellent s'il n'est pas trop fin, le sable de mer, que l'on trouve à l'embouchure des rivières est en générale inutilisable car il est souvent mélangé avec la vase. Toutefois, le sable de mer est chargé en sel; ceci est sans inconvénient pour tous les travaux à la mer et les fondations, mais il faut prendre des précautions pour les ouvrages en élévation, car les murs auraient tendance à rester humides. Si l'on est obligé d'utiliser le sable de mer dans ce cas, il est nécessaire de le laver au préalable à l'eau douce et purifié

• **Sable d'oued ou de rivière :**

Il est extrait par curage du lit des cours d'eau, on choisit pour effectuer ces curages, les endroits donnant des matériaux siliceux. Toutefois, certaines régions, le sable de rivière est schisteux et donne de moins de bons résultats, surtout si le schiste est tendre car il a en outre, tendance à se transformer en argile. En fin, le sable de rivière gypseux est à éliminer.

- **Le sable de dune :**

C'est une variété de sable de mer. Ce sable est de qualité très médiocre pour la construction, car il est constitué d'éléments très réguliers et très fins.

- **Le sable de carrière :**

Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains de sable et les empêchent d'adhérer au liants, il est donc à utiliser avec précaution. Les sables quartzeux sans matières terreuses ou argileuses, sont excellents pour les maçonneries.

- ✓ **Les sables artificiels :**

Il provient, soit de transformation thermique des roches (après cuisson), minerais et déchets, soit de la démolition d'ouvrages divers. On les obtient par broyage de roches dures (calcaires durs, grés, quartzites, laves). Ces matériaux sont intéressants, tant pour la confection de béton, que pour la confection de matériaux enrobés pour chaussées. Il convient toutefois de maîtriser le pourcentage de fines. Parmi les variétés des sables artificiels, on distingue :

- **Le sable de tuiles ou de briques :**

On fabrique un excellent sable, a propriétés pouzzolaniques, en broyant des déchets de briques ou de tuiles.

- **Le sable de laitier de haut fourneau concassé :**

Certains granulats artificiels ont des qualités remarquables de résistance et de granulométrie, c'est le cas de ce sable, très utilisé dans les régions de l'est de France, également dans le reste du pays pour la confection d'assises de chaussée stabilisées.

1.1.2 Types de béton : [16]

- ✓ **Les bétons légers**

L'intérêt des bétons légers réside dans le gain important qu'on peut réaliser sur le poids propre de l'ouvrage. Les bétons légers présentent des masses volumiques qui vont de 300 à 1800 kg/m³, contre 2300 kg/m³ pour un béton classique. Cette qualité est également recherchée dans les bétons isolants thermiques, la conductivité variant dans le même sens que la densité. Les bétons légers sont obtenus en jouant sur la composition (bétons caverneux) ou sur l'emploi de granulats allégés (argile expansée, polystyrène expansé, liège). On peut également créer des vides par une réaction provoquant un dégagement gazeux ; c'est le cas du béton cellulaire.

✓ Les bétons lourds

A l'inverse, l'emploi de granulats très denses (barytine, magnétite) permet la réalisation de bétons de masse volumique dépassant 3000 kg/m³. Ces bétons sont utilisés dans la protection contre les radiations ou pour réaliser des culées, des contrepoids, etc.

✓ Les bétons Hautes Performances

Ces nouveaux bétons atteignent des résistances de plus de 100 Mpa, grâce à l'emploi de fines (essentiellement fumées de silice) et de super plastifiants. Résistances élevées, les privilégie pour les ouvrages très sollicités à court et à long terme ou en ambiance agressive.

✓ Les bétons de fibres

Les diverses fibres, sont utilisées dans des domaines variés: éléments rapportés en réhabilitation, pièces minces architectoniques, éléments décoratifs, dallages industriels, bardages, tuyaux.

1.2 Les mortiers : [14]

Dans toute construction, il est indispensable de réunir entre eux les différents éléments (blocs de béton, briques, éléments en béton préfabriqué, etc.) au moyen d'un mortier de ciment ou d'autre liant qui a pour but de:

- solidariser les éléments entre eux;
- assurer la stabilité de l'ouvrage;
- comblent les interstices entre les blocs de construction.

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres: liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

La durée de malaxage doit être optimum, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier.

Les mortiers peuvent être:

- préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants y compris les adjuvants.
- préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs prédosés et avant l'utilisation, il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire.
- livrés par une centrale: ce sont des mortiers prêts à l'emploi.

Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années; permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers.

1.2.1 Composition [14]

Le mortier est un des matériaux de construction, qui contient du ciment; de l'eau; du sable; des adjuvants et éventuellement des additions. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure.

Les mortiers sont constitués par des mélanges de:

- liant (ciment ou chaux)
- eau
- sable
- adjuvants

❖ Les liants:

Généralement, on peut utiliser:

- les ciments normalisés (gris ou blanc);
- les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..)
- les liants à maçonner;
- les chaux hydrauliques naturelles;
- les chaux éteintes

❖ Les sables:

Normalement, les sables utilisés sont les sables appelés “sable normalisé”. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est:

- extra-fins: jusqu'à 0.8mm (en tamis), soit 1mm (en passoire);
- fins: jusqu'à 1.6mm;
- moyens: jusqu'à 3.15mm;
- gros: jusqu'à 5mm.

1.2.2 Caractéristiques principales : [14]

Les caractéristiques principales des mortiers sont:

- ouvrabilité;
- prise;

- résistances mécaniques;
- retraits et gonflements, etc.

Pour pouvoir évaluer les caractéristiques des mortiers on prend souvent comme référence le mortier 1/3 composé en poids de: une partie de ciment et de 3 parties de sable normalisé dont les grains s'échelonnent de 80 microns à 2mm et passent dans un fuseau bien déterminé et 0,50 partie d'eau.

Ce mortier est malaxé et mis en place dans des moules métalliques suivant des méthodes normalisées. On réalise sur ce mortier des essais rhéologiques et éventuellement la prise et la chaleur d'hydratation. Beaucoup d'essais de laboratoires se font sur les prismes de 4 x 4 x 16cm³ (résistances mécaniques, retrait, gonflement, absorption capillaire, résistances au gel et aux eaux agressives).

2. Comportement mécanique : [17]

La résistance mécanique est l'une des caractéristiques essentielles du béton et le mortier. Le béton est employé en générale comme matériau porteur et le taux de travail d'un ouvrage en béton dépend de sa résistance mécanique qu'évolue avec le durcissement du béton.

La résistance mécanique d'un béton ou d'un mortier dépend de plusieurs paramètres à savoir

- La nature et la qualité des constituants (ciment, granulats, eau, adjuvants).
- Les conditions de la mise en œuvre des constituants.
- Les conditions thermo hygrométrique ambiantes de conservation.
- Rapport E/C;

Il est défini par la résistance à la compression et par la résistance à la traction.

2.1 Résistance a la compression :

Est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton et béton armé. Le béton est caractérisé par la résistance à la compression R_{c28} mesurée sur des éprouvettes écrasée à 28 jours selon la norme **NF EN 1239-3**.

2.2 Résistance a la traction :

Elle est moins étudiée que la résistance en compression car le béton est conçu essentiellement pour résister a la compression et son comportement en traction est quasi fragile le comportement en traction du béton peut être identifié par l'essai de flexion sur trois points désignée par F_{t28} .

3. Comportement chimique : [18]

L'attaque externe se produit lorsqu'un matériau cimentaire se trouve en contact direct avec une source de sulfate, comme dans les sols, les eaux souterraines, les eaux d'infiltration,

les pluies acides (acide sulfurique) liées à la pollution industrielle atmosphérique. Elle peut être décrite selon trois processus permettant d'évaluer l'agression :

- Le transfert dans le milieu poreux des ions sulfates qui est contrôlé par la perméabilité et la diffusivité du matériau.
- Les réactions chimiques entre les composants de la pâte de ciment, qui dépendent du ciment utilisé, et les ions.
- Le phénomène d'expansion, résultant de l'apparition de nouvelles phases cristallines et conséquence des deux premiers processus.

4. Changements volumétriques au jeune âge : [19]

Le volume du béton commence à varier peu de temps après sa mise en place. Les variations volumétriques au jeune âge, durant les premières 24 heures, peuvent influencer les changements volumétriques (comme le retrait de séchage) et la fissuration du béton durci, particulièrement dans le cas des bétons ayant un faible rapport eau/liants.

Les différentes formes de changements volumétriques au jeune âge sont les suivantes

4.1 Le retrait :

Les retraits se mesurent sur des prismes $4 \times 4 \times 16\text{cm}^3$ en mortier 1/3 (figure 1.3), munis de plots à leurs extrémités (figure 1.4) et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20°C et à 50 % d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 60 jours.

Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment). [14]

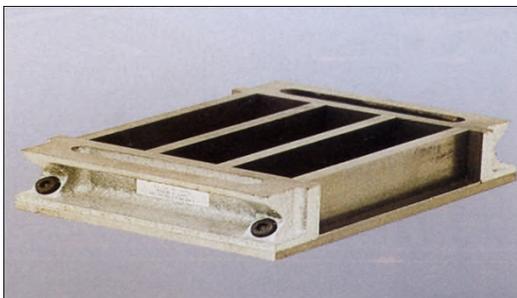


Figure 1.3 moule des prismes $4 \times 4 \times 16\text{ cm}^3$.

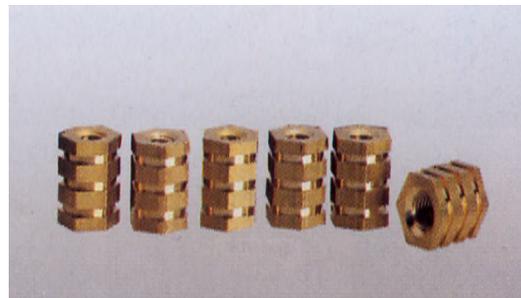


Figure 1.4 plots.

a) Le retrait chimique

Le retrait chimique est la diminution du volume absolu des solides et des liquides de la pâte lors de l'hydratation du ciment. Le volume absolu des produits d'hydratation est inférieur à la somme des volumes absolus de l'eau et du ciment anhydre. Les deux premières colonnes de la figure (1.5) illustrent la variation volumique de la pâte de ciment à l'état plastique. Les bulles d'air entraînées par le malaxage ne sont pas représentées. Le retrait chimique se poursuit à l'échelle microscopique tant que progresse l'hydratation du ciment. Après la prise initiale, la pâte ne peut plus se déformer aussi librement que lorsqu'elle était à l'état plastique.

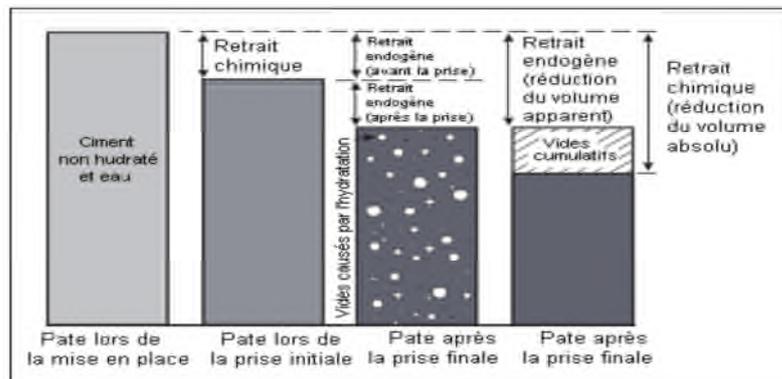


Figure 1.5. Changements de volume dans la pâte fraîche et durcie causés par les retraits Chimique et endogène

L'hydratation additionnelle et le retrait chimique engendrent alors la formation de vides Microscopiques dans la microstructure (figure I.5). La plus grande proportion du changement volumétrique est interne, ce qui n'engendre pas de variation apparente des dimensions de l'élément en béton ou en mortier.

b) Le retrait endogène

Le retrait endogène est la diminution du volume externe apparent d'une pâte de ciment, d'un mortier ou d'un béton engendrée par l'hydratation du ciment. La diminution du volume externe apparent engendré par le retrait endogène est bien inférieure à la diminution du volume absolu engendrée par le retrait chimique en raison de la rigidité de la structure de la pâte de ciment durcie. Le retrait chimique est le mécanisme fondamental à la base de la formation du retrait endogène.

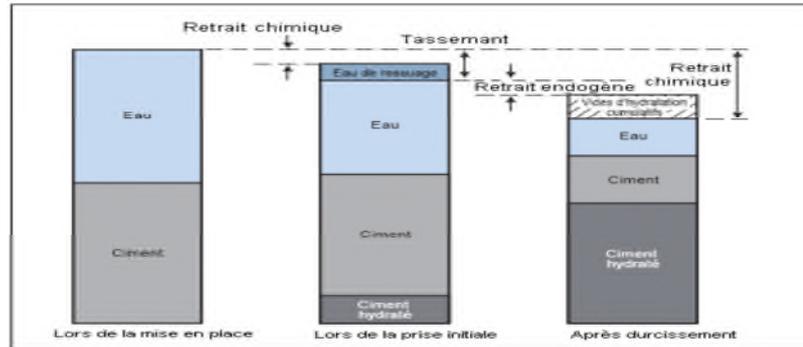


Figure 1.6. Relation volumétrique entre le tassement, l’eau de ressuage, le retrait chimique

c) Le retrait plastique

Le retrait plastique caractérise le changement de volume se produisant avant le durcissement, lorsque le béton est encore à l’état frais. Il s’observe généralement par la formation de fissures de retrait plastique se formant avant ou pendant la finition (figure 1.7). Ces fissures semblent avoir déchiré la surface. Le retrait plastique résulte des effets combinés des retraits chimiques et endogènes et d’un taux élevé d’évaporation de surface excédant l’apport d’eau par le ressuage.



Figure 1.7. Fissuration due au retrait plastique ressemblant à une déchirure dans la surface de béton.

d) Retrait thermique :

Résulte de la baisse de la température du béton tout juste après sa prise, température occasionnée, soit par la chaleur d’hydratation du ciment qui est une réaction exothermique, soit par la variation thermique du milieu de conservation. Le retrait thermique dépend de plusieurs facteurs comme composition, la finesse de mouture et la quantité du ciment, la forme et les dimensions de l’élément, de la température initiale et la température ambiante, etc.... [17].

4.2 Gonflement :

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu’ils sont conservés dans l’eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4 x 4 x 16cm³ conservées dans l’eau à 20 °C. Ils sont en

général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Châtelier inférieure sur pâte pure à 10mm).

Le béton, le mortier et la pâte de ciment gonflent en présence d'eau externe. Le volume de la masse de béton augmente lorsque l'eau externe est aspirée dans la porosité capillaire pour y occuper les espaces vides créés par le retrait chimique. Il n'y a pas d'auto dessiccation, donc il n'y a pas de retrait endogène. L'eau extérieure peut être apportée par un mûrissement humide ou par une immersion complète. Le gonflement résulte des effets de la croissance cristalline, de l'absorption d'eau et de la pression osmotique. Ce gonflement au jeune âge est relativement faible, soit environ 50×10^{-6} (figure 1.8) Lorsque le béton n'est plus en contact avec de l'eau externe, le gonflement s'arrête et les retraits endogènes et de séchage engendrent une contraction du béton. [19]

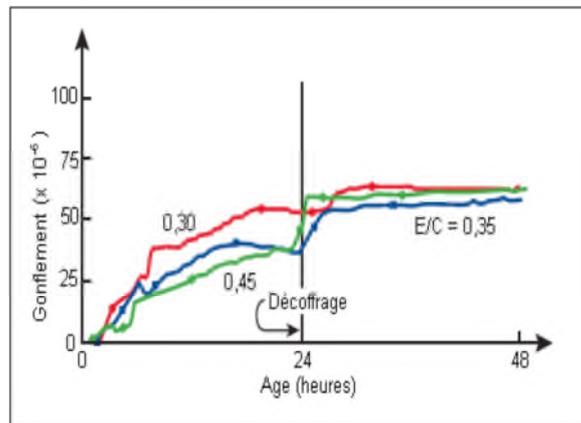


Figure 1.8. Gonflement au jeune âge d'un échantillon de béton mûri dans l'eau.

Conclusion

Les différents granulats forment le squelette granulaire du mortier ou du béton. Le ciment, l'eau et les adjuvants forment la pâte liante. Lorsqu'il n'y a pas de squelette granulaire, on parle de "pâte de ciment". La pâte est un élément unique et actif du béton enrobant les granulats. L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains. La pâte joue le rôle de lubrifiant et de colle.

Dans le béton où une très grande compacité est recherchée (béton HP par exemple), la dimension des éléments les plus fins peut descendre en dessous de 0,1mm (fillers, fumée de silice).

De même les granulats très légers ont des masses volumiques inférieures à 100 kg/m³.

Chapitre 2 :

Utilisation des fibres dans le domaine de Génie Civil

Utilisation des fibres dans le domaine de Génie Civil

Introduction

Le choix du renfort est très important. Il doit avoir de bonnes propriétés intrinsèques de résistance (module d'élasticité, géométrie, etc.), être compatible avec la matrice cimentaire et doit aussi avoir un coût acceptable. Les fibres métalliques, qui proviennent d'une source renouvelable, sont une voie de recherche intéressante.

Le béton ou le mortier renforcé de fibre métallique répond au souci de plus en plus important des pays développés pour la préservation de l'environnement, la valorisation des déchets, l'isolation thermique- acoustique et le coût.

1. Déchet

Le déchet est : « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné, ou que son détenteur destine à l'abandon ».

1.1-Origin de la production des déchets : [2]

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- ✓ **Biologiques** : tout cycle de vie produit des métabolites ;
- ✓ **Chimiques** : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière.
- ✓ **Technologiques** : tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;
- ✓ **Économiques** : les produits ont une durée de vie limitée ;
- ✓ **Écologiques** : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;
- ✓ **Accidentelles**: l'inévitable dysfonctionnement des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets.

1.2-Constitution chimique des déchets : [2]

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provenant d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles

avec production de sous-produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux.

1.3-Valorisation des déchets : [2]

1.3.1-Gestion des déchets :

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le traitement (le traitement de rebut), la réutilisation ou l'élimination des déchets, habituellement ceux produits par l'activité humaine, afin de réduire leurs effets sur la santé humaine, l'environnement, l'esthétique ou l'agrément local. L'accent a été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation.

1.3.2-Technique de gestion des déchets :

a) Décharge :

Stocker les déchets dans une décharge est la méthode la plus traditionnelle de stockage des déchets, Historiquement, les décharges étaient souvent établies dans des carrières, des mines ou des trous d'excavation désaffectés.

b) Incinération :

L'incinération est le processus de destruction d'un matériau en le brûlant. Elle est connue pour être une méthode pratique pour se débarrasser des déchets contaminés

c) Compost et fermentation :

Les déchets organiques, comme les végétaux, les restes alimentaires, ou le papier, sont de plus en plus recyclés. Ces déchets sont déposés dans un composteur ou un digesteur pour contrôler le processus biologique de décomposition des matières organiques et tuer les agents pathogènes

d) Traitement Biologique et Mécanique :

Le Traitement Biologique et Mécanique (TBM) est une technique qui combine un tri mécanique et un traitement biologique de la partie organique des déchets municipaux. La partie « mécanique » est souvent une étape de tri du vrac. Cela permet de retirer les éléments recyclables du flux de déchets (tels les métaux, plastiques et verre) ou de les traiter de manière à produire un carburant à haute valeur calorifique nommé combustible dérivé des déchets qui peut être utilisé dans les fours des cimenteries ou les centrales électriques. La partie « biologique » réfère quant à elle à une fermentation anaérobique ou au compostage.

2. Les fibres :

L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles, l'intérêt pour leur utilisation ne cesse de se croître pour la fabrication du béton prêt à l'emploi les fibres peuvent exister sous différents types et formes.

2.1-Choix du type des fibres [20]

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leurs natures ou leurs géométries.

Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles).

Leur géométrie est très variable. Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post-fissuration.

Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre et par frottement à l'interface avec la matrice.

On trouve aussi des fibres ruban, des fibres à tête d'ancrage ou encore des fibres ondulées dont, qualitativement, les modes de fonctionnement sont les mêmes que ceux cités précédemment.

L'avantage des fibres à crochets ou ondulées est qu'elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice les rendant plus efficaces que les fibres droites. Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant une répartition non homogène dans le béton. Les fibres droites sont généralement utilisées pour pallier à ce problème mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacité s'en ressent.

2.2-Rôle des fibres [4]

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton ou de mortier comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité. Ils n'ont constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

Chapitre 2 : Utilisation des fibres dans le domaine de Génie Civil

-Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la Figure (2-1-a).

-La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (Figure 2-1-b).

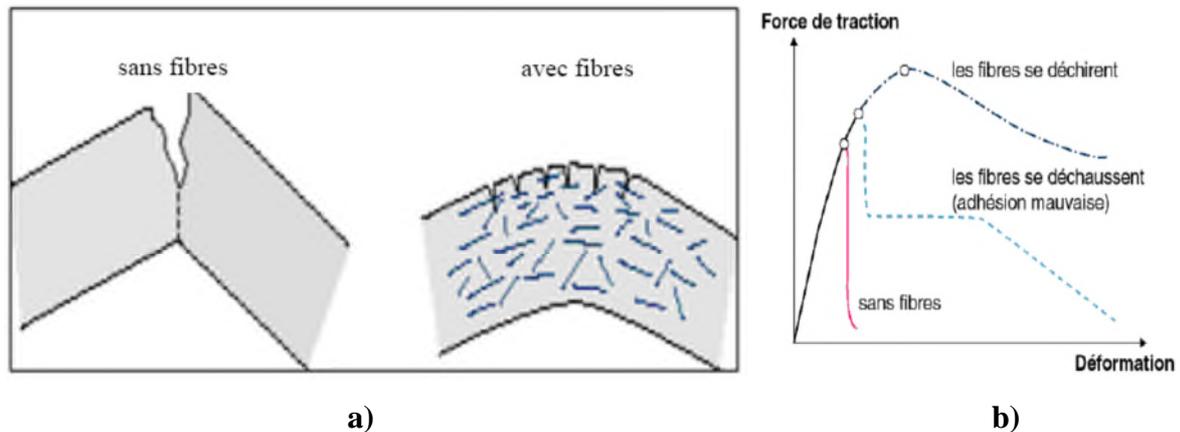


Figure 2.1 Illustration de l'apport du renfort par des fibres.

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer la structure en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation. Selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont insérées, les fibres permettent :

- l'amélioration de la cohésion du béton frais ; par exemple, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire.
- l'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration.
- la réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge.
- la réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur).
- l'augmentation de la résistance à la traction par flexion.
- l'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion.

En réalité, les fibres ont des effets sur les performances mécaniques des bétons dans tous les modes de rupture. La Figure (2.2) illustre les différents facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres.

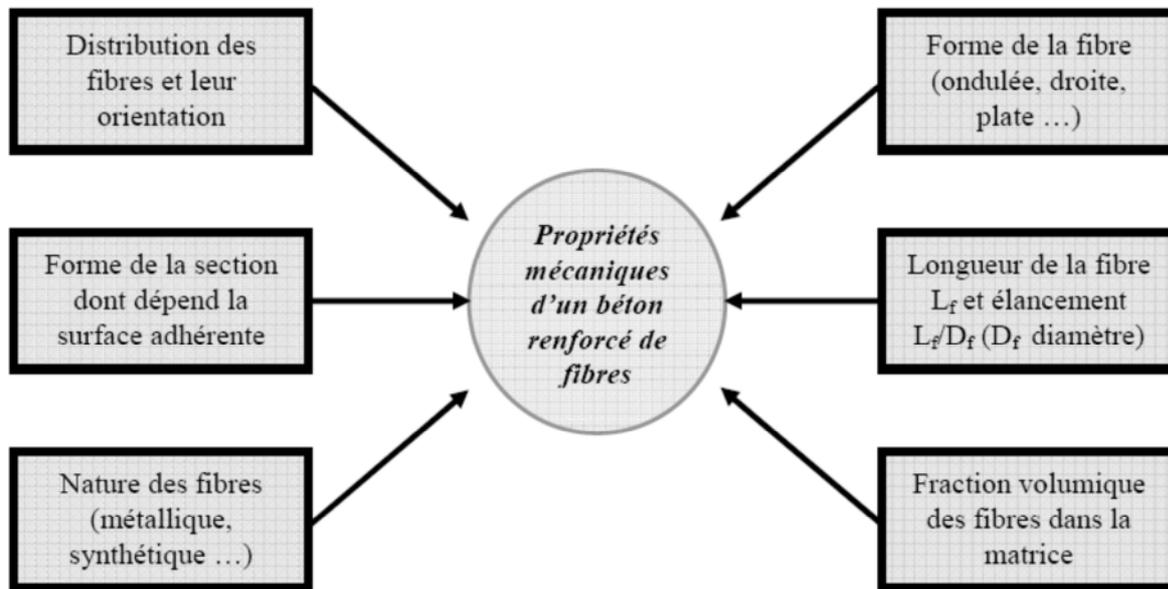


Figure 2.2. Les facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres.

2.3-Influence du dosage en fibres

a) Optimisation rhéologique

L'ajout de fibres dans un béton à l'état frais nécessite de nombreuses précautions notamment pour éviter la formation de pelotes et limiter le risque d'une orientation préférentielle.

La durée du malaxage influe sur la répartition des fibres au sein du béton frais. Si elle est trop courte, les fibres ne peuvent pas se répartir de manière homogène. Si elle est trop longue, la répartition peut devenir hétérogène du fait de la ségrégation des fibres.

La maniabilité du béton est diminuée par l'ajout des fibres. Plus la quantité de fibres et leur élanement sera fort, plus l'ouvrabilité du mélange sera affecté. Il est donc important d'utiliser des fibres de dimensions optimales et d'ajuster la composition de la matrice afin de permettre au béton de conserver une maniabilité suffisante.

Lors de la mise en place dans les moules, il faut limiter l'écoulement qui est responsable de l'orientation préférentielle des fibres dont nous parlerons plus spécifiquement dans le paragraphe suivant. L'orientation peut aussi être due à la vibration qu'il est important de limiter voir de supprimer en travaillant avec des bétons autoplacants et à l'effet de paroi, ce dernier étant plus difficile à contourner.

b) Optimisation mécanique

La quantité de fibres dans un béton est une caractéristique prépondérante vis-à-vis du comportement post-fissuration.

Soit deux fibres, l'une perpendiculaire au plan d'une fissure, l'autre inclinée par rapport à cette fissure. Si les deux fibres sont suffisamment éloignées l'une de l'autre, elles agissent

indépendamment vis-à-vis de la fissure, la fibre perpendiculaire étant plus efficace que la fibre inclinée. Le bilan du couple se résume alors à la somme de leurs actions individuelles.

En revanche, si la distance entre les deux fibres est telle que l'action de la fibre qui travaille le mieux conduit, en outre, à confiner la fibre qui fonctionne le moins bien (c'est-à-dire provoquer une étroitesse autour de cette fibre), cette dernière verra donc son efficacité vis-à-vis de la fissure accrue. Le bilan devient alors la somme de leurs actions individuelles plus quelque chose qui est la conséquence de leur « entraide », qu'on peut également qualifier de synergie positive.

Au contraire, lorsqu'on rapproche de plus en plus les deux fibres, il arrive un moment où la quantité de pâte de ciment qu'il y a entre elles devient tellement faible que l'enrobage de chaque fibre devient insuffisant (même si l'on augmente la quantité de pâte de ciment avec le pourcentage de fibres pour des raisons de maniabilité) pour assurer un fonctionnement correct de l'interface pâte-fibre. Les fibres travailleront moins efficacement que si elles avaient travaillé sans interactions. Le bilan est alors la somme de leurs actions individuelles moins un effet qui est la conséquence de leur « promiscuité », qu'on peut également qualifier de synergie négative. A partir de ce seuil, plus on ajoute des fibres, moins elles seront efficaces individuellement, et on assistera, au mieux, à une très faible augmentation des caractéristiques mécaniques et, au pire, à une diminution.

Il est évident que le choix de la fibre est lié à la caractéristique mécanique que l'on désire améliorer, par exemple une fibre métallique pour augmenter les capacités portantes, ou une fibre synthétique pour améliorer le comportement post-fissuration ou la ductilité des bétons.

Ces seuils de synergie dépendent tous du type de fibre, de ses dimensions, du fait que la fibre fonctionne par ancrage réparti le long de la fibre ou concentré à ses extrémités ou encore par adhérence, du type de matrice (plus ou moins compacte) ou de l'orientation des fibres vis-à-vis des fissures.

2.4-Diverses applications : [21]

Les nombreuses innovations de la technologie des bétons renforcés de fibres ont permis d'étendre considérablement la gamme des applications (tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Domaine d'application privilégiée par type de fibres

Domaine d'applications privilégiées par type de fibres			
Type de fibre	Dosage courant	Domaine d'application privilégié	Exemples d'application
Fibres métalliques	0,5 à 2% en volume 40 à 160 Kg /m ³	Renfort pour bétons structurels et armature structurelle	-dallages, sois industriels, planchers, dalles de compression -éléments préfabriqués voussoirs de tunnels, poutres, conteneurs, tuyaux -bétons projetés en travaux souterrains, stabilisation en pente et ouvrages d'assainissements -pieux de fondations, semelles filantes
Fibres de polypropylènes	0,5 à 2% en volume 0,5 à 2 Kg /m ³	Limitation de la fissuration liée au retrait Amélioration de la tenue en feu des bétons	-dallages -voussoirs tunnels -revêtements d'ouvrages souterrains -mortiers projetés -parements esthétiques
Fibres en verre	1 à 2%	Réalisation d'éléments préfabriqués très minces	-parements architectoniques -panneaux de façade -éléments décoratifs

2.5- Béton renforcé de fibres métalliques (BRF)

Malgré le fait que le béton soit utilisé avec de l'acier d'armature, son comportement demeure relativement fragile; les barres d'armature peuvent disperser les fissures pour éviter la formation de fissures de traction trop grandes et éviter la rupture des éléments tendus. Une autre solution à la fragilité du béton est l'addition des fibres métalliques au mélange de béton. Une fois renforcé avec des fibres d'acier, le béton devient à la fois plus rigide et montre plus de ductilité en traction et en compression. De plus, les fissures sont réparties plus uniformément.

La résistance à la traction du béton renforcé de fibres d'acier est à peu près identique à celle du béton normal. Pour un fort dosage en fibres, la résistance à la traction et le module élastique du béton augmentent légèrement.

2.5.1-Composition et mise en œuvre : [22]

2.5.1.1-Constituants :

Pour pouvoir se passer totalement des armatures conventionnelles (aciers passifs et de précontraintes), nous devons développer un matériau doté d'une résistance en traction qui avoisine les 20Mpa. L'homogénéité et la résistance sont les deux critères qui imposent l'emploi des fibres et leur dosage .naturellement l'obtention d'un bon composite ne se limite pas à l'incorporation d'un constituant dans un autre sans autre ajustement. Le comportement d'un composite étant dicté par les caractéristique mécanique de la matrice de renfort et de l'interface fibre-matrice, il convient d'optimiser chacun des constituants afin d'optimiser le produit final.

Les constituants entrants dans la composition de la matrice (ciment, eau, sable fumée de silice super-plastifiante) permettent l'obtention d'une matrice extrêmement compacte conduisant à des résistances en traction élevées et donc un encrage mécanique optimal des fibres. L'eau, les granulats et le ciment sont les constituants de base ; des additifs peuvent être ajoutés soit pour modifier les propriétés mécaniques en introduisant des fibres. L'étude du comportement du béton revient alors à l'étude d'un matériau hétérogène à deux phases :

- une phase visqueuse composée par la pâte de ciment.
- une phase composée par l'ensemble des granulats et des fibres.

2.5.1.2-Formulation et mise en œuvre : [22]

a. Formulation

Les règles récentes ne dictent aucune norme sur la formation des bétons. Une méthode de formulation a été mise au point depuis les années 80 en se reposant sur la méthode de Baron-Lesage, qui se base sur deux principes :

1. Pour un rapport massique, eau sur ciment E/C, et une quantité de pate (eau+ciment) donnée, le béton est plus compact et possède une maniabilité optimale.
2. Le dosage optimal en granulat ne varie pas avec la variation de rapport E/C et (eau+ciment).

L'ajout des fibres métalliques n'influe pas sur les deux premières hypothèses.

b. Mise en œuvre

Après avoir ajusté les constituants en fonction de la destination de l'ouvrage, il sera malaxé de façon à avoir un matériau de composition homogène ayant par la suite des propriétés uniformes, notons que la construction avec ce type de matériau exige deux conditions :

1) Le malaxage du composite doit conduire à une bonne rhéologie pour rendre possible sa mise en œuvre. Se pose alors le problème de l'homogénéisation en fibres du mélange, sans formulation de pelote.

2) Un bon matériau nécessite une bonne mise en œuvre. Ce point est encore plus critique avec les bétons de fibres, puisque leurs caractéristiques mécaniques sont fortement dépendantes de la distribution et de l'orientation des fibres vis-à-vis de la direction de sollicitation principale, elles-mêmes induites par l'écoulement du matériau dans le moule.

On déduit alors que les propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de fibres à l'état durci et à l'état frais, dépendent fortement de leur composition de leur fabrication jusqu'à sa mise en œuvre dans le coffrage.

2.6-Avantage de la technique du renforcement par fibres : [23]

Les avantages du renforcement des bétons par fibres sont :

- Résistance mécanique supérieure (résistance aux impacts ténacité en traction meilleure tenue à la fatigue, résistance au cisaillement, meilleur contrôle de largeur des fissures).
- Renforcement multidirectionnel dans toute la masse du béton.
- Qualité de conception supérieure.
- Les fibres sont plus efficaces que les barres découpées et les treillis.
- Éliminent la tâche d'élaborer l'acier sur chantier (décharge trier couper et poser l'acier).
- Le bétonnage plus simplifié.
- Une meilleure rentabilité sur le chantier (cout d'entretien, de la main d'œuvre, et temps d'exécution).

3. Les recherches effectuées sur les bétons fibrés

Au cours de ces trente dernières années, les matériaux composites à base de béton renforcés de fibres ont eu un certain développement au niveau de leur conception, de leur fabrication et de leur utilisation dans le domaine du renforcement et de la réparation d'ouvrages de différents types.

Plusieurs recherches ont été menées sur l'utilisation des fibres dans les bétons, et chacune de ces recherches ont abouties à des résultats.

Dans ce qui suit nous allons présentés quelques-unes de ces recherches

a)-Effet des fibres métalliques sur la caractérisation et les variations dimensionnelles et pondérales des matrices cimentaires renforcées de fibres [24] :

Des essais de retrait libre ont été effectués sur des éprouvettes 7 x7 x 28 cm³, munis de plots aux extrémités. En même temps que le retrait, ce travail s'est intéressé à mesurer la perte en poids des éprouvettes. Dans cette étude, une évaluation de la performance à moyen et long-terme est présentée pour les différents types de mortiers. Deux types de fibres, avec deux pourcentages en volume (1.0%) et (2.0%), utilisant une même composition de base pour tous les mortiers.

Les résultats sont reportés sur les figures (2.3 ; 2.4 ; 2.5) ; on peut constater que les fibres diminuent le retrait, cette diminution est de l'ordre de 16 % par rapport au témoin pour le dosage de 1 % de fibres, et de 27 % pour le dosage de 2 %.

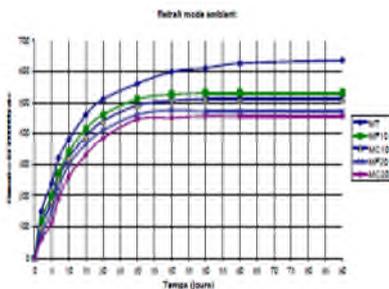


Figure 2.3.Influence de la nature des fibres sur le retrait (1% et 2%) mode ambiant

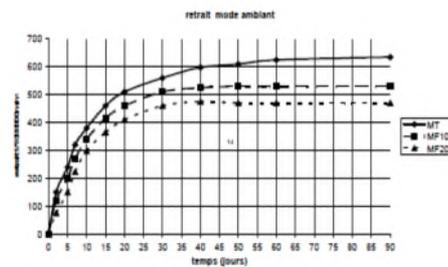


Figure 2.4.Influence du % sur le retrait avec (fibres industrielles) Mode ambiant

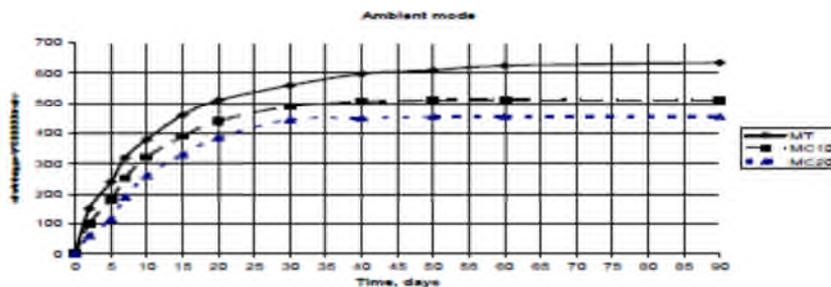


Figure 2.5.Influence du % sur le retrait avec (fibres copeaux) Mode ambiant

MT : Mortier témoin.

MC10 : Mortier renforcé de 1 % de fibres copeaux d'acier.

MC20 : Mortier renforcé de 2 % de fibres copeaux d'acier.

MF10 : Mortier renforcé de 1 % de fibres métallique industrielles.

MF20 : Mortier renforcé de 2 % de fibres métallique industrielles.

On constate que les fibres diminuent le retrait, cette diminution est de l'ordre de 16 à 20 % par rapport au mortier sans fibres à 90 jours. Il y a très peu de différence entre les deux

types de fibres (environ de l'ordre de 9 %). Après une longue durée, l'action des fibres est plus précise.

b)-Étude de la ductilité des nœuds de structures poteaux - poutres en béton de fibres métalliques [25] :

Les fibres métalliques ont une longueur qui varie entre 15 à 75 mm, avec une épaisseur qui peut atteindre 0.80 mm.

Les fibres sont ajoutées directement dans le malaxeur à béton, simultanément au sable et au gravillon dans la bascule à granulats .ils ont pris la précaution de Malaxer le mélange (béton + fibres) pendant 20 secondes avant l'introduction de l'eau de gâchage.ils ont fait varier le rapport massique $S / S + G$ (S : sable, G : granulats), et puis détermine pour chaque valeur de ce rapport la maniabilité correspondante.

Les résultats des essais de compression sur éprouvettes cylindriques (16 x32) de béton ordinaire et de béton de fibres ainsi les résultats d'essai de traction par fendage sur éprouvettes cylindriques (16x32) des deux types de béton sont représentées sur la figure (2.6)

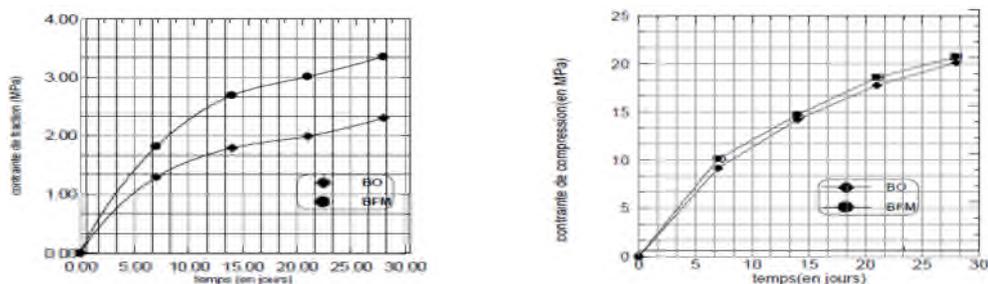


Figure. 2.6. Effet des fibres sur les contraintes de compression et de traction

BO : Béton ordinaire.

BFM : Béton de fibre métallique.

D'après les résultats obtenus durant les essais de cette étude, on peut constater que le béton de fibres métalliques peut remplacer le béton conventionnel armé dans les zones de clavage des éléments structuraux.

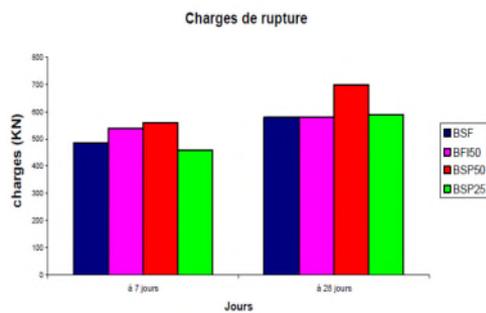
Le volume du nœud, la quantité de fibres, le type de fibres et la dispersion de celles-ci sont des facteurs qui influent sur la ductilité et la capacité de résistance du nœud poteau-poutre.

c)-Influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire [26]:

Dans cette recherche ils ont pris quatre types de bétons ; un béton renforcé de fibres métalliques, deux bétons renforcés de copeaux métalliques et enfin un béton témoin sans

Chapitre 2 : Utilisation des fibres dans le domaine de Génie Civil

fibres. Les histogrammes (2.1 2.2) nous montrent la résistance à la compression et à la traction des quatre types de béton :



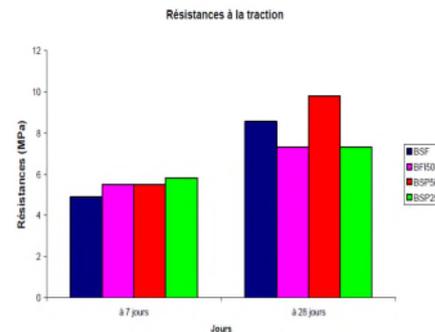
Histogramme 2.1. Résistances à la traction

BSF : béton sans fibre

BFI50 : béton avec fibres industrielles

BSP50 : béton avec 50% sous produit

BSP25 : béton avec 25% sous produit



Histogramme 2.2. Charges de rupture à la compression

Pour les résistances à la compression, les résultats indiquent que les fibres industrielles ont une augmentation très peu importante.

À la traction il y a une augmentation de la résistance pour tous les bétons, On constate que les BSP25 réagissent comme les bétons témoins, cela peut s'expliquer par la dimension des fibres qui se rapprochent de la dimension d'un gros granulat et fonctionnent ainsi comme un béton sans fibres. Il y a une nette augmentation de la résistance à la traction pour tous les mélanges de 7 à 28 jours.

d)-Influence des ajouts de fines minérales sur les performances mécaniques des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier [5] :

Cette recherche s'est intéressée à la durabilité de mortier de fibres de palmier dattier et qui se trouve en abondance dans la région d'Ouargla (sud Algérie). Avec l'étude de :

- La durabilité des fibres par leur conservation dans des différentes matrices avec un ajout de 20, 40 et 60 % de pouzzolane naturelle.
- La durabilité des mortiers de fibres avec traitement de la matrice par l'addition de:
 - pouzzolane naturelle
 - débris de brique cuite.

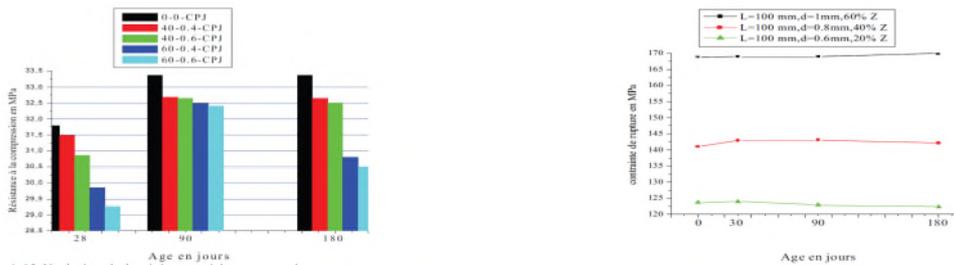


Figure 2.7. Variation de la résistance à la compression et à la traction fonction du % et de longueurs des fibres à base de CPJ

D’après la figure 2.7 nous remarquons que pendant la période de 28 à 90 jours tous les mortiers présentent une progression positive de résistance et le mortier de fibres 60 -0.6 –CPJ est le plus résistant. Mais au delà de 90 jours, nous enregistrons une chute dans la résistance à la flexion de tous les mortiers de fibres. Cette chute est assez remarquable pour les mortiers 60 -0.6 -CPJ. Cela peut être interprété par la chute de la durabilité des fibres dans la matrice cimentaire à base de CPJ, aussi à la chute d’adhérence entre la fibre-matrice ainsi qu’à l’influence des conditions climatiques.

D’après la Figure 2.7 nous remarquons que la résistance à la traction des fibres reste presque constante en fonction du temps de conservation dans les différentes matrices cimentaires avec 20 %, 40 % et 60 % de pouzzolane naturelle. Les fibres gardent presque leur résistance initiale (état naturelle) ce qui confirme que la pouzzolane présente un bon milieu de conservation et empêche la libération de la chaux de ciment qui influe défavorablement sur la durabilité et les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales.

e)-Bétons renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure [27] :

Cette étude s'appuie sur des essais de structures réalisés pour, d'une part, étudier les mécanismes de rupture et, d'autre part, valider les modèles élaborés. Des essais sont ainsi effectués en flexion simple et à la traction.les résultats des essais sont regroupés dans les figures suivantes :

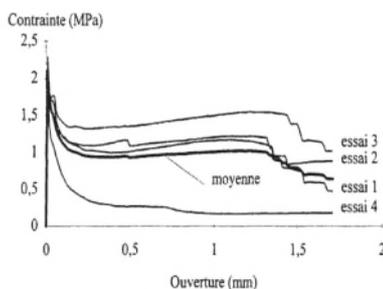


Figure 2.8.Essais de traction sur le béton B25TW30.

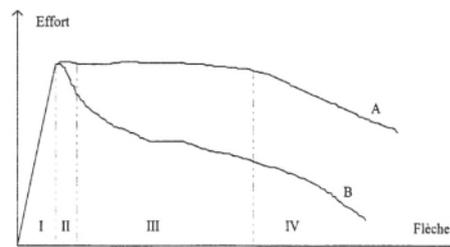


Figure 2.9.Comportement en flexion circulaire

La figure (2.8) représente les résultats de 4 essais. On constate qu'après une chute jusqu'à une ouverture de 100µm, la contrainte post-fissuration augmente légèrement de manière linéaire

jusqu'à 3,4mm d'ouverture pour ensuite chuter par paliers. L'augmentation peut être due à la plastification de l'acier entre les têtes d'ancrage, et la chute à la rupture de certaines fibres. L'éprouvette n°4 contenait deux fois moins de fibres que les autres dans la section fissurée. De plus, celles-ci étaient inclinées en moyenne de 60° par rapport à l'axe de sollicitation, ce qui provoque une rupture de l'ancrage par déchaussement : seule 1 fibre sur 8 a cassé. Dans les autres éprouvettes, plus de 3/4 des fibres ont cassé. Il faut souligner que l'ouverture correspondant à la rupture des fibres est fonction de la possibilité de déplacement local du cône ancré et de l'adhérence fibre - matrice, donc de la résistance à la compression.

Pour la figure (2.9) la description de ces mécanismes montre qu'une approche du type calcul à la rupture est appropriée pour ce type de matériau. Elle consiste à postuler un mécanisme de rupture et à écrire l'équilibre de la structure suivant ce mécanisme. Dans le cas d'une poutre en flexion, l'apparition d'une macrofissure peut être modélisée par une rotule semi-rigide.

f)-Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes [3]

L'objectif de cette recherche est une contribution à la valorisation des déchets pneumatiques et de sable de dunes dans le domaine de la construction.

Dans cette étude seront présentées les caractéristiques mécaniques (flexion, compression) et rhéologiques (retrait) des bétons de sable de dunes renforcés par des fibres métalliques issues de pneus usés.les deux courbes suivantes nous présentent le comportement des BFM à la compression en fonction du volume et type de fibres :

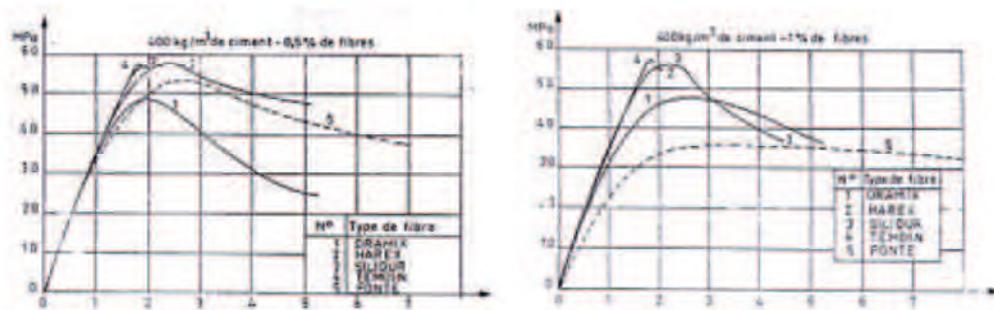


Figure 2.10. Comportement des BFM à la compression en fonction du volume et du type de fibre

L'étude comparative concernant le béton classique et le béton de fibres métalliques, a montré dans leurs majorités une légère augmentation de l'effort maximum de compression en fonction de l'augmentation de la teneur en fibre. La résistance à la compression est peu influencée par la présence des fibres.

Conclusion

La production plus ou moins importante de déchets d'un point de vue de leur quantité et/ou de leur diversité ne réside pas seulement dans un choix humain mais peut être totalement indépendant d'une volonté humaine.

En effet, plusieurs facteurs peuvent influencer la composition des déchets les techniques et habitudes de gestion des différents intervenants ont également une influence sur la nature, la qualité et la composition des déchets.

Les innovations constructives, qui font souvent appel à de nouveaux matériaux, ont rendu les ciments renforcés de fibres très populaires. La possibilité d'améliorer la résistance à la traction et au choc permet d'envisager une réduction du poids et de l'épaisseur des éléments, et devrait aussi réduire les dommages attribuables au transport et à la manutention.

Les recherches qu'on a citées si dessus nous ont montré que parmi les facteurs qui influent sur la ductilité et la capacité de la résistance des bétons fibrés, on trouve la quantité de fibres, le type de fibres et la dispersion de celles-ci.

Chapitre 3 :

Propriétés et notions chimiques

Propriétés et notions chimiques

3

1-Les propriétés thermiques des matériaux :

La chaleur est la principale forme d'énergie dans la nature, « Aucun sujet n'a des apports plus étendus avec les progrès de l'industrie et ceux des sciences naturelles ; car l'action de la chaleur est toujours présente, elle pénètre tous les corps et les espaces, elle influe sur les procédés des arts, et concourt à tous les phénomènes de l'univers ».

Les propriétés thermiques regroupent les paramètres caractérisant le comportement des matériaux vis-à-vis cette énergie. Il existe des lois physiques régissant ce comportement et qui sont appelées les équations de la chaleur [26].

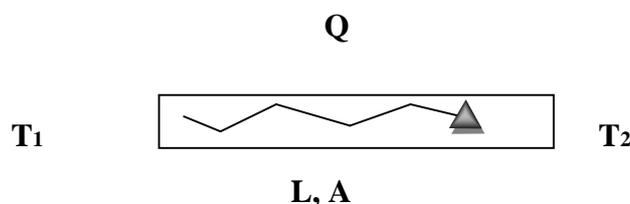
2-Quelques définitions:**2.1-La température [26].**

La température est la traduction à l'échelle macroscopique d'un état énergétique de la matière à l'échelle microscopique et on distingue :

- Pour les solides : c'est l'état de vibration des atomes à l'intérieur d'un réseau cristallin ou de mouvement d'électrons pour les matériaux qui ont la faculté d'échanger des électrons
- Pour les fluides : c'est l'état d'agitation des molécules

2.2-La conduction

C'est le mode de transfert lent de la chaleur dans un solide ou encore dans un liquide (ou d'un gaz). Un exemple : propagation de la chaleur dans une paroi entre un intérieur d'un bâtiment chauffé et l'extérieur. Un autre exemple simple est celui d'un barreau de longueur L et de section A dont on chauffe une extrémité à une température T_1 supérieure au reste du barreau qui est à température T_2 .



Naturellement, la température va s'homogénéiser par l'apparition d'un flux de chaleur Q de la zone chaude vers la zone froide. L'équation du flux de chaleur constitue la première équation de la chaleur :

$$Q = K A \frac{T_1 - T_2}{L}$$

Le paramètre de proportionnalité K est la conductivité thermique du matériau qui s'exprime en $W/m.K$. Cette propriété thermique représente la vitesse à laquelle la température s'uniformise dans le barreau. On peut classer les matériaux en deux grandes catégories vis-à-vis de la conduction de chaleur : les conducteurs et les isolants. La plupart des métaux (acier, cuivre, aluminium, or, argent, ...) sont des conducteurs. A l'inverse, les matériaux céramiques (brique, verre, porcelaine, ...) sont généralement isolants et leurs propriétés sont utilisées pour empêcher les déperditions d'énergie : isolation des maisons ou des systèmes de production d'énergie (par exemple dans les grosses chaudières ou les fours industriels, ...).

- Notions de la conductivité thermique des matériaux [28]

La transmission de la chaleur dans toutes les constructions se produit notamment au niveau des murs et de la toiture. Le flux thermique dépend de la masse volumique et de la porosité, ouverte ou fermée du matériau. La conductivité thermique est d'autant plus faible que la porosité est importante et la masse volumique est peu élevée, donc plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau transmet la chaleur et s'est ainsi un mauvais isolant.

On va citer quelques définitions de la conductivité thermique :

La conductivité thermique est la vitesse d'écoulement de la chaleur (flux thermique) dans des conditions bien définies, rapporté à l'unité de surface (soit le m^2), traversant un corps de 1m d'épaisseur par unité de variation de température dans une direction perpendiculaire à la surface. [29]

La conductivité est la propriété physique intrinsèque des matériaux. Pour les matériaux du bâtiment, la détermination de λ est complexe car elle dépend :

- Du matériau : exemple ordres de grandeur de conductivité thermique pour divers types de milieux
- De son passé : exemple conductivité du PVC est liée à son passé
- De la température : exemples mousse de polyuréthane et béton
- De sa densité : exemples liège et polystyrène
- De l'humidité : exemple influence de l'humidité sur les matériaux minéraux (brique, béton).

Le tableau N° 3.1 donne quelques valeurs de la conductivité thermique (λ) pour différents matériaux :

Tableau 3.1 Valeurs moyennes de conductivité thermique de différents types matériaux ou produits

MATERIAUX	W/m.K	OBSERVATIONS
BITUME	0.17	23°C
PIERRE	4.7	23°C
TERE (sol), sèche	0.4	23°C
SABLE	0.55 à 1.85	23°C
BETON	1.5 à 2	23°C
BETON CELLULAIRE AUTOCLAVE	0.1 à 0.3	
VERRE	1	23°C

2.3-PH :

Est une grandeur qui se mesure et se calcule pour quantifier l'acidité d'une solution. Il reflète la concentration d'une solution en ions H⁺. Plus une solution est concentrée en ions H⁺, plus elle est acide et plus son pH est bas. L'échelle de pH s'étend de 0 à 14 :

- Si le pH est inférieur à 7, la solution est acide
- Si le pH est égal à 7, la solution est neutre.
- Si le pH est supérieur à 7, la solution est basique.

3-L'attaque Sulfatique :

Les phénomènes à l'origine de l'attaque sulfatique ne sont pas toujours bien connus et encor moins maîtrisés. Celle-ci est accompagnée d'une précipitation de produits sulfatés secondaires, d'une expansion importante et de détériorations chimico-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de cohésion...).

Ceci conduit à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé (type et rapport E/C).

On distingue l'attaque interne, intervenant soit pendant la prise soit en différé (DEF3), de l'attaque externe, se produisant à n'importe quel instant dès lors que les conditions externes sont réunies. [18]

- **Complexité des phénomènes :**

Les mécanismes fondamentaux d'altération des bétons par réactions chimiques, ainsi que leurs effets ont été représentés à l'aide d'un schéma proposé par Méhta Dans le schéma ci-dessous ce schéma a été simplifié pour se focaliser sur l'attaque sulfatique.

Deux réactions y figurent, l'hydrolyse des hydrates de la pâte de ciment durcie (phénomène associé à la DEP) et les réactions entraînant la formation de produits expansifs (associées à

l'ASSO). Néanmoins les conséquences macroscopiques sont d'ordre mécanique [30] : chute de résistance et de rigidité, fissuration et déformation du matériau et physico-chimiques: affaiblissement des propriétés liantes, modification de la porosité et des propriétés de transport, et formation d'un hydrate expansif [31].

L'attaque externe se produit lorsqu'un matériau cimentaire se trouve en contact direct avec une source de sulfate, comme dans les sols, les eaux souterraines, les eaux d'infiltration, les pluies acides (acide sulfurique) liées à la pollution industrielle atmosphérique. Elle peut être décrite selon trois processus permettant d'évaluer l'agression :

- Le transfert dans le milieu poreux des ions sulfates qui est contrôlé par la perméabilité et la diffusivité du matériau,
- Les réactions chimiques entre les composants de la pâte de ciment, qui dépendent du ciment utilisé, et les ions SO_4^{-2} .
- Le phénomène d'expansion, résultant de l'apparition de nouvelles phases cristallines et conséquence des deux premiers processus.

La quantité de sulfates pouvant intervenir dans les réactions dépend de chaque source (lieu, quantité, type) considérée.

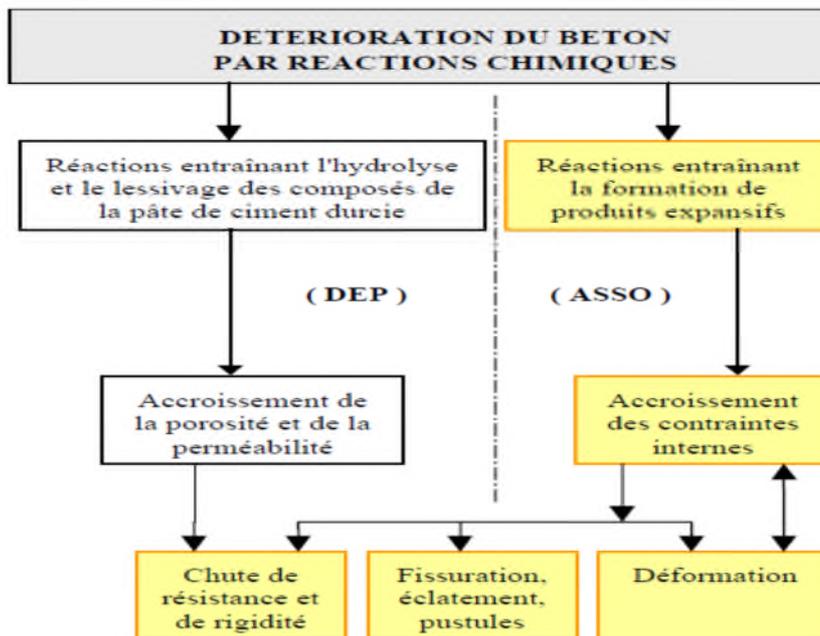


Figure 3.1. Schéma simplifié des processus de détérioration du béton intervenant lors des attaques sulfatique

Partie 2 :

Étude expérimentale

Chapitre 1 : **caractéristiques des matériaux utilisés et Formulation**

Caractéristiques des matériaux utilisés et Formulation

1

Introduction :

Dans cette partie, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux de la recherche. Tous les essais sur les mortiers, ainsi que les méthodes de contrôle ont été effectués suivant les normes Européennes et Algériennes en vigueur.

1. Matériaux utilisés :

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques d'un ciment et notamment sa résistance. Ce mortier est réalisé conformément à la norme **EN 196-1**. La norme décrit le sable utilisé pour les essais ainsi que le malaxeur.

1.1-Ciment :

Le ciment utilisé pour la confection des mortiers doit être conforme aux exigences des normes Algériennes **NA422 et la NA443**

Le ciment utilisé est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture du clinker et du laitier granulé de haut fourneau (CPA) CEM I, 42,5 MPA, fabriqué par la société LAFARGE, les caractéristiques chimiques et minéralogique sont données dans (**l'annexe A**).

1.1.1-Essais sur la pate de ciment à l'état frais :

1.1.1.1-Essais de prise (EN 196-3)

❖ **Objectif de l'essai**

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

❖ **Principe de l'essai**

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

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

Chapitre 1 : Caractéristiques des matériaux utilisés et Formulation

❖ Équipement nécessaire utilisé

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

❖ Conduite de l'essai

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

- confectionner une pâte normalisée. Le temps zéro est celui où le ciment a fini d'être ajouté à l'eau dans la cuve du malaxeur. La consistance recherchée de la pâte, une fois atteinte, la pâte est introduite dans le moule tronconique comme indiquée pour l'essai de consistance ;
- Remplir le moule tronconique, et agrafer la face supérieure ;
- Mettre le moule dans l'armoire en attendant, que la prise soit commencée ;
- Quand le moment supposé du début de prise approche, on fait sortir le moule de l'armoire et on le met sur le socle de l'appareil
- Immobiliser l'aiguille au contact de la pâte ;
- Libérer la partie mobile sans vitesse initiale ;
- Relever la distance **d** séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base ;
- si l'arrêt se produit à une distance $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$; La prise est commencée ;
- si non, on retourne le moule dans l'armoire qu'on le sortira qu'à intervalles de temps convenablement espacés jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$;
- On retourne le moule tronconique utilisé pour la détermination du début de prise de façon que les essais de fin de prise soient faits sur la face du moule en contact avec la plaque de base (voir la figure1.1).

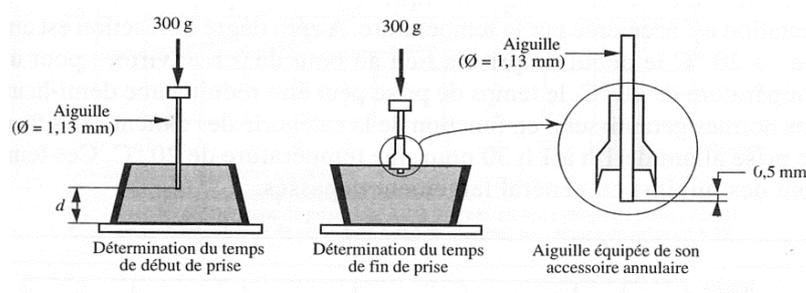


Figure1.1. Début et de fin de prise

❖ Résultats Obtenus

Tableau 1.1. 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.

1.1.1.2-Détermination de la stabilité par l'essai le Chatelier ou essai d'expansion (EN 196-3)

❖ 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 ; avec :

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

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 Δ entre les pointes des aiguilles (voir figure 1.3). Après prise les moules sont alors entreposés dans le bain d'eau à 20°C qui doit être porté à ébullition en 30 min \pm 5 min. Ce bain sera maintenu à la température d'ébullition pendant 3h \pm 5min. (figure 1.2).



Figure 1.2. Bain le Chatelier

Chapitre 1 : Caractéristiques des matériaux utilisés et Formulation

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°C.

La stabilité est caractérisée par la valeur **C-A** exprimée en mm à 0,5mm près :

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

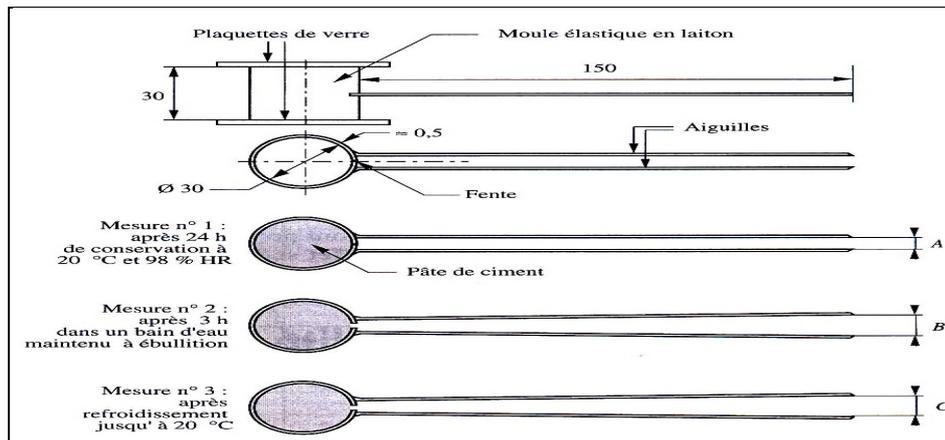


Figure 1.3. Mesure d'écartement A, B et C.

❖ Résultats obtenus

Les résultats obtenus à partir de cet essai, sont les suivants :

Tableau 1.2. Écartement A B C

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 :

$$\text{ST} = 0.5 \pm 0.5 \text{ mm}$$

D'après la norme, le gonflement ou l'expansion devront être inférieur à **10mm**, 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 $0,5 \pm 0,5\text{mm}$, 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, le retrait et le gonflement à mesurer sur les mortiers ne seront pas influencés par l'expansion de ciment.

1.1.2 -Analyse par Diffraction des Rayons X du ciment (DRX):

❖ 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 Rongten 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[31]. La condition de la réflexion est donnée par l'équation de Bragg :

$$n.\lambda=2d\text{Sin } \theta .$$

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.



Figure 1.4. Appareil de Diffraction par des Rayons X

❖ 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.

Chapitre 1 : Caractéristiques des matériaux utilisés et Formulation

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 Diffractogramme 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.

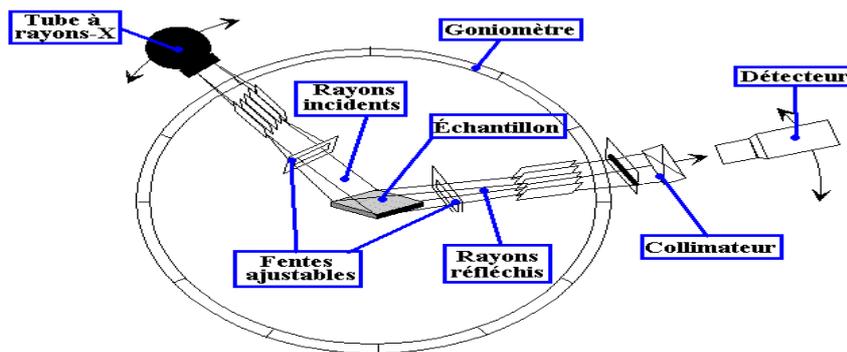


Figure 1.5. Schéma d'un spectromètre de diffraction des rayons X

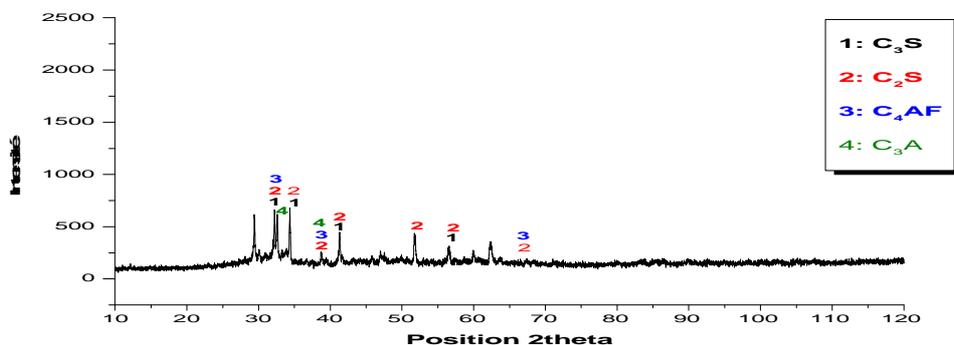


Figure 1.6. DRX du ciment CPA

D'après le spectre DRX obtenu pour le ciment (figure 1.6), les principaux constituants du ciment sont détectés (C_2S , C_3S , C_4AF , C_3A).

1.2-Eau de gâchage :

L'eau utilisée dans ce présent travail est l'eau potable donc elle ne nécessite aucun essai. Elle est conforme aux exigences de la norme (NF EN 1008).

1.3-Sable normalise :

Le sable utilisé est appelé (sable normalisé CEN EN 196-1). Ce sable est commercialisé en sac plastique de 1350±5g.

1.3.1-Analyse granulométrique par tamisage du sable normalisé NF P 18-560

❖ But de l'essai :

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

- les dimensions,
- la forme,
- la masse volumique,
- porosité,
- teneur en impureté,

De l'échantillon qui a été prélevé.

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

❖ Matériel utilisé

Ce sont des tamis, qui sont constitués d'un maillage métallique ou d'un perçage d'une tôle définissant des trous carrés de dimensions normalisées.

La dimension nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carré, ces dimensions se suivent dans une progression géométrique, depuis le tamis 0,08mm, l'analyse granulométrique n'est pas adaptée un échantillon de diamètre <0,08 mm donc on procède par sédimentométrie.

L'existence de passoires (trous ronds) a conduit à une double classification des tamis et des passoires, tout en conservant pour chaque famille d'appareil la même progression géométrique des ouvertures. Afin d'éviter toute ambiguïté, un tamis et une passoire équivalents désignées par un même numéro de module.

Les dimensions des tamis peuvent être repérées par des numéros : une suite continue de nombres entiers, allant de 20 pour le tamis de 0,08mm à 50 pour le tamis de 80mm.

Chapitre 1 : Caractéristiques des matériaux utilisés et Formulation

La classification des dimensions nominales normalisées des tamis est représentée dans le tableau suivant :

Tableau 1.3 Dimension nominales des tamis selon la norme NF P 18-560

Modules	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis (mm)	0,08	0,100	0,125	0,16	0,200	0,250	0,315	0,40	0,50	0,53	0,80
Modules	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis (mm)	1,00	1,25	1,60	2,00	2,50	3,15	4,00	5,00	6,3	8	10
Modules	42	43	44	45	46	47	48	49	50	/	/
Tamis (mm)	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	/	/



Figure 1.7. Tamis

En plus des tamis, nous avons besoin d' :

- Une balance ;
- Échantillon bien sur.

❖ Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

❖ Conduite de l'essai

✓ 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 est la plus grande dimension spécifiée en millimètres.

Les résultats sont représentés dans la courbe granulométrique suivante :

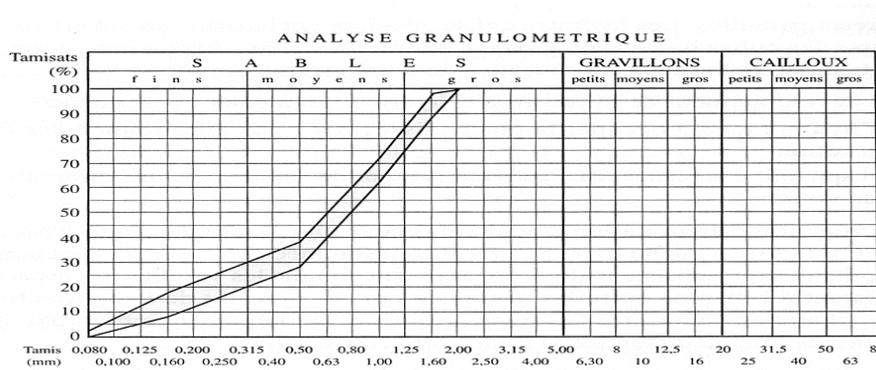


Figure 1.8. La courbe granulométrique du sable normalisé.

1.3.2-Analyse par Diffraction des Rayons X du sable normalisé (DRX):

- **Préparation mécanique d'un échantillon représentatif**

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 :

✓ **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.

✓ **Tamissage**

Le tamissage 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, 0.045mm) 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).

✓ **Homogénéisation**

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

✓ **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 (voir figure 1.9). Sa réalisation, nécessite application de la loi de Richards donnée par la relation suivante :

$$Q \geq Kd^2$$

Q : poids de l'échantillon.

Chapitre 1 : Caractéristiques des matériaux utilisés et Formulation

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.

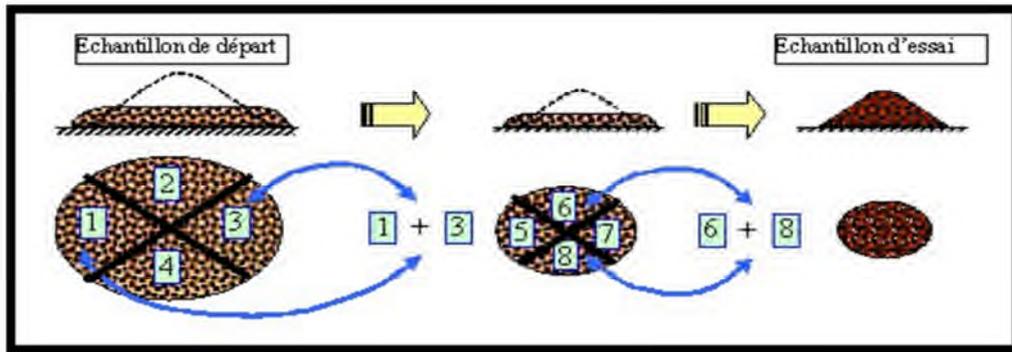


Figure 1.9. Opération de quartage

✓ Représentativité de l'échantillon

Soit : la représentativité d'un échantillon est déterminée par la loi de Richards [33]:

$$Q = p.$$

$$Kd^2 = p'.$$

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

✓ 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. [34].

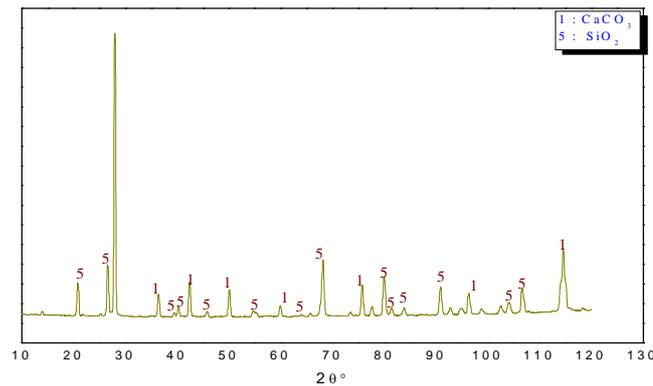


Figure 1.10. DRX du sable normalisé

Le spectre DRX obtenu pour le sable (figure 1.10) indique l'existence de deux phases majoritaires : le quartz (SiO₂) détecté en quantité importante à $2\theta = 26,36^\circ$ et les carbonates de calcium (CaCO₃) à $2\theta = 36,14^\circ$.

1.4-Fibres métalliques (déchet BCR) :

1.4.1-Description de l'unité BCR : [36]

L'unité de coutellerie de Bordj-menaïel est une filiale de groupe BCR, a été créée 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.

b)-Historique

L'unité de coutellerie de Bordj – Menaïel a été créée en 1977, le tableau 1.5 présente les étapes de réalisation de l'unité BCR.

Chapitre 1 : Caractéristiques des matériaux utilisés et Formulation

Tableau 1.5: Historique de BCR

Année	Étapes de réalisation de l'unité BCR
1977	L'accord de construction de la coutellerie de Bordj-Menaïel a été signé par le représentant suisse et son homologue algérien pour produit en main.
1979	Ils ont commencés la construction de cette unité de coutellerie (ORFEE).
1982	L'apparition des premiers essais de production de 1982 jusqu'à la fin de 1986. Le personnel a été au début presque totalement étranger, le remplacement par un personnel algérien a été progressif (à faible allure).
1986	Départ total des étrangers. Les derniers sont partis en janvier 1987 et après réception complète de l'unité par le personnel algérien expérimenté.

Les déchets de l'unité proviennent essentiellement de la zone d'argentage et qui sont traités dans la zone d'épuration, le déchet récupéré est sous forme d'une boue humide, il est stocké dans des grands sacs en plastique qui sont préservés dans des conteneurs en métal dans une décharge propre à l'unité.



Figure 1.11. Les fibres métalliques (déchet BCR)

1.4.2-Analyse granulométrique de déchet BCR

Les résultats de l'analyse granulométrique de déchet BCR sont récapitulés dans le tableau suivant :

Chapitre 1 : Caractéristiques des matériaux utilisés et Formulation

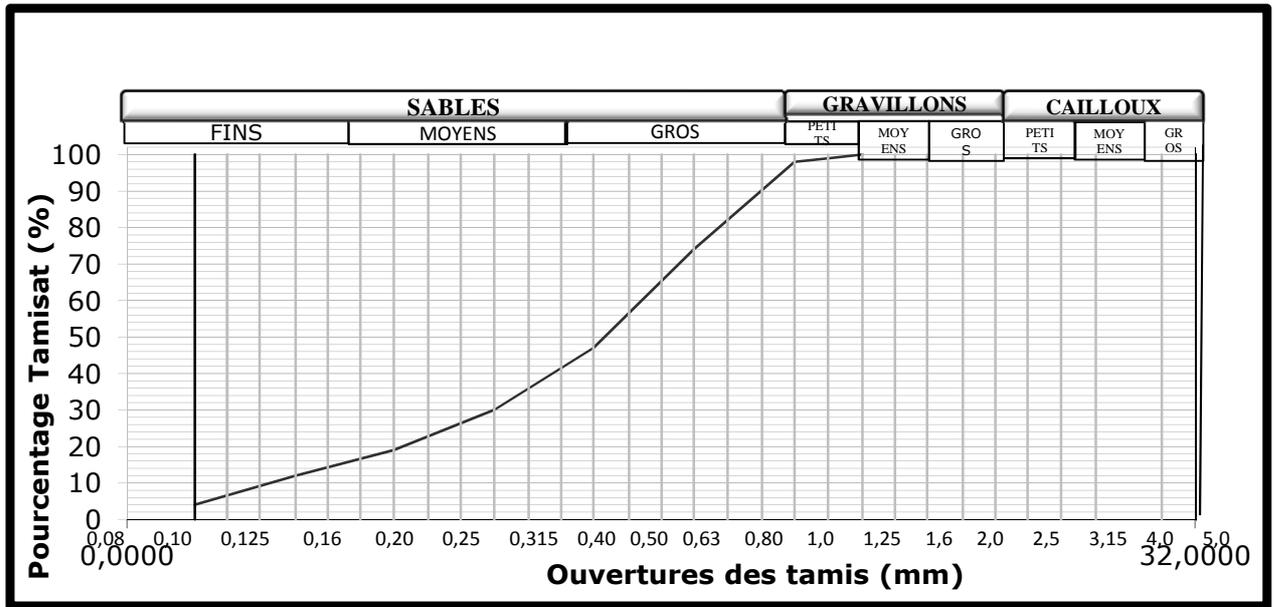


Figure 1.12. Courbe granulométrique des fibres BCR

Tableau 1.4 Résultats de l'analyse granulométrique.

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : P = 1164 grs			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (grs)	Refus cumulés en (%) $R = (Rn/P) \times 100$	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

La courbe granulométrique des fibres métalliques est représentée sur la figure suivante :

1.4.3-Analyse par Diffraction des Rayons X des fibres métalliques (déchets BCR)

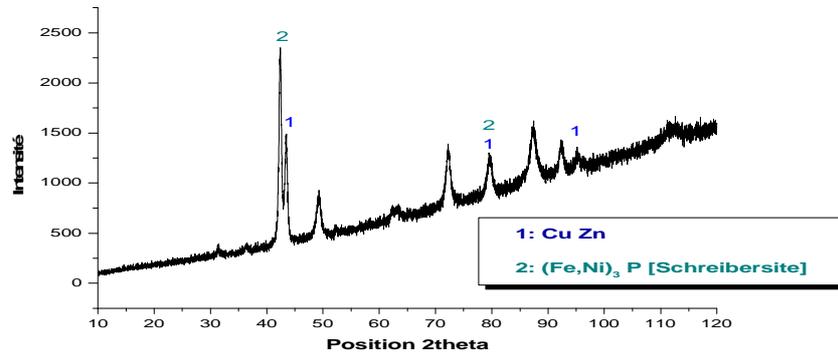


Figure 1.13. DRX des fibres métalliques 10^{-6}

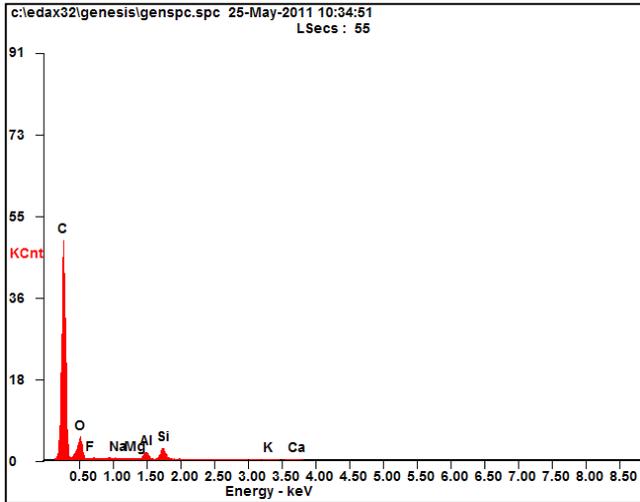
1.4.4-Microscopie électronique a balaye MEB couple a l'EDX.

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 rayonnement sont émis, mais seuls les électrons secondaires et rétro diffusés contribuent à la formation de 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 [35]. Les observations en microscopie électronique à balayage ont été réalisées avec un microscope de type FEI Quanta 200, les échantillons déchet et matériau stabilisé/solidifié sont analysés en état solide (pastille) afin d'exposer le maximum de la couche superficielle aux incidents.



Figure 1.14. Appareil de MEB

Chapitre 1 : Caractéristiques des matériaux utilisés et Formulation



Élément	Wt %	At %
C K	82.73	88.12
O K	11.53	09.22
F K	00.47	00.31
NaK	00.19	00.11
MgK	00.12	00.06
AlK	01.47	00.70
SiK	02.66	01.21
K K	00.38	00.13
CaK	00.46	00.15

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS
SEC TABLE : DEFAULT

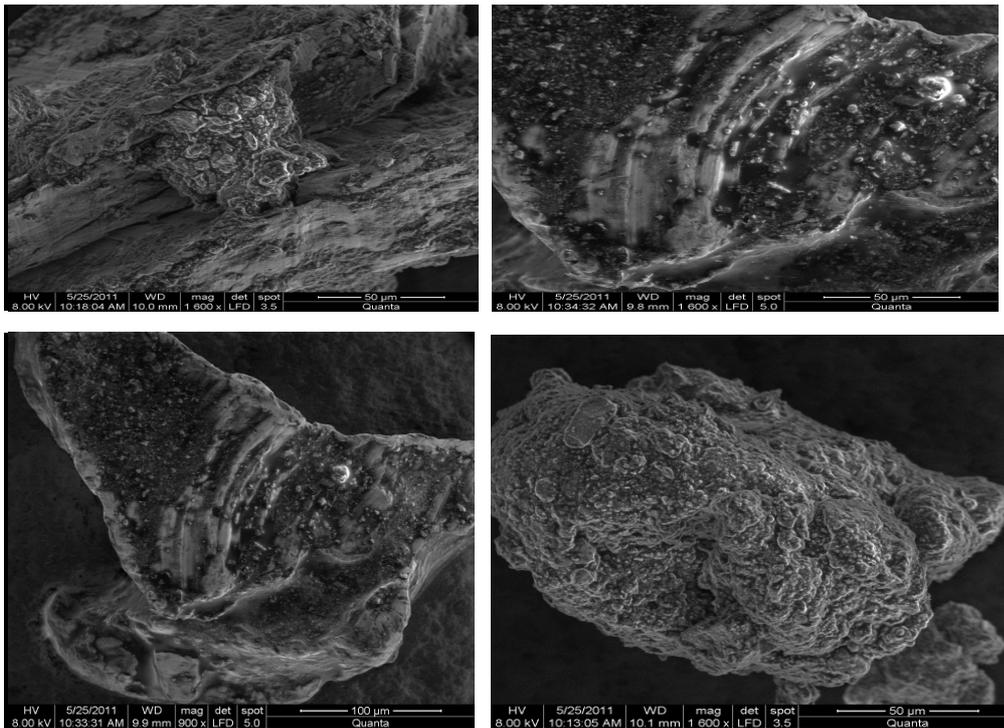


Figure 1.15. Fibre métallique (rejet BCR) sous le MEB

2. Formulation des mortiers

2.1-Dosage et pesée des constituants

Dans le but de connaître les effets des fibres métalliques sur les caractéristiques mécaniques et chimiques des mortiers. Et connaissant le dosage du ciment (450g) ; selon la

Chapitre 1 : Caractéristiques des matériaux utilisés et Formulation

norme **EN 196-1** pour un mortier normal, on peut déterminer le poids du ciment et celui des fibres métalliques aux différents pourcentages.

Dans le cas de la préparation de trois (03) éprouvettes (4x4x16) cm³, les quantités sont respectivement les suivantes :

- **Pourcentage des fibres métalliques dans le mortier :**

Les fibres sont rajoutées en pourcentages (0% ,10%, 20% et 30%) celui de 0% est un mortier témoin, les masses des fibres sont déterminés en substitution de la masse de ciment.

- ❖ **Mortier sans fibres (M0)**

- Sable normalisé → 1350±5g
- Ciment → 450±2g
- Eau → 225±1g
- Le rapport E /C d'un tel mortier est donc 0,5.

- ❖ **Mortier avec 10% de fibres métalliques (M10)**

$$P_{\text{total}} = (P_f + P_c) = 450\text{g.}$$

$$\text{Comme } P_{\text{total}} \rightarrow 100\%$$

$$P_f \rightarrow 10\%$$

On aura $P_f = 45\text{g}$; ce qui nous donne $P_c = 405\text{g}$.

- ❖ **Mortier avec 20% de fibres métalliques (M20)**

$$P_{\text{total}} = (P_f + P_c) = 450\text{g.}$$

$$\text{Comme } P_{\text{total}} \rightarrow 100\%$$

$$P_f \rightarrow 20\%$$

On aura $P_f = 90\text{g}$; ce qui nous donne $P_c = 360\text{g}$

- ❖ **Mortier à 30% de fibres métalliques (M30)**

$$P_{\text{total}} = (P_f + P_c) = 450\text{g.}$$

$$\text{Comme } P_{\text{total}} \rightarrow 100\%$$

$$P_f \rightarrow 30\%$$

On aura $P_f = 135\text{g}$; ce qui nous donne $P_c = 315\text{g}$

Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Chapitre 1 : Caractéristiques des matériaux utilisés et Formulation

Tableau 1.6. Dosage et pesée des constituants

N° de la Série	% des fibres métalliques	fibres métalliques (g)	Ciment (g)	Sable normalisé (g)	Eau (g)
M0	0	0	450	1350	225
M10	10	45	405	1350	225
M20	20	90	360	1350	225
M30	30	135	315	1350	225

2.2-Malaxage de mortier

Le mélange doit être effectué au moyen d'un malaxeur. Avant d'être utilisé pour les différents essais de prise, de résistance ou de retrait et gonflement, ces mortiers sont malaxés pendant 4minutes conformément aux prescriptions de la norme :

-Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment ; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à la vitesse lente.

-Après 30s de malaxage introduire régulièrement le sable normalisé pendant les 30s suivantes pour les mortiers (0% ,10%,20% ,30%) on mélange les fibres métalliques au sable normalisé.

-Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.

-Arrêter le malaxeur pendant 1min 30s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhère aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.

-Reprendre ensuite le malaxage a grande vitesse pendant 60s.

-Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1.7. Opération de malaxage de mortier

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée			30s	30s	30s	15s	1min 15s	60s
État du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide

2.3-Préparation des éprouvettes

La norme EN 196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant la préparation des éprouvettes.

- On prépare le mortier comme indiqué au dessus
- On remplit un moule 4x4x16 cm³ de mortier préparer en deux couches en appliquant à chaque couche 60 chocs à l'aide d'appareil à chocs figure(1.17).
- La face supérieure arasée, les moules sont mis à l'abri de l'air et de la lumière.
- Après 24 h du coulage, les éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau à 20° C ±1°C en attendant le moment de l'essai de rupture (28 jours).



Figure 1.16. Malaxeur



Figure 1. 17. Table à choc

2.4-Conservation des éprouvettes

a)-Conservation pour la résistance a la compression

Une fois démoulées, marquées et éventuellement pesées, les éprouvettes sont conservées entièrement immergées dans l'eau distillée à 20°C±1°C, jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Elles doivent être sorties de l'eau moins de 15minutes avant les essais, elles sont alors essuyées avec un chiffon propre.

b)-Conservation des éprouvettes pour le gonflement

Même procédé de conservation que celui de la résistance.



Figure 1.18. Conservation des éprouvettes du gonflement dans l'eau distillée.

c)-Conservation pour le retrait

La conservation des éprouvettes pour le retrait se fait à l'air libre sans aucune condition.



Figure 1.19. Conservation des éprouvettes pour le retrait à l'air libre

2.5-Démoulage des éprouvettes prismatiques

Les moules remplis de mortier, marqués et placés jusqu'au moment de démoulage dans une salle humide à la température de $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ dont l'humidité relative, est d'au moins 90%.

Chaque moule est extrait de la salle de conservation à l'heure prévue pour son démoulage

Le démoulage est exécuté après 24 heures de sa mise en moule. Le démoulage doit être effectué avec précaution.

Chapitre 2 :

Essais et procédures expérimentales

Essais et procédures expérimentales

Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter des essais sur le comportement mécanique, et la variation dimensionnelle sur les différents mortiers.

Nous présentons également des tests expérimentaux dont ils doivent fournir des paramètres physico-chimiques nécessaires à la modélisation de comportement à la lixiviation. Les procédures expérimentales sont présentées dans ce qui suit selon leurs objectifs, principes expérimentales et modes opératoires.

1-Essais mécaniques

- **Équipement nécessaire utilisé**

- L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme **EN 196-1**. Il est énuméré ci-dessous.
- Le laboratoire où a eu lieu la préparation des éprouvettes, qui doit être maintenu à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50%.
- Un malaxeur normalisé.
- Des moules normalisés à trois compartiments horizontaux permettant la préparation de trois éprouvettes prismatiques de section transversale de $4 \times 4 \text{ cm}^2$ et de 16 cm de longueur.
- Un appareil à choc, la hauteur de chute est de $15 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$ à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.
- Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10 KN avec une vitesse de mise en charge de $50 \text{ N/S} \pm 10 \text{ N/S}$.
- Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN (ou plus) avec une vitesse de charge de $2400 \text{ N/S} \pm 200 \text{ N/S}$.

- **Préparation des éprouvettes**

La norme **EN 196-1** décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant la préparation des éprouvettes.

- On prépare le mortier comme indiqué au chapitre 1.
- On remplit un moule $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ de mortier préparé en deux couches en appliquant à chaque couche 60 chocs à l'aide d'appareil à chocs.

- La face supérieure arasée, les moules sont mis à l'abri.
- Après 24 h du coulage, les éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau à $20^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$ en attendant le moment de l'essai de rupture à 28 jours.

1.1-Essai de traction par flexion

La flexion centrée de l'éprouvette $4 \times 4 \times 16 \text{mm}^3$ est effectuée sur une machine de flexion décrite par la norme **NF EN 196-1**.

Les éprouvettes sont exposées à l'air libre pendant 20 minutes pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité.

Dans notre cas les valeurs sont lues directement sur l'afficheur de l'appareil d'essai.

*charge de rupture : P en N

*la contrainte de traction : R_t en N/cm^2

*Contrainte de flexion : R_f en N/cm^2 .

1.2-Essai de compression

La machine utilisée est une presse hydraulique figure (2.1) décrite par la norme **NF EN 196-1**.

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression.

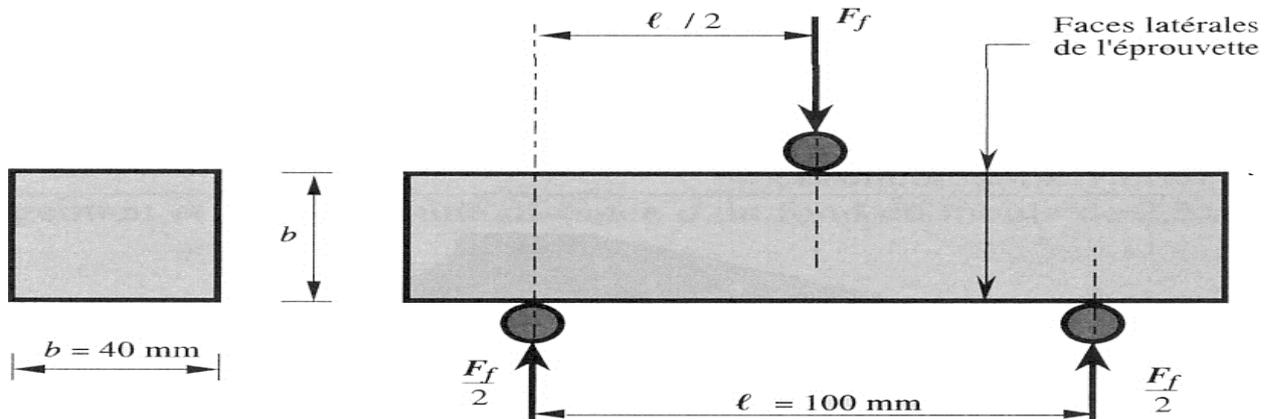


Figure 2.1. Le dispositif de rupture en flexion et en compression

La résistance à la compression:

$$R_c \text{ (Mpa)} = F_c / 1600 \text{ (N /mm}^2\text{)}$$

F_c : est la charge de rupture de l'éprouvette en compression

Les résultats obtenus pour chacun des 6 demi-prismes sont arrondis à 0,1 Mpa près et on fait la moyenne. Si l'un des 6 résultats diffère de $\pm 10\%$ de cette moyenne, il est écarté et la moyenne est alors calculée à partir des 5 résultats restants. Si à nouveau un des 5 résultats s'écarte de $\pm 10\%$ de cette nouvelle moyenne, la série des 6 mesures est écartée.



Figure 2.2. Presse hydraulique

2-Mesure du retrait et du gonflement sur éprouvettes du mortier (NF P15-433)

❖ Objectif de l'essai :

Il s'agit d'évaluer le retrait ou le gonflement, que provoque le ciment étudié sur de éprouvettes du mortier normal.

❖ Principe de l'essai :

On compare, à différent temps t , la variation de longueur d'une éprouvette $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, par rapport à un temps t_0 pris pour origine.

❖ Équipement nécessaire :

Il est décrit dans la norme **NF P15-433**

-Une salle dont la température est maintenue à $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et l'humidité dite relative à $50\% \pm 2\%$.

-Un malaxeur normalisé.

-Des moules équipés de plots de retrait en laiton. Les plots sont vissés au moules au moment de la mise en place du mortier puis désolidarisés du moule avant le démoulage. Après durcissement, les éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ sont donc munies à leurs deux extrémités de plots.

-Un déformètre équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une exactitude inférieure ou égale à 0,005 mm. Une tige de 16 cm de longueur doit permettre à régler le zéro du déformètre. Cette tige est en Invar de façon à ce que les variations de

température qu'elle peut connaître au cours de la manipulation n'entraînent pas de modification appréciable de sa longueur.

❖ **Conduite de l'essai :**

Au moment de la mesure, le comparateur est mis à zéro sur la tige étalon en Invar de longueur $L=160$ mm. Soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t ; l'éprouvette à une longueur au temps considéré :

$$l=L+dl(t).$$

soit $l(t_0)$ la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisis pour l'origine. En général cette origine est prise au moment de démoulage, soit 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera :

$$\Delta l=l(t)-l(t_0)=dl(t)-dl(t_0)$$

$\Delta l(t)$ est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air $\Delta l(t)$ est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, $\Delta l(t)$ peut être positif : il y a alors gonflement.



Figure 2.3. Appareil de mesure du retrait et du gonflement

✓ **Mesure de variation la masse des éprouvettes**

✚ **Définition**

En plus du retrait ou du gonflement on désire mesurer la variation de masse, pesée à 0,1g pour chaque série d'éprouvettes.

Éventuellement, la masse de l'éprouvette est déterminée à chacun des temps ou est effectuée une mesure de longueur.

La différence entre cette valeur et le masse au démoulage, exprimée en pourcentage de cette dernière, représente la perte de masse au retrait, ou augmentation de masse pour le gonflement.

A chaque fois qu'on mesure le retrait et le gonflement on pèse les éprouvette les résultats sont regroupés dans les tableaux suivants respectivement :

Expression des résultats

Pour chaque prisme des séries d'éprouvettes il faut calculer le rapport :

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

Avec :

ΔM = variation de masse par rapport à la masse au moment du démoulage.

M = masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

✓ **Mesure du pH :**

A chaque fois qu'on mesure la variation de la masse pour gonflement, on prend une quantité de l'eau distillée pour mesurer le pH à l'aide d'un appareil multi-paramètres (figure 2.2). La mesure du pH s'effectue directement par une électrode en verre combiné relié à cet appareil.



Figure2.4. Appareil multi-paramètres

✓ **Mesure de la conductivité électrique (CE)**✚ **Définition**

La conductivité est la propriété que possède une eau pour favoriser le passage d'un courant électrique, elle fournit une indication précise de la teneur en sels dissous (salinité de l'eau). La conductivité s'exprime en micro siemens par centimètre, la mesure de la conductivité permet d'évaluer la minéralisation globale de l'eau. Sa mesure est utile car au-delà de la valeur limite de la salinité correspond à une conductivité de 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la prolifération de microorganismes peut être réduite. [36]

✚ **Mode opératoire**

Pour la mesure de la conductivité électrique nous avons utilisé le même multi paramètre que le pH, seulement avec une autre sonde destinée pour la conductivité.

3- Tests physico-chimiques**3.1-Test de Lixiviation Monolithe (TLM)**

les tests de lixiviation effectués sur les blocs monolithiques sont conformes à la procédure d'évaluation approfondie des procédés de stabilisation/solidification à base de liants hydrauliques proposée par l'ADEME [37].



Figure 2.5. Test Lixiviation Monolithe dans deux milieux

❖ Objectif du test

L'objectif de ce test dynamique (renouvellement périodique du lixiviant) est de suivre le relargage de polluants inorganique contenus dans un materiau monolithique poreux et de caractériser les mécanismes de transfert en solution de ces polluants. Des variantes de ce test peuvent également être mises en œuvre dans le but de mettre en evidence l'influence de certains paramètres sur l'intensité ou la dynamique de relargage des éléments contenus dans le monolithe.

❖ Principe du test

Pour le test TLM, un bloc monolithique de dimensions connues est mis en contact avec une solution de lixiviation de volume fixe. le lixiviant est renouvelé à des durées de contact choisies de l'analyse des lixiviant obtenus. A chaque renouvellement de la solution de lixiviation, le ratio L/S_f est maintenu constant.

❖ Procédure expérimentale

les blocs monolithiques à lixivier sont obtenus en séparant les éprouvettes lors du moulage en quatre parties égales dans le but d'avoir des cubes de cotés proches de 4cm. On prend les blocs de mortier à 10% de fibres métalliques, car c'est à 10% de dechet qu'on a eu la meilleure résistance mécanique.

Les masses et dimensions des blocs sont mesurées précisément afin de calculer ses paramètres physiques(volume, surface, hauteur équivalente...etc).

a)-Conservation du bloc dans un milieu neutre

Un cube monolithique (non séché) est mis en contact avec le lixiviant, eau déminéralisée, en choisissant la rapport volume de liquide(en cm^3)/surface de l'échantillon S(en cm^2). A priori la valeur de $L/S_f=10$ cm devrait permettre dans la plupart des cas de garantir un comportement dynamique, c'est-à-dire suffisamment éloigné des conditions ou l'approche des conditions ou l'approche des conditions stationnaires limite le relargage. le risque étant alors d'obtenir des compositions inférieures à certaines seuils de détection ; dans le cas des matériaux très peu polluants le ratio $L/S_f=2$ cm peut s'averer plus approprié.

Dans notre cas la matrice est fabriquée par un mélange d'eau, sable normalisée, du ciment, et du dechet BCR, comme polluants plausibles. le bloc monolithique, pour chaque matériau, est placé dans une éprouvette en verre de volume d'un (01) litre ; suspendu par un fil permettant au lixiviant de circuler librement, donc le transfert de matière peut ainsi s'effectuer par toutes les phases de bloc. les éprouvettes utilisées sont bien fermés afin d'éviter l'évaporation des solutions et l'entrée d'air qui entraine différents processus physico-chimique tel que la

carbonation des solutions de lixiviation ce qui donne des faux résultats. L'expérience est réalisée à température ambiante $20\pm 1^\circ\text{C}$ et à l'abri de la lumière. Le rythme de changement des solutions est imposée par les temps de contact matrice/solution de 6h, 18h, 24h, 2j, 3j, 5j, 7j, 20j et 28 jours donc un totale de 64 jours de lixiviation à caractériser de ces paramètres physico-chimiques sont soigneusement égouttés, sur toutes ces faces, et réintroduites dans les éprouvettes de lixiviation, Un nouveau volume d'eau déminéralisée et une nouvelle séquence de lixiviation commence.

A chaque renouvellement du lixiviant, le temps de contact du bloc avec l'air doit être réduit au maximum.

Par suite, on analyse les paramètres physico-chimiques des éluates obtenus de notre matériau ; pH et la conductivité électrique. La solution est ensuite divisée en deux parties ; une acidifiée pour la SAA et une autre non acidifiée pour les dosages des éléments.

b)-Conservation dans un milieu sulfaté

✓ préparation de la solution

pour préparation on a besoin de :

- une fiole de 1L remplie d'eau distillé
- 50g de sulfate de sodium.

Il faut agiter le mélange jusqu'à ce que les sulfates de sodium soit complètement dissolu.

✓ Conservation

c'est la même procédure que celle de l'eau distillée, mais au lieu de conserver dans ce milieu, on conserve dans la solution préparée.

3.2- Test de lixiviation TCLP (Toxicité Characteristic Leaching Procédure)

❖ 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 sur la poudre des mortiers à 10% de fibres métalliques. 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.

❖ 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 mortier qui contient 10% de fibres métalliques (réduit en poudre) d'une taille >2 mm 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 [38].

✚ Preparation de la poudre analysée

Les matériaux granulaire sont obtenues par brayage à sec jusqu'à une granulometrie inferieur a 100µm.

➤ Echantillonnage

Avant de procédé à une analyse quelconque d'un echantillon solide,celui-ci subit un traitement mécanique qui est la plus délicate pour obtenir un echantillon représentatif.Pour atteindre ce but, nous appliquons les différents procédés mécaniques suivants :

➤ Concassage

Cette opération sert à reduire les dimensions des blocs de matiere premiere à une graulométrie de l'ordre de quelques milimétre. Pour réaliser cette réduction nous avons utilisé le concasseur du laboratoire L.T.M.G.P qui est présenté dans la figure(2.6).



Figure 2.6. Conasseur du laboratoire LTM G.P

Pour la suite c'est la même procédure que celle du chapitre 1(Préparation mécanique d'un échantillon représentatif).

3.3-dosage des chlorures

❖ Principe

Les chlorures sont dosés en milieu neutre ou sulfaté 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 [39].

❖ Mode opératoire

Pour réaliser ce dosage on a utilisé les solutions suivantes :

- Solution de chromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) comme indicateur colore ;
- Solution de nitrate d'argent ($AgNO_3$) de 0,01N.

On ajoute à l'aide d'une pipette 1ml d'indicateur coloré à un volume d'échantillon, après par nitration progressive de nitrate d'argent jusqu'au changement de couleur :



La formule suivante est utilisée pour obtenir la concentration du chlorure :

$$[Cl^-] = [(N * V)_{AgNO_3} * 35,5 * 1000] / V_{\text{échant}}$$

Avec : N_{AgNO_3} : normalité de $AgNO_3 = 0,01N$; V_{AgNO_3} ; Volume de $AgNO_3$;

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

3.4-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.

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

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 10% de déchet) en broyant finement le produit solide (0.002g) avec le Bromure de Potassium KBr (0.008g), 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 [40].

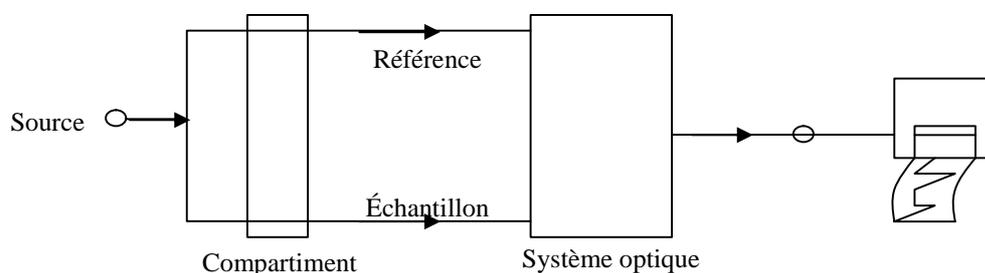


Figure 2.7. Schéma de principe d'un spectrophotomètre IR à double faisceau [39].

3.5-Analyse par spectromètre UV Visible

La spectro niveau fondamental photométrie Visible est une méthode d'analyse quantitative et qualitative qui présente un grand intérêt pour le dosage des anions.elle est fondé sur la mesure de la quantité d'énergie absorbée par les molécules traversées par un faisceau de lumière monochromatique.l'énergie absorbée correspond à une transition électronique d'un à un niveau excité [40].

❖ Principe

Le principe de l'appareillage est basé schématiquement sur un ensemble formé par une source lumineuse, un système optique dispersif et un détecteur. Cet ensemble nous permet d'obtenir un spectre UV Visible sous forme de courbe d'absorbance A en fonction de la longueur d'onde λ , et de réaliser un dosage en faisant varier l'absorbance en fonction de la concentration. La limite peut atteindre parfois une valeur en concentration estimée à quelque ppm seulement.

L'intensité de cette absorption est en fonction de l'espèce absorbée, elle est exprimée par la loi de Beer-Lambert [41].

$$A = \log I_0/I = \epsilon \cdot l \cdot C$$

Avec :

A: Absorbance;

I_0 : intensité initiale;

I : intensité transmise ;

ϵ : coefficient d'extinction ou d'absorptivité des particules dissoutes ;

l : épaisseur de la cellule de mesure;

C : concentration de la solution en particules considérées;

La diminution de l'intensité lumineuse d'une radiation monochromatique est proportionnelle au nombre de particules qui absorbent la lumière.

✓ Validité de la loi de Beer-Lambert

- La lumière utilisée doit être monochromatique.
- Domaine de concentration doit être faible ($<10^{-3}M$).
- La solution ne doit pas être hétérogène ou fluorescente.

Cette analyse dépend de la construction d'une courbe d'étalonnage qui doit être linéaire dans le domaine des concentrations choisies, à partir des solutions de concentrations connues des composés à doser. Cette courbe est une droite d'équation $A = aC + b$, qui permet de déduire la concentration de la solution inconnue.

❖ Préparation des échantillons

✓ Principe du dosage des sulfates

Les sulfates sont précipités en milieu chlorhydrique à l'état de sulfate de baryum. Le précipité ainsi obtenu est stabilisé à l'aide d'une solution «tween 20».

Les suspensions homogènes sont mesurées au spectromètre.



Les réactions utilisées sont:

- Solution d'acide chlorhydrique au 1/10
- Solution de «tween 20» à 25%.....20 ml
- Solution de chlorure de baryum.....10g
- Eau distillée.....100 ml

Dans un tube à essai on introduit successivement :

- L'échantillon à analyser39 ml
- Acide chlorhydrique au 1/10.....1 ml
- Solution de chlorure de baryum + «Tween 20».....5 ml

On prépare dans les mêmes conditions un tube témoin en remplaçant l'échantillon à analyser par de l'eau distillé [37]. Puis on agite énergiquement et on laisse reposer 15 minutes. On agite de nouveau et on fait la lecture au spectromètre UV à la longueur d'onde 620 nm

A des fins analytiques, nous obtenons habituellement des spectres d'absorptions UV-visible en solution. Pour cela, nous utilisons un solvant optiquement pur que nous nous procurons dans le commerce et nous mesurons les transitions permises pour une concentration de l'ordre de $10^{-4} \text{ mol.l}^{-1}$. Pour les bandes de faibles intensités correspondant aux transitions interdites, la concentration doit être significativement plus grande. Le schéma optique d'une spectrophotométrie simple faisceau est représenté par la **figure 2.8**.

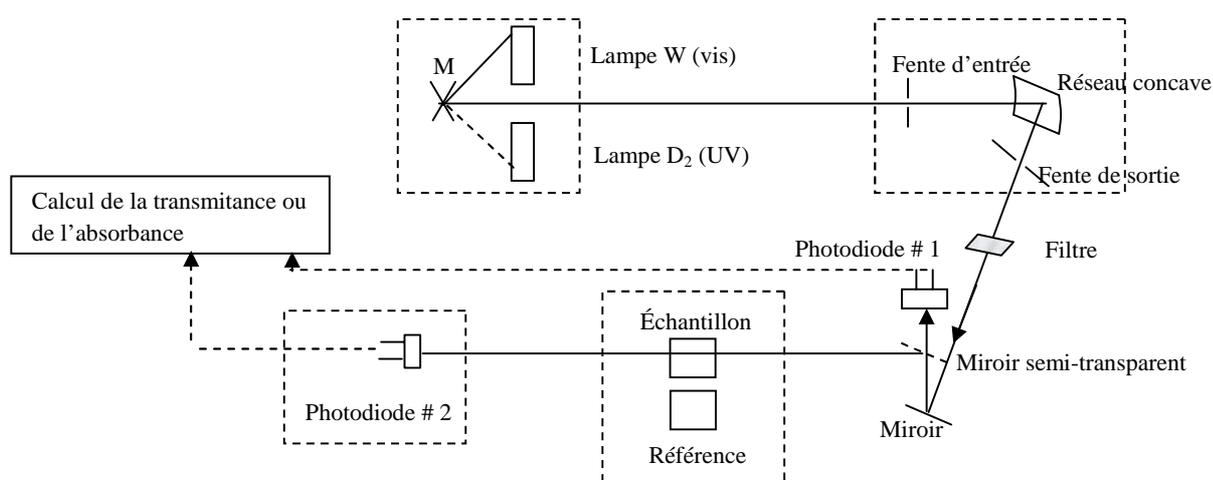


Figure 2.8. Schéma optique d'une spectrophotométrie simple faisceau [42]

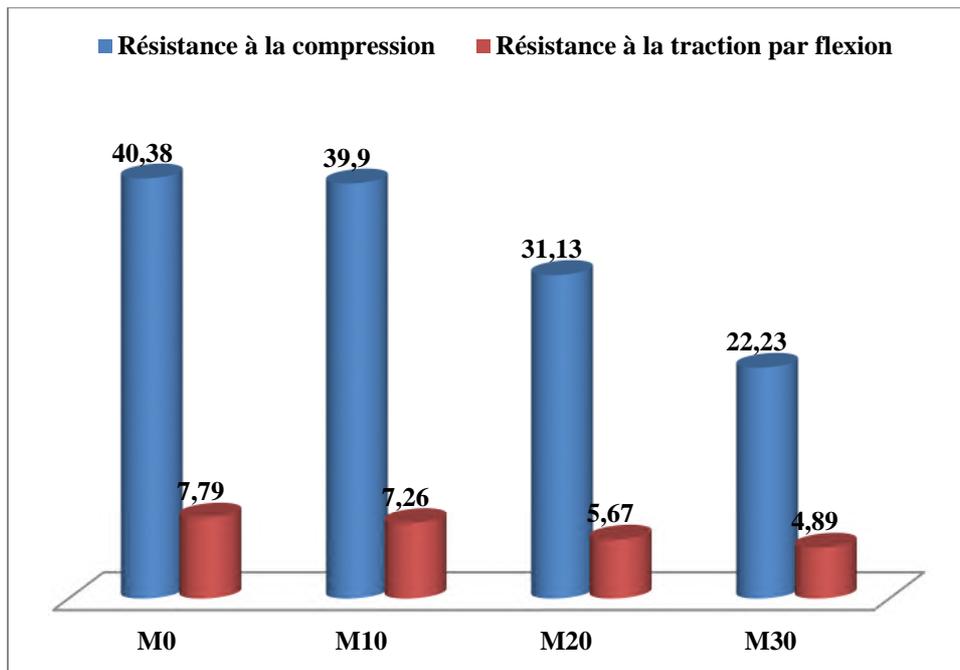
Chapitre 3 :

Résultats et discussions

Résultats et discussions

1-Comportement mécanique (résistance à la compression et à la traction)

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux des annexes B, C et représentés sur l'Histogramme suivante :



Histogramme 3.1. Les résistances mécaniques des mortiers à 28 jours

D'après l'histogramme ci-dessus, on remarque que la résistance à la compression et à la traction par flexion à l'âge de 28 jours diminue au fur et à mesure d'augmenter le pourcentage des fibres métalliques, mais celle du mortier à 10% et 20% de fibres sont de bonnes résistances.

Cet abaissement est dû à la présence des fibres métalliques et à la diminution de la quantité de ciment dans le mélange donc l'augmentation du rapport E/C qui fait diminuer la compacité ce qui influe sur la résistance

On peut dire que la tenue mécanique des matériaux se distingue par la nature et le pourcentage des fibres incorporé dans les matériaux.

2-Mesure de retrait et du gonflement sur les éprouvettes du mortier

2.1-Retrait de dessiccation

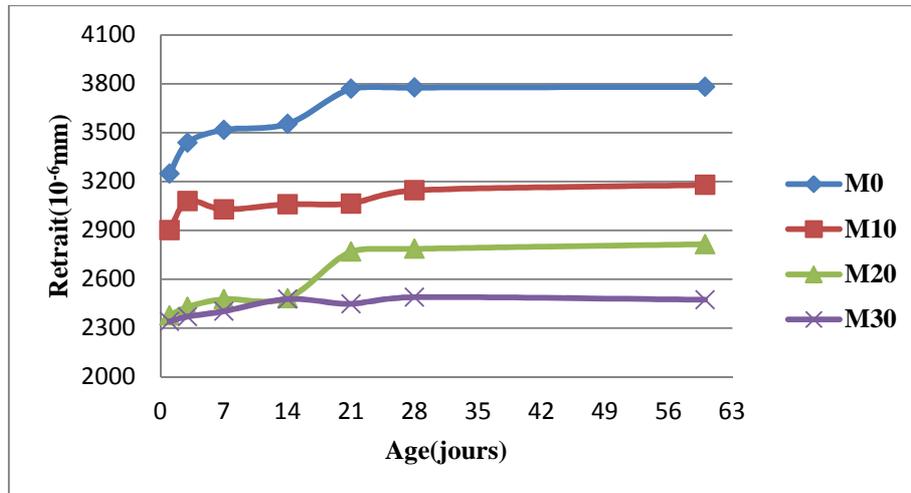


Figure 3.1. Retrait de dessiccation

On sait que la réaction d'hydratation s'accompagne d'une réduction de volume, appelée contraction. L'eau s'évapore d'un mortier conservé à l'air libre provoquant le retrait, qui est la conséquence de la perte d'eau libre, lorsque cette eau se retire du matériau, une contraction se produit automatiquement.

Les résultats présentés ci-dessus montrent un comportement de contraction des éprouvettes à différents âges de mesure (1j, 3j, 7j, 14j, 21j, 28j, 60j), et à différents pourcentages des FMI (0%, 10%, 20%, 30%), les changements volumiques se produisent après la prise. La variation du retrait des éprouvettes des mortiers à différents pourcentages sont presque du même ordre de grandeur mais celui de mortier témoin reste le plus grand, donc l'utilisation des FMI réduit le retrait et ça est dû à l'augmentation des pores capillaires qui emprisonne l'eau et l'empêche de s'évaporer, la diminution de la quantité du ciment provoque la diminution de son hydratation ce qui traduit la diminution du retrait.

Remarque :

Pour tous les mortiers nous remarquons une évolution continue de retrait en fonction de l'âge donc on peut dire que le retrait évolue en fonction du temps, par évaporation de l'eau emprisonnée dans les mortiers et par dessiccation, on remarque d'après la figure (3.1) que cette évolution commence à se stabiliser à partir du 28 jours.

✓ Variation de la masse

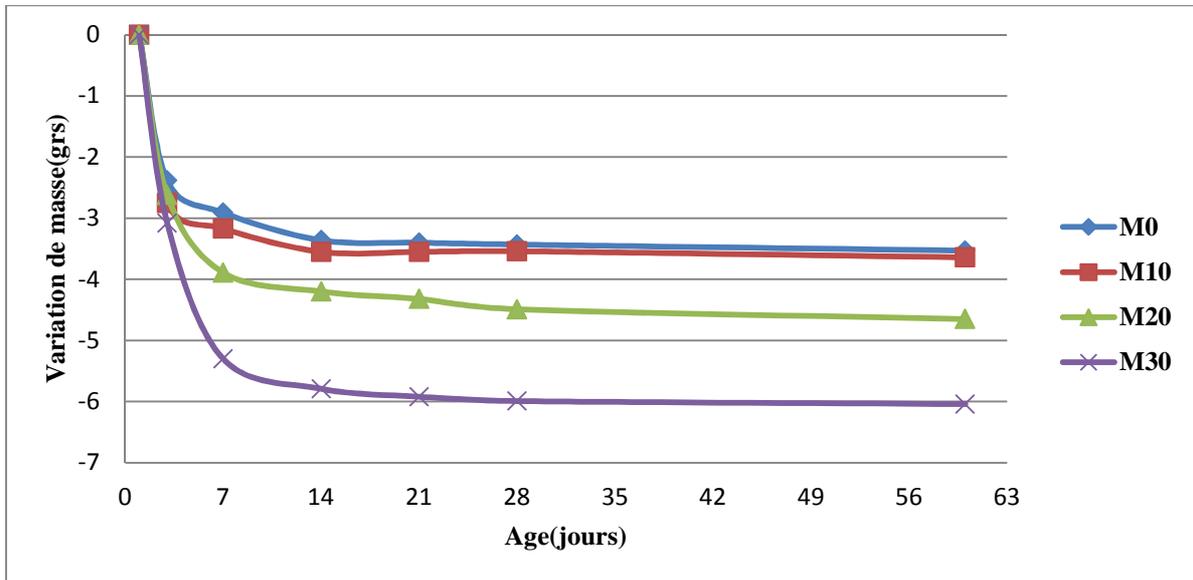


Figure 3.2. Variation de la masse

On sait que le retrait s’accompagne systématiquement d’une diminution ou d’une perte de masse, la figure 3.2 nous montre que la perte de masse augmente en fonction du temps, et commence à se stabiliser a partir de 28 jours pour tous les mortiers à différents pourcentages de fibres métalliques.

Le mortier sans FMI a une perte de masse plus importante, cependant il a plus d’évaporation d’eau, se qui dû à une hydratation plus importante du ciment.

2.2-Gonflement

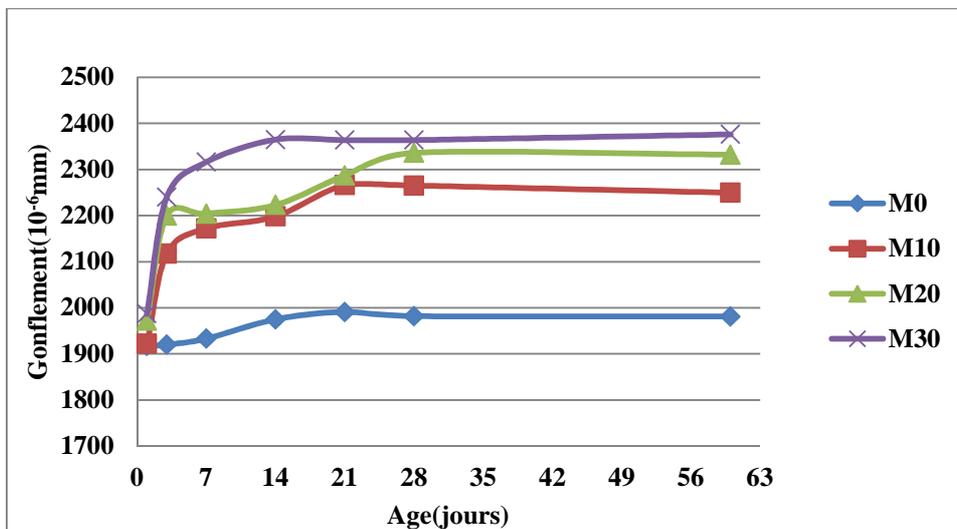


Figure 3.3. Gonflement

La figure (3.3) nous montre que le gonflement augmente en fonction du temps et du pourcentage des fibres métalliques en substitution de quantité du ciment, et il commence à se stabiliser à partir de 28 jours. L'augmentation du gonflement s'explique par la présence d'une quantité d'eau importante dans les pores créée par le manque d'hydratation du ciment et l'ajout des fibres métalliques.

✓ **Variation des masses**

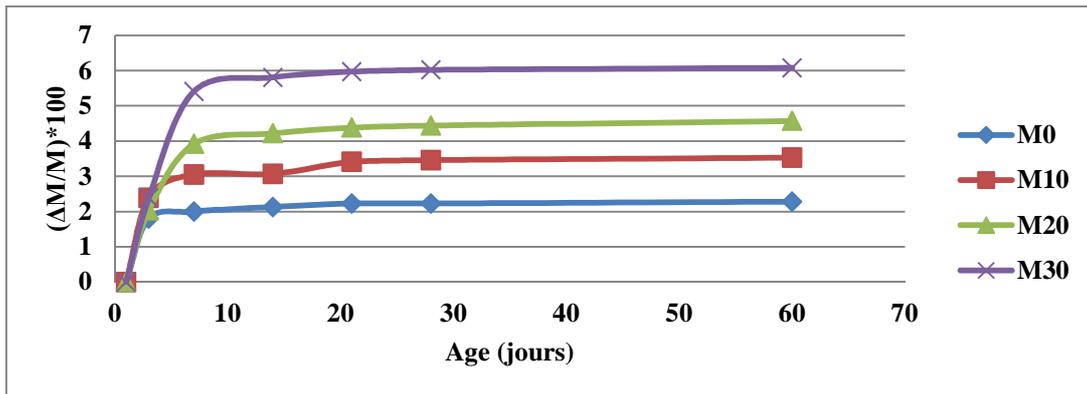


Figure 3.4. Variation des masses

La figure (3.4) nous montre que la variation des masses pour le gonflement est proportionnelle à celle du gonflement lui-même, l'augmentation de la masse est due à la quantité d'eau absorbée par les éprouvettes du mortier.

3-Analyses physico-chimiques des milieux de conservation

✓ **L'évolution du pH**

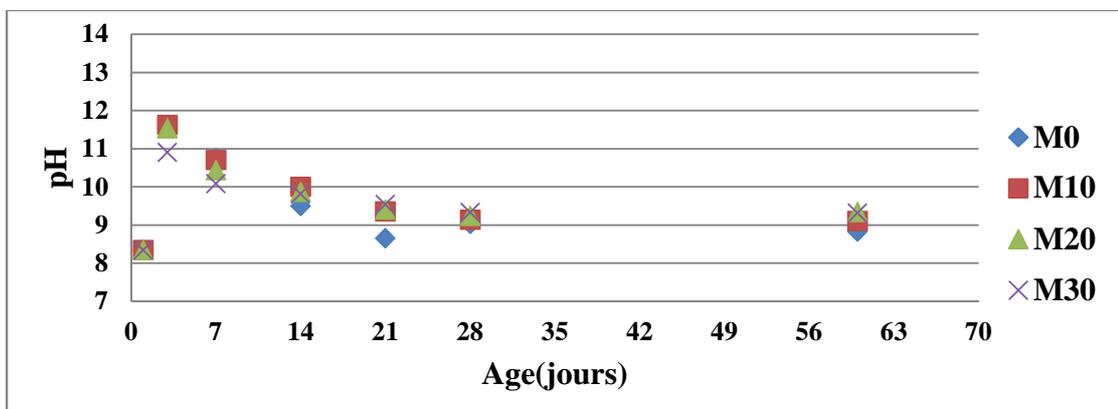
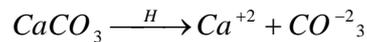


Figure 3.5.Évolution du pH

D'après la figure ci-dessus, on remarque que tous les mortiers ont le même niveau de basicité qui se rapproche du $\text{pH} = 12$ cette basicité est due au relargage progressif et continu des espèces telles que le sodium et le potassium qui forment avec l'eau des bases alcalines de NaOH et KOH respectivement.

Une chute de pH ($\text{pH} = 9$) est observée grâce à la dissolution des carbonates (provenant du sable) selon la réaction suivante:



✓ Mesure de conductivité électrique

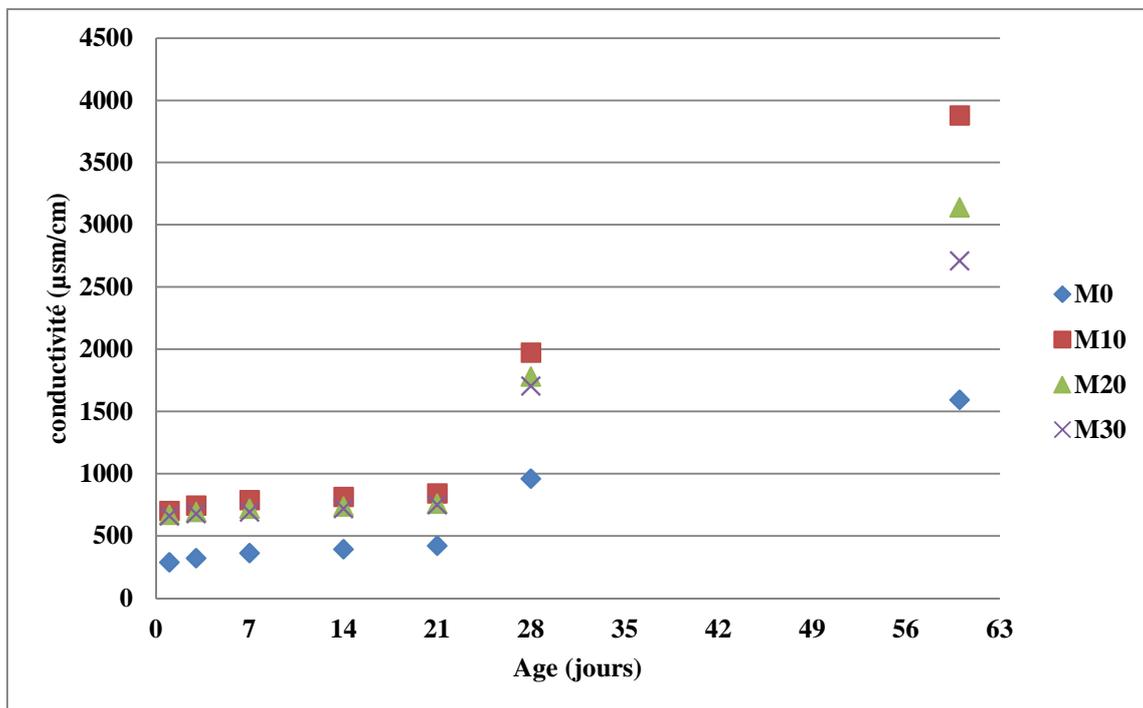


Figure 3.6. Conductivité électrique

On observe d'après la figure (3.6) un accroissement de la conductivité électrique cette augmentation est due au relargage des espèces chimiques et immigration ces éléments du matériau vers la solution de conservation.

Le relargage continu progressivement ce qui induit le phénomène de fatigue et c'est ce qui explique la diminution soudaine de la conductivité.

4-Testes de lixiviation dynamique et caractérisation

- Test de Lixiviation Monolithe (TLM)
- ✓ Variation de la masse

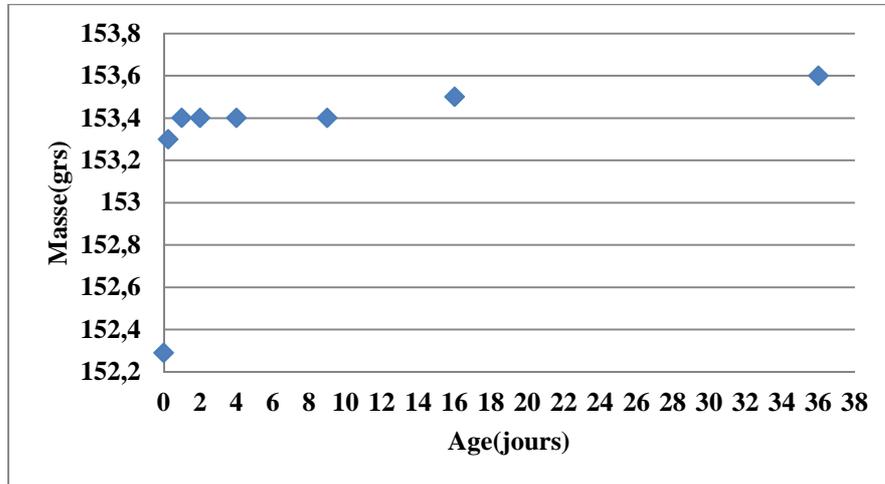


Figure 3.7. Variation de masse (milieu neutre)

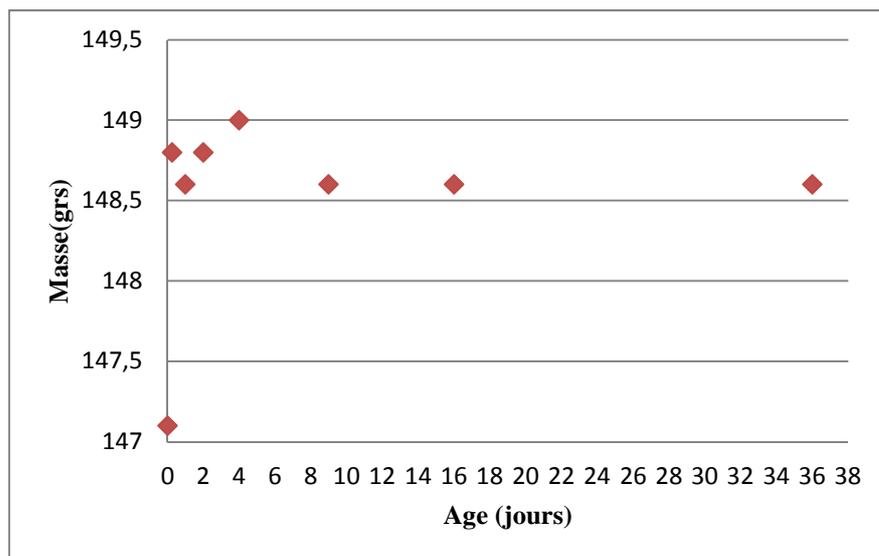


Figure 3.8. Variation la masse (milieu sulfaté)

On remarque que la masse augmente avec le temps pour les deux milieux, la présence des pores capillaires dans le bloc de mortier créés par la présence des FMI provoque l’absorption de la solution du milieu de conservation par le bloc du mortier, c’est le phénomène du gonflement se qui explique l’augmentation de la masse.

✓ L'évolution du pH

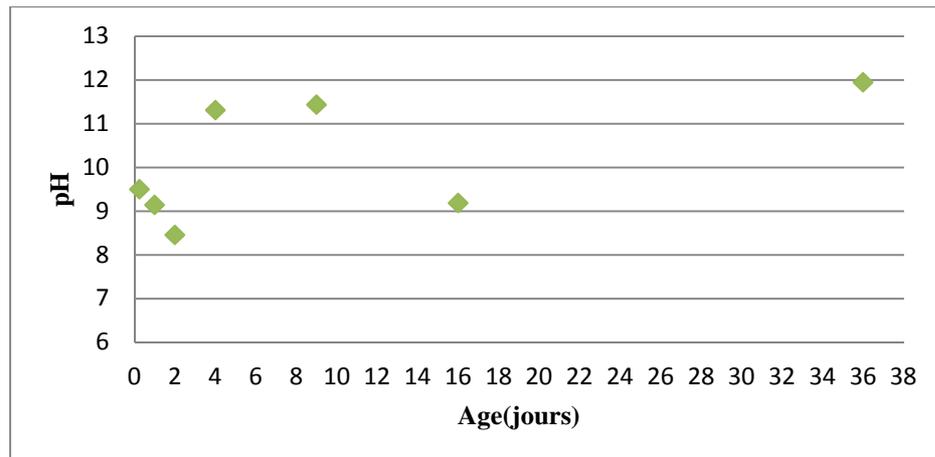


Figure 3.9. Évolution du pH (milieu neutre)

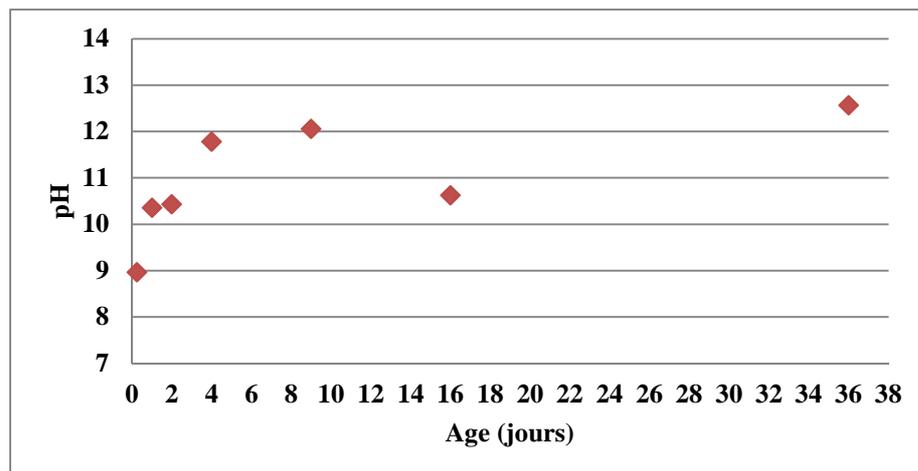
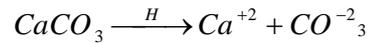


Figure 3.10. Évolution du pH (milieu sulfaté)

Les figures montrent un niveau de basicité pour le matériau étudié qui se rapproche du $\text{pH} = 12$, cette basicité est due au relargage des alcalins (Na^+ , K^+) qui réagissent avec les hydroxydes de la solution de lixiviation pour former les bases de NaOH et KOH respectivement ;

- ✓ Entre un $\text{pH} = 11$ et 12 , le pH il y'a eu la consommation des espèces contenant des alcalins et à Influence de la Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) qui est consommée (à $\text{pH} = 12,4$ pour le milieu sulfaté) et à la présence des Silicates de Calcium hydratés (C-S-H) dont la limite de stabilité se trouve à $\text{pH} = 11$ pour les deux milieux.

- ✓ Une chute de pH est observée pour le matériau dans les deux milieux à PH=8 et 10 grâce à la dissolution des carbonates (provenant du sable) selon la réaction suivante:



- ✓ **Conductivité électrique**

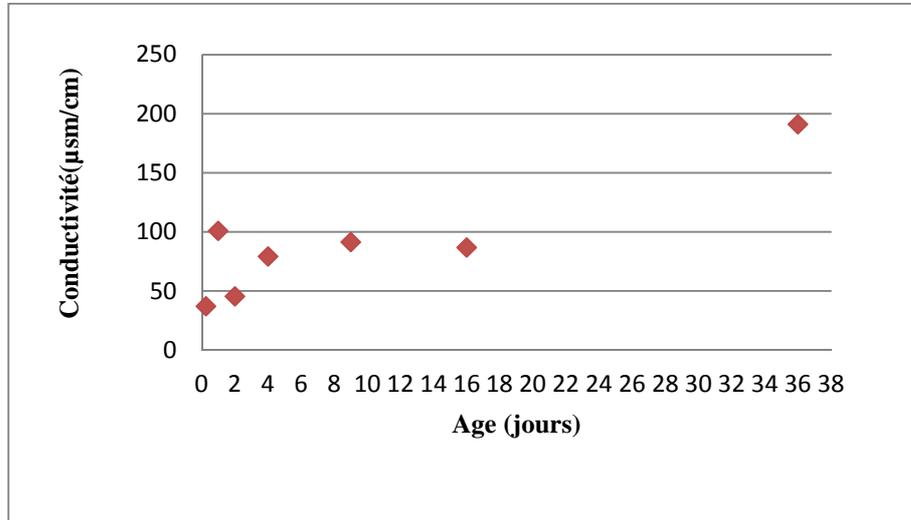


Figure 3.11. Conductivité électrique (milieu neutre)

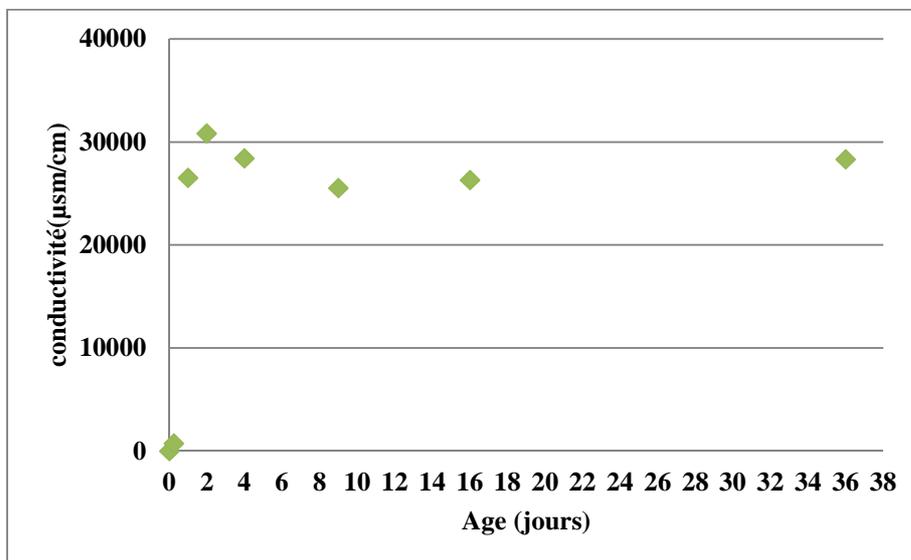


Figure 3.12. Conductivité électrique (milieu sulfaté)

On remarque d’après la figure (3.9) une évolution de la conductivité cette augmentation est due à la dissociation des différentes phases et l’augmentation de la force ionique dans le milieu.

Pour le milieu sulfaté on remarque une augmentation maximale dans les premier temps et ca est dû au phénomène de lessivage et à la concentration des ions sur la surface du bloc, la diminution de conductivité électrique s’explique par la difficulté d’arracher des ions qui sont piégés dans la matrice cimentaire par les sulfates.

5-Dosage des chlorures

✓ **Milieu neutre**

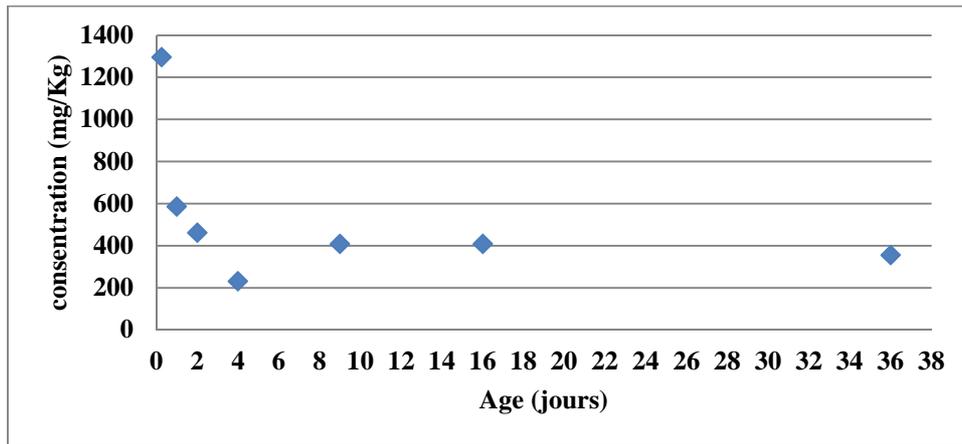


Figure 3.13. Dosage des chlorures (milieu neutre)

A 6h il on a eu un grand dosage des chlorure qui du au phénomène de lessivage et la présence de chlorures dans l’échantillon étudié, on remarque une diminution du dosage des chlorures a 18h et 24h ça c’est du a la difficulté d’arrachement des chlorures qui sont très bien piégés dans la matrice cimentaire, après il y’a eu augmentation du dosage ce qui s’explique par la diffusion des phases des chlorures qui ont résisté.

✓ **Milieu sulfaté**

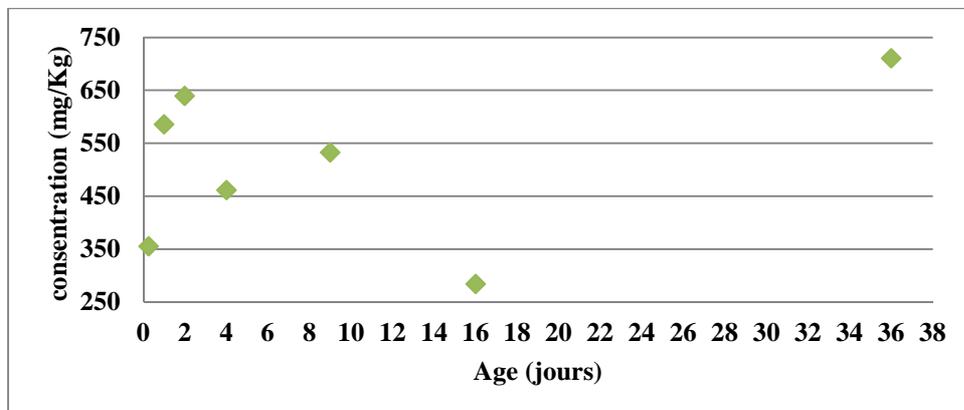


Figure 3.14. Dosage des chlorures (milieu sulfaté)

Dans ce milieu il y'a l'inverse du milieu neutre (augmentation puis diminution) donc les premiers temps il ya eu une grande diffusion des chlorures, la diminution est due à la difficulté d'arrachement des chlorure et phénomène de fatigue dans le mortier.

6- Caractéristiques des matériaux par des rayon X

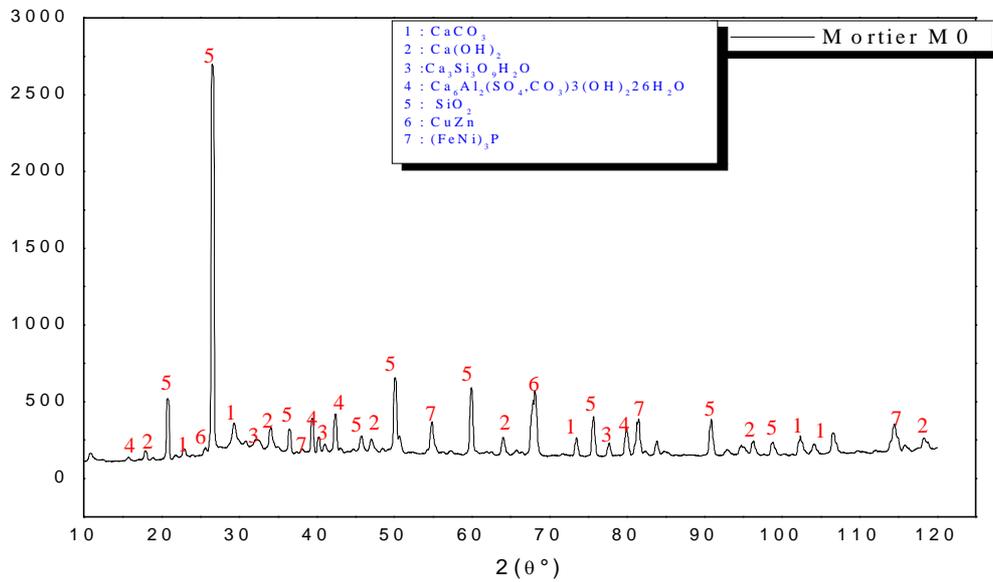


Figure 3.15. Spectre DRX de mortier M0

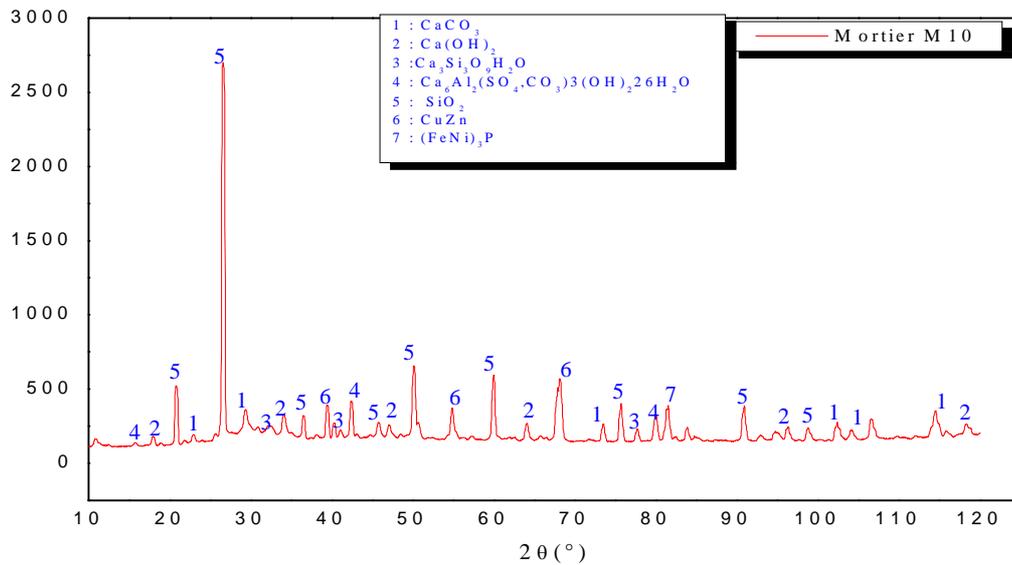


Figure 3.16 Spectre de DRX de mortier M10

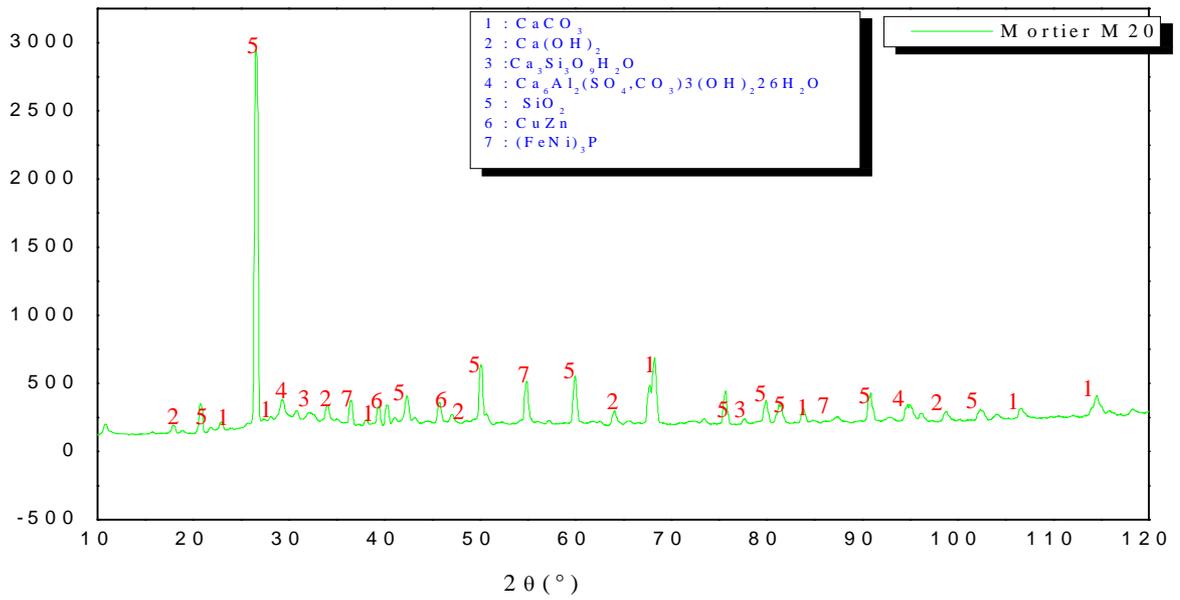


Figure 3.17. Spectre de DRX de mortier M20

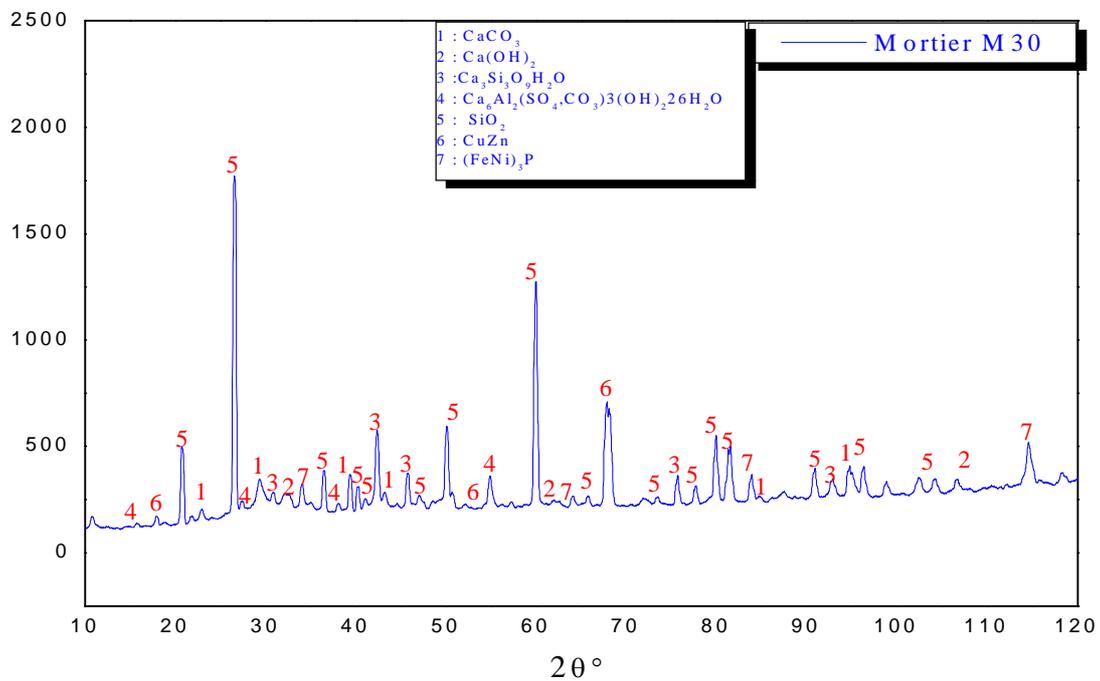
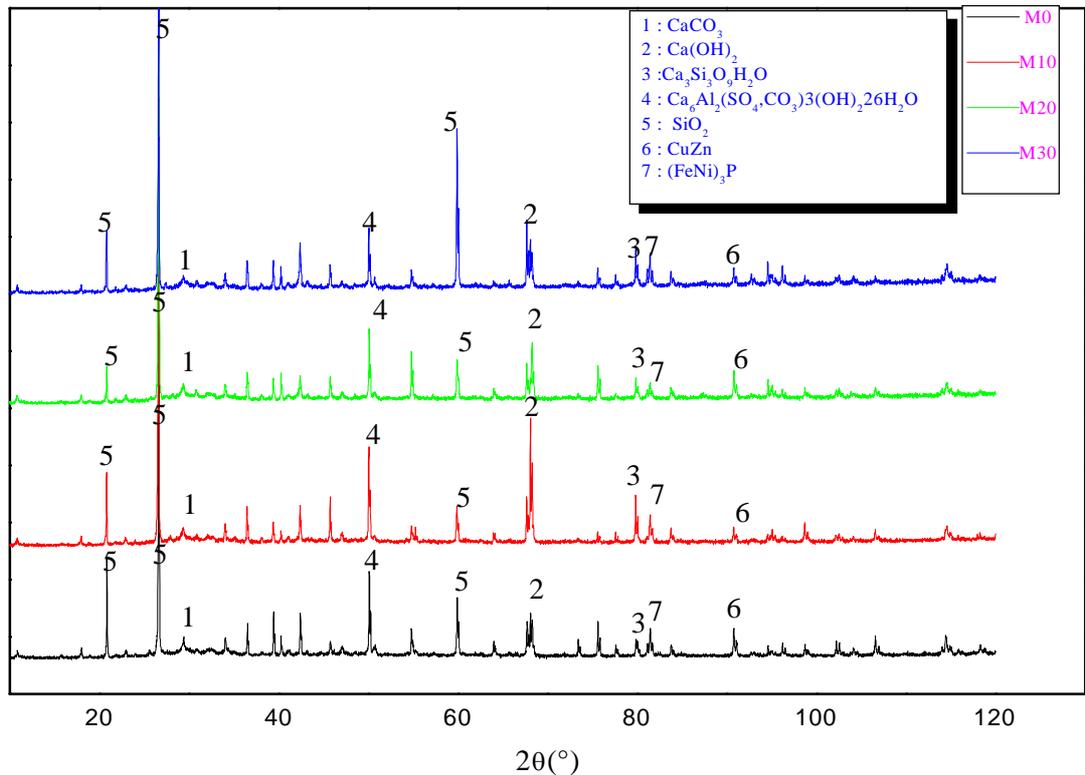


Figure 3.18 Spectre de DRX de mortier M30



3.19. Spectres obtenus par DRX de tous mortiers

La figure présente les spectres de diffractomètre aux rayons X des échantillons des mortiers broyés et passés aux tamis de 0.5 mm.

Nous constatons que tous les spectres obtenus présente une série de pic de diffraction bien définis et elles sont majoritairement identique c'est-à-dire on n'a pas remarqué un décalage de pic la présence des différentes phases du ciment avant hydratation (ciment CPA C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) et après hydratation (portlandite, ettringite silicate de calcium....) dans tous les échantillons des mortiers étudiés l'apparition de nouveaux pics dans les mortiers contenant les fibres métallique s'explique par la création de nouvelles phase entre les élément chimique des fibres métalliques et ceux de la matrice cimentaire.

On remarque ces pics à $2\theta = 81,45^\circ$ et à $2\theta = 90,55^\circ$.

- **Diffraction par rayon X de test TCLP:**

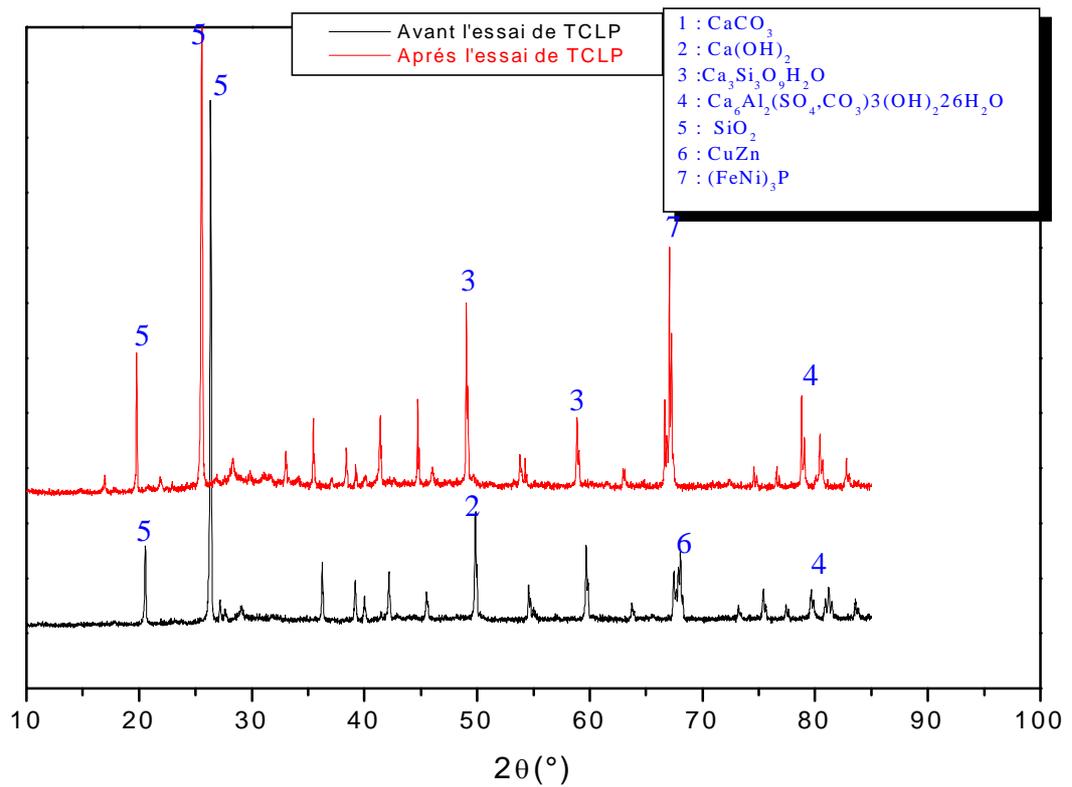


Figure3.20 Spectre obtenue par DRX de test TCLP

La figure ci-dessus montre le spectre de diffraction par rayon X pour l'échantillon avant et après le test TCLP et on remarque l'apparition la disparition de quelques pics ainsi l'apparition de nouvelles phases. ces phase sont apparues à $2\theta = 44,83^\circ$ et $2\theta = 73,43^\circ$.

7-Analyse par infrarouge

La spectroscopie infrarouge à transformé de Fourier IRTF nous a permis d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau par la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques.

Le spectre d'analyse infrarouge obtenu est représenté dans la figure suivante :

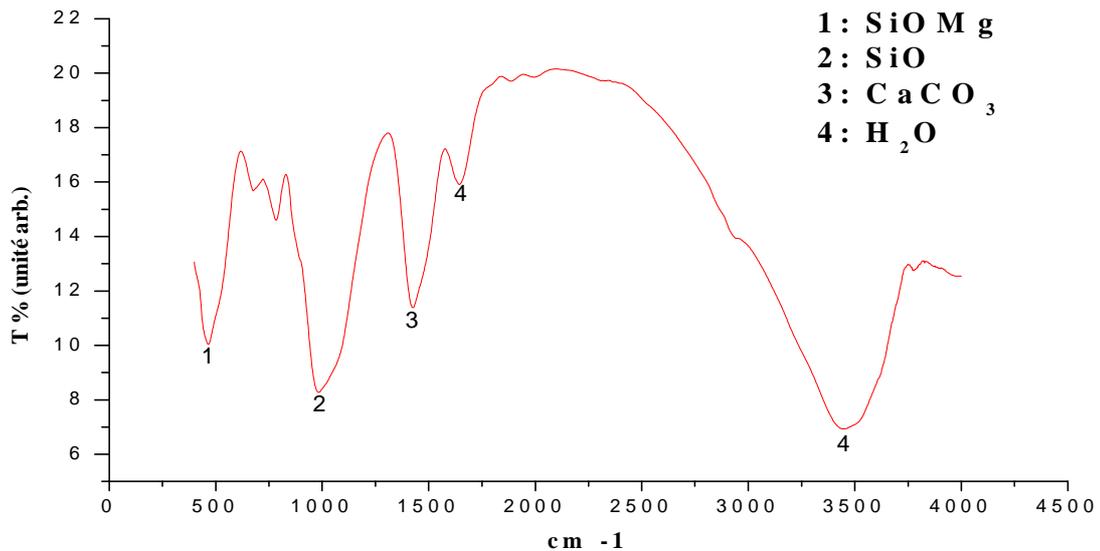


Figure 3.21. Spectre infrarouge du mortier M10

L'identification des différents signaux de vibrations a été effectuée à partir des tables d'identification infrarouge, l'examen du spectre fait apparaître des bandes d'absorption comme suit :

✓ **Groupement OH [43]**

-La vibration de déformation des molécules H₂O sont caractérisées par la bande à 3439,974 cm⁻¹.

-La bande centrée vers 1648,929 cm⁻¹ est attribuée aux vibrations de déformation des molécules de H₂O absorbées par les feuillets.

✓ **Liaison Si-O [43]**

-La bande intense située entre 900-1200 cm⁻¹ et centrée vers 981,181 cm⁻¹ correspond aux vibrations de valence de la liaison Si-O.

-La bande située à $474,042\text{ cm}^{-1}$ correspond à vibration de la liaison Si-O-Mg.

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives

Les objectifs principaux de notre travail étaient, d'évaluer l'influence d'utilisation des fibres métalliques sur le comportement mécanique et physico-chimique des mortiers.

Ces derniers contenant des fibres métalliques à différents pourcentages ont été confectionnés et conservés dans des conditions bien définies, les rapports E/C des compositions de mortier étaient de 0.5, 0.55, 0.62, 0.71, les propriétés physiques telles que la perte de masse, les propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression et à la flexion, et la variation dimensionnelle (retrait et gonflement) ont été étudiés.

D'après les résultats obtenues sur l'introduction des fibres métalliques en substitution du ciment on conclut :

- * La diminution de la résistance à compression et à la flexion du mortier, tout en restant dans les normes (pour les pourcentages 10% et 20%).
- * La diminution du retrait et l'augmentation du gonflement.
- * L'introduction des fibres métalliques (déchet BCR) dans la formulation des mortiers retarde la prise. (Présence de Zn).
- * L'augmentation du rapport E/C retarde l'hydratation et diminue la formation de C-S-H.
- * Un relargage des ions dans les milieux de conservation.

Nous avons jugé que la formulation à 10% de fibres est intéressante du fait qu'elle présente une bonne résistance à la compression et à la flexion un retrait et gonflement acceptables et proches de celles de 0% (mortier témoin).

Donc ces fibres métalliques de BCR peuvent être dans le béton de structures

Nous recommandons comme perspectives :

- L'ajout des fibres métalliques dans l'intervalle [0, 10%] et prendre un pas de deux (02%).
- Jouer sur le diamètre des fibres métalliques, le dosage en eau et d'autres additions minérales.
- La distribution et l'orientation des fibres vis-à-vis de la direction de sollicitation principale.
- Utiliser les fibres comme ajout pour renforcer le béton armé et diminuer la section des armatures (facteur économique).

- Renouveler l'eau distillée après chaque mesure de gonflement.
- Compléter cette recherche par une analyse SAA pour quantifier les métaux lourds (Zn, Ni, Cu) .qui contient les fibres métallique de BCR.
- Utiliser un ciment résistant aux sulfates pour mieux voir la réaction des fibres dans le milieu sulfaté.

Références bibliographiques

[1] Mlle MEZIANI. M.

« Effet de la microsilice sur le comportement mécanique, le retrait et la résistance à l'action des sulfates du béton autoplaçant ». Thèse de magister, Université de Bejaia.2009.

[2] Mlle SAADANI Sabrina.

« Comportement des bétons a base de granulats recyclés ». Thèse de magister, Université de Mentouri-Constantine.2007.

[3] BELFARRAG ALLAOUA.

« Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes ». Thèse de magister, Université de Ouargla.2006.

[4] BOUKHATEM F, FERGANI M.A.

« Etude expérimentale du recyclage des débris de maçonnerie dans les mortiers de ciment ». Thèse d'ingénieur Ecole Nationale Polytechnique.2006.

[5] Mokhtari Abdessamed.

« Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés de Fibres Végétales de Palmier Dattier ». Thèse de magister. Université de kasdi merbah Ouargla.2006.

[6] Govin A.

« Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment, modification de l'hydratation du ciment par le bois ». Thèse de doctorat, Ecole National Supérieur des Mines de Saint Etienne, 216 p. 2004.

[7] De Larrard F.

« Construire en béton l'essentiel sur les matériaux ». Thèse de doctorat, Presses de l'Ecole National Des Ponts et Chaussées ,199p. 2002.

[8] Roux S

« Évaluation des risques de biodégradation des bétons en contact avec une eau douce naturelle ». Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg.

[9] Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques (ATHIL).

<<Guide pratique pour l'emploi des ciments>>. Editions Eyrolles. 1988.

[10] R.LACROIX, A.FUENTES, et H. THONIER.

<<Traité de béton armé>>. (Cours de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées). Editions Eyrolles, 1982.

[11] Réunion d'ingénieurs.

<<Matériaux de constructions>>. Editions Eyrolles.1979.

[12] E. OLIVIER.

<<Technologie des matériaux de construction>>. TOME1. Entreprise moderne d'édition. 1978.

[13] A. BRAHMA.

<<Le béton>>. Office des publications universitaires.1996.

[14] Monsieur Vimane PHOUMMAVONG

Vice-doyen et Professeur à la Faculté d'Ingénierie, Université Nationale du Laos, Campus Numérique Francophone de Vientiane.

[15] S. KHERBACHE et R. GOUJIL.

<< Etude de l'influence de fins contenues dans les sables concassés sur la résistance des bétons>>. Mémoire de fin d'études en Génie Civil. Université de Bejaia.

[16] Alouache Hicham, Saghi Sofiane

<<Influence des déchets de marbre sur caractéristiques mécaniques et le retrait des bétons>>. Année 2009/2010. Mémoire de fin d'études, Université de Bejaia.

[17] BOUTIBA ALDJA.

<< Accélération du durcissement par énergies renouvelables du béton frais et caractérisation du béton durci>>.Thèse d'ingénieur. Université de Bejaia.

[18] DAVID PLANEL.

<<Les effets couples de la précipitation d'espèces secondaires sur le comportement mécanique et la dégradation chimique des bétons>>.Thèse de doctorat. Université de Marne-La-Vallée.2002.

[19] AITCIN, PIERRE-CLAUDE.

<<Does Concrete Shrink or Does it Swell>> ,*Concrete International*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan. December 1999.

[20] YUCEF FRITH.

« Apport d'un comportement d'élément en béton autoplaçant armé ». Thèse de doctorat université de Toulouse, 2009.

[21] A. Abdous.

« Béton renforcé de fibre » Exposé de MDC.Université de Bejaia.

[22] Mme Boukhezer née Ouari N.

« Modélisation numérique de l'injection des bétons de fibres ». Thèse magister, Université de Bejaia.2006.

[23] Abdou K.

« Effet des fibres métalliques sur la caractérisation et les variations dimensionnelles et pondérales des matrices cimentaires renforcés de fibres ». Séminaire International Rabat – Maroc / 23-25 Novembre 2011.

[24] Setti Bakhti.

« Etude de la ductilité des nœuds de structures poteaux - poutres en béton de fibres métalliques ». Symposium international sur la construction en zone sismique, Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), 26 –27 octobre 2010.

[25] pascal casanova.

«Bétons renforcés de fibre métallique du matériau à la structure ».Thèse de Doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.1995.

[26] Mme BENTALHA née MALOU MALIKA.

« Influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire -caractérisation - comportement monotone –microstructure ».thèse de doctorat, Université de Mentouri-Constantine.2007.

[27] Jacqueline LECOMTE-BECKERS & Yann GREDAY.

« Faculté des Sciences Appliquées, Département ASMA, Science des Matériaux ». Université de Liège 2002.

[28] IUP GENIE CIVIL.

« Cours Transfert Thermique (Fichier PDF, 29 pages) », 2002.

[29] Bedjou.S.

« Etude du recyclage de débris de briques ». Thèse de Magister. ENP (2003).

[30]LOVERA P., (1998) « Relation entre coefficient de diffusion et porosité :

Application à l'estimation des coefficients de diffusion de l'eau traitée dans les matériaux dégradés », Note Technique DESD/SESD/LBSE N° 98.42, CEA.

[31]BOURBIER T., COUSSY O., ZINSZNER B., (1986).

« *Acoustique des milieux poreux* ». Publications de l'IFP, Coll. Science et Technique du pétrole, N°27, Éditions TECHNIP, p340.

[32] 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>>.

[33] 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.

[34] 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.

[35] B.BENSTAALLI.

<<Méthodes et technique d'analyse physique>>, 1ere édition, (2003).

[36] Documents internes de BCR.

[37] MORTAHRI Mohammed Saïd.

<<Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. Cas de la STEP Est de la ville de TIZI-OUZOU>>, Thèse de doctorat, 2012.

[38] Moszkowicz, p, Barna, R, et Mehu, J.

<<Evaluation approfondie des procédés de stabilisation /solidification –Document 3 : proposition finales pour la procédure française. Villeurbanne : Polden-Insavalor S.A>>.1994.47p. Rapport d'étude effectuée à la demande l'ADEME.

[39] Barna, R.

<<étude de la diffusion des polluants dans les déchets solidifiés par liant hydrauliques. Thèse de doctorat des sciences/ institut national des sciences appliquées de Lyon, 1994, 210p.

[40] J.RODIER

<<Analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer>> 7ème Edition DUNOD.1984.

[41] VIOLAINE MIJNO.

<<Modification de la composition de déchets métallifères, miniers et industriels, stabilisés par liant hydrauliques et soumis à des tests de lixiviation>> Thèse N° [7-2007], la mars 2007, p 65.

[42] A.Tabchouche, N.Zouaoui et H.Belkacemi.

<<Travaux pratiques du module méthodes physique d'analyses (M.P.A)>>. Université de Bejaia, 2007, 07 p.

[43] Erdal Eren.

<< Removal of copper ions by modified unye clay, turkey>>, J.Hazardous materials 159, 2008, p235-244.

Normes

NF EN 196-1: Norme française. Confection des mortiers.

NF EN 196-3 : Norme française. Méthodes d'essais des ciments. Détermination du temps de prise et de la stabilité.

NF P 18-560 : Norme française. Granulats. Analyse granulométrique par tamisage.

NF EN 1008 : Norme française. Eau de gâchage pour bétons. Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.

NF P 18-553: Norme française. Préparation d'un échantillon pour essai.

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 :

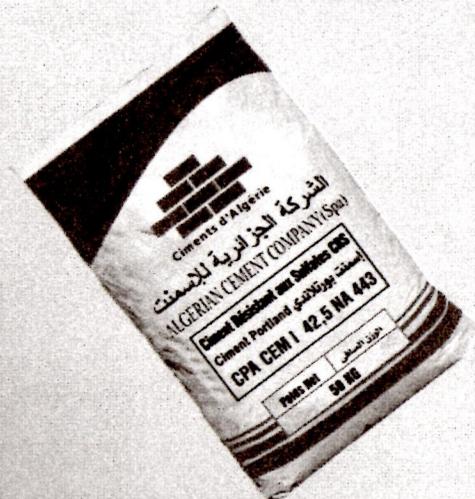
Consistance normale de la pâte de ciment %	25.50 - 26.50
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /gm)	3000 - 3200
Retrait à 28 jours µm/m	< 1000
Expansion mm	< 5

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 B

Résistances mécaniques (compression et traction) à 28 jours

% des fibres métalliques	Résistances mécaniques à 28 jours	
	Résistance à la compression	Résistance à la traction par flexion
0	40.38	7.79
10	39.90	7.26
20	31.13	5.67
30	22.23	4.89

Annexe C

Retrait de dessiccation et la variation des masses.

La variation des masses « $(\Delta M/M)*100$ » (grs)								
N° de la série	% de fibres	1 jour	3 Jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours	60 jours
M0	0	0	2.38	2.91	3.36	3.40	3.43	3.53
M10	10	0	2.75	3.17	3.55	3.55	3.54	3.64
M20	20	0	2.62	3.89	4.20	4.32	4.49	4.65
M30	30	0	3.08	5.30	5.79	5.92	5.99	6.04

Valeurs moyennes des variations des masses des éprouvettes du retrait en fonction du pourcentage de fibres métalliques à des temps (t).

Les valeurs de « $dl(t) \times 10^{-6}$ » (mm)								
N° de la série	% de fibres	1 jour	3 Jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours	60 jours
M0	0	3247.33	3438.66	3516.33	3553.33	3532	3718	3740.66
M10	10	2901	3079	3029	3060	3064	3145	3179
M20	20	2378	2430	2477.33	2484	2769.33	2786.33	2814.66
M30	30	2341	2370.66	2403.66	2478	2449	2489.66	2474.33

Valeurs moyennes du retrait des éprouvettes en fonction du pourcentage de fibres métalliques à des temps (t).

Annexe D

Gonflement et la variation des masses.

La variation des masses « $(\Delta M/M)*100$ » (grs)								
N° de la série	% de fibres	1 jour	3 jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours	60 jours
M0	0	0	1.80	2.00	2.13	2.23	2.23	2.28
M10	10	0	2.39	3.05	3.07	3.41	3.46	3.53
M20	20	0	2.03	3.92	4.22	4.38	4.44	4.57
M30	30	0	2.39	5.41	5.81	5.97	6.02	6.08

Valeurs moyennes des variations des masses des éprouvettes du gonflement en fonction du pourcentage de fibres métalliques à des temps (t).

Les valeurs de « $dl(t) \times 10^{-6}$ » (mm)								
N° de la série	% de fibres	1 jour	3 jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours	60 jours
M0	0	1917	1920	1933	1975	1991	1982	1981
M10	10	1922	2117	2172	2198	2266	2265	2249.5
M20	20	1972	2200	2204	2223	2287	2336	2332
M30	30	1987	2240	2316	2364.66	2363.66	2363.66	2376

Valeurs moyennes du gonflement des éprouvettes en fonction du pourcentage de fibres métalliques à des temps (t).

Annexe E

Analyses physico-chimiques des eaux des milieux de conservation.

	0% de fibres métalliques						
Age	1jour	3 jours	7jours	14jours	21jours	28jours	60jours
PH	8,34	11,54	10,74	9,5	8,65	9,03	8,83
Conductivité(λ)	289	320	361	392	420	959	1594

	10% de fibres métalliques						
Age	1jour	3 jours	7jours	14jours	21jours	28jours	60jours
PH	8,34	11,62	10,7	10	9,35	9,14	9,1
Conductivité(λ)	702	745	789	813	842	1974	3380

	20% fibres métalliques						
Age	1jour	3 jours	7jours	14jours	21jours	28jours	60jours
PH	8,34	11,53	10,43	9,86	9,4	9,24	9,34
Conductivité(λ)	669	692	718	738	759	1782	3140

	30% fibres métalliques						
Age	1jour	3 jours	7jours	14jours	21jours	28jours	60jours
PH	8,34	10,9	10,08	9,81	9,54	9,33	9,31
Conductivité(λ)	659	678	690	718	749	1704	2710

Annexe F

Test de Lixiviation Monolithe (TLM)

	Milieu sulfaté						
Age	6heures	18heures	2jours	4jours	9jours	16jours	36jours
Masse (grs)	148.8	148.6	148.8	149.00	148.6	148.6	148.6
PH	8.96	10.35	10.43	11.78	12.05	10.62	12.56
Conductivité(λ)	757	26500	30800	28400	25500	26300	28300

	Milieu neutre						
Age	6heures	18heures	2jours	4jours	9jours	16jours	36jours
Masse (grs)	153.33	153.4	153.4	153.6	153.4	153.5	153.6
PH	9.50	9.14	8.45	11.31	11.43	7.47	11.94
Conductivité(λ)	36.9	100.7	49.5	79.2	91.4	86.8	191