

N° Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2021

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ - BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'études

Présenté par :

Melle. REZKI AHLEM
Melle. MESSAOUDI ZAHIA

En vue de l'obtention du diplôme de Master 2en :

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème :

**Etude de la formulation et caractérisation d'un matériau cimentaire renforcé
par des fibres de déchets plastique.**

Devant le jury composé de :

HAMI BRAHIM

UAMOB

Président

MESBOUA NOUR EDDINE

UAMOB

Encadreur

KENNOUCHENN SALIM

UAMOB

Examinateur

Année Universitaire 2020/2021



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

À nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

*À notre promoteur Mr : **MESBOUA NOUREDDINE** pour nous avoir guidés pour la réalisation de cette étude.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

*Nous exprimons aussi une reconnaissance particulière à tous les travailleurs du **Laboratoire central des travaux publics (LCTP)**, pour l'aide qu'ils nous ont apportée et leur disponibilité durant notre stage de fin d'étude.*

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.

Merci



REZKI & MESSAOUDI

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mon très cher père que j'aime plus que tout et qui m'a toujours encouragée et qui croit en moi, merci au meilleur papa du monde

À celle qui m'a donné la vie et l'envi de vivre, à celle qui m'a entouré de sa tendresse, à celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation, à celle qui m'a donné amour et le courage et la volonté qu'elle m'a inculqué ma très chère Mama.

À mon mari et mes très chers frères

À mon cher grand-père et ma chère grand-mère, qui je souhaite une bonne santé

À ma chère binôme «Zahia» et à toute sa famille

À tous mes amis (e) sans exception

À toutes les personnes qui m'ont soutenues et crus en moi lors de mon parcours et à tout ceux qui m'ont aidé de près ou de loin

À tous ceux que j'aime.



AHLEM

Dédicace

*Je tiens à dédier ce modeste travail à mon cher papa « El Hacene » lumière
De Mes yeux, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point vous*

*Remercier comme il se doit, vous étiez toujours à mes côtés pour me
Soutenir et m'encourager, que ce travail traduit ma gratitude et mon
Affection*

*À la mémoire ma chère mère **ZAHRA** que dieu l'accueille dans son vaste
paradis Ma chère belle-mère Fatiha*

Ma tante Ouardia et ma grand-mère Taklit

Mon cher frère Sofiane et sa femme Warda et sa fille Dihia

Mon cher frère fawaz et sa femme Wazna et ses enfants El hecene et Rayane

Mes chères sœurs Fazia, Louiza et Salwa et leurs enfants

Ma sœur Ilhem

Mes beaux-frères Abbas, Mohand akli et Mourad

Ma chère binôme « Ahlem » et sa famille

Et sans oublier mes très chères amies Salima, Rabiaa, Aicha et Nesrine.

*Enfin à tous mes amis et collègues de la promotion 2019/2020 et la
promotion 2020/2021*



ZAHIA

Lieu de stage

Présentation de LCTP de BOUIRA



Figure : Siège social de LCTP Bouira

DENOMINATION :

- **LCTP** : Laboratoire Central des Travaux Publics - EPE/SPA.
au capital social de Huit cent quatre six millions de dinars,
soit : 886 000 000.00DA.

ACTIVITE :

Les activités principales du LCTP, s'articulent autour des études géotechniques, contrôle des travaux, auscultation des ouvrages, et recherche des matériaux, dans le domaine du BTPH.

➤ **Etudes :**

- ❖ Etudes de sols de fondation d'ouvrages ;
- ❖ Etudes géotechniques routières ;
- ❖ Etudes géologiques et géophysiques

Lieu de stage

- ❖ Etudes de formulation des enrobés hydrocarbonés et bétons hydrauliques ;
- ❖ Expertises d'ouvrages ;
- ❖ Etudes de stabilité des talus,

➤ **Contrôle :**

- ❖ Contrôle de travaux de terrassement ;
- ❖ Contrôle des bétons hydrauliques ;
- ❖ Contrôle des liants, et des enrobés hydrocarbonés ;
- ❖ Homologation et contrôle du marquage routier ;

➤ **Auscultation des ouvrages:**

- ❖ Instrumentation des ouvrages d'art (essais de réception)
- ❖ Auscultation des fondations (essais de chargement pieux, carottage sonique)
- ❖ Auscultation des structures aux ultrasons
- ❖ Instrumentation des glissements de terrain

➤ **Recherche des Matériaux :**

- ❖ Recherches de carrières pour granulats concassés ;
- ❖ Recherche des gîtes d'emprunts
- ❖ Matériaux locaux.

Sommaire

Liste des tableaux.....	I
Liste des figures.....	II
Liste des abréviations.....	III
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I : CEMENTS

I.1.Introduction.....	3
I.2. fabrication du ciment portland.....	3
I.3. Les différentes étapes de fabrication de ciment.....	5
I.3.1. Fabrication par voie humide.....	5
I.3.2. Fabrication par voie sèche.....	6
I.3.3. Fabrication par voie semi-humide.....	8
I.3.4. Fabrication par voie semi-sèche.....	8
I.4. Constituants principaux et additions.....	9
I.4.1. Constituants du clinker.....	9
I.4.2.1. Calcaires.....	10
I.4.2.2. Laitier granulé de haut fourneau.....	10
I.4.2.3. Cendres volantes (V ou W).....	10
I.4.2.4. Schistes calcinés.....	11
I.4.2.5. Fumée de silice.....	11
I.4.2.6. Fillers.....	11
I.5. Classification des ciments courants.....	11
I.6. Propriétés des ciments.....	13
I.6.1. Caractéristique physiques.....	13
I.6.1.1. Comportement physico –chimique de la pâte.....	13
I.6.1.2. La prise.....	13
I.6.1.3. Durcissement.....	13
I.6.1.4. Chaleur d’hydratation.....	14

I. 6.1.5. Finesse de mouture.....	14
I. 6.1.6. Retrait.....	14
I.6.1.7. Gonflement.....	15
I.6.2. Caractéristiques chimiques du ciment.....	15
I.6.2.1. Ciments courants.....	15
I.7. Hydratation du ciment portland	16

CHAPITRE II : BETONS ET MORTIERS

II.1. Les bétons.....	19
II.1.1. Introduction	19
II.1.2. Historique.....	19
II.1.3. Principaux avantages et inconvénients du béton.....	19
II.1.3.1. Avantages du béton.....	19
II.1.3.2. Inconvénients du béton.....	19
II.1.4. Classification des bétons.....	20
II.1.5. Les domaines d'emploi du béton	20
II.1.5.1. Le bâtiment.....	20
II.1.5.2. Les travaux publics.....	20
II.1.6. Les composants d'un béton	21
II.1.6.1. Le ciment	22
II.1.6.2. Additions minérales.....	22
II.1.6.3. L'eau	23
II.1.6.4. Les adjuvants	24
II.1.6.5. Les granulats	26
II.1.7. Propriétés des bétons	27
II.1.7.1. L'ouvrabilité	27
II.1.7.2. Le béton durci	29
II.1.8. Différents types de bétons	30
II.1.8.1. Béton ordinaire BO	30
II.1.8.2. Béton de Sable	31
II.1.8.3. Béton Autoplaçant BAP.....	32
II.1.8.4. Béton à hautes performances (BHP).....	34

II.1.8.5. Béton fibré	34
II.1.8.6. Les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances – BFUP.....	38
II.2. Les mortiers	39
II.2.1. Historique	39
II.2.2. Introduction	39
II.2.3. Définition.....	40
II.2.4. Constituants des mortiers.....	41
II.2.4.1. Le Liant.....	41
II.2.4.2. Le sable	41
II.2.4.2.1. Origines de sable.....	41
II.2.4.2.2. Granulométrie.....	42
II.2.4.2.3. Rôle du sable dans le mortier.....	43
II.2.4.2.4. Exigences sur le sable d’usage général.....	43
II.2.4.3. L’eau de gâchage	43
II.2.4.4. Les ajouts	43
II.2.5. Le rôle d’utilisation de mortier	44
II.2.6. Classification des mortiers.....	44
II.2.6.1. Classification générale des mortiers	44
II.2.7. Classes des mortiers.....	46
II.2.8. Emplois des mortiers	46
II.2.8.1. Le hourdage de maçonnerie	46
II.2.8.2. Les enduits	47
II.2.8.3. Les chapes	47
II.2.8.4. Les scellements et les calages	48
II.2.8.5. Les coulis	48
II.2.9. Préparation des mortiers	48
II.2.9.1. Fabrication à la main.....	48
II.2.9.2. Fabrication mécanique.....	49
II.2.10. Caractéristiques des mortiers.....	49
II.2.10.1. Ouvrabilité	49
II.2.10.2. Prise.....	50
II.2.11. Capacité d’absorption d’eau	50

CHAPITRE III : LES FIBRES

III.1.Introduction	53
III.2.Les fibres	53
III.3. Les types des fibres	53
III.3.1. Les fibres de verre « E» et « AR »	54
III.3.2. Fibres d'acier	54
III.3.3.Fibres de carbone.....	56
III.3.4. Fibres de polypropylène	56
III.3.5. La fibre d'alfa	57
III.3.6. Le feillard en plastique	57
III.4.Les caractéristiques et les propriétés des fibres.....	60
III.5.Rôles des fibres dans le béton	61
III.6. Les atouts des fibres	62
III.7.Mécanismes de fonctionnement des fibres dans le béton.....	62
III.8. La dispersion et l'orientation de la fibre	62
III.9. Influence de la morphologie des fibres	63

CHAPITRE IV : PARTIE PRATIQUE

IV.1.Introduction.....	64
IV.2. Méthodes et matériaux utilisés.....	64
IV.2.1.Le ciment.....	64
IV.2.1.1. Les essais physiques.....	65
IV.2.1.2. Les essais mécaniques.....	66
IV.2.1.3. Les essais chimiques.....	66
IV.2.1.4. Les essais minéralogiques.....	66
IV.2.1.5.Analyse par Diffraction des Rayons X du ciment (DRX).....	67
IV.2.2.Le sable.....	68
IV.2.2.1. Analyse granulométrique.....	69
IV.2.2.2. Caractéristiques physiques du sable.....	71
IV.2.3.L'eau de gâchage.....	74
IV.2.4. Adjuvant	75
IV.2.4.1.Le superplastifiant sika 625	75
IV.2.4.2.La poudre de verre.....	75

IV.2.5.Les fibres	76
IV.2.5.1.Le feillard polyester PET (déchets plastiques).....	76
IV.3. Formulation des mortiers	77
IV.3.1. Les différentes étapes de confection	77
IV.3.1.1. Pesée des constituants.....	77
IV.3.2.Caractérisation de mortier	78
IV.3.2.1.L'étalement.....	78
IV.3.2.2.La masse volumique.....	79
IV.3.3. Préparation des moules.....	84
IV.3.4. Préparation des éprouvettes.....	84
IV.3.5. Conservation des éprouvettes	86
IV.4.Essais mécaniques.....	87
IV.4.1. essai en flexion	87
IV.4.2.Essai de compression.....	87
CONCLUSION GENERALE	93
Références bibliographiques.....	IV
Annexes.....	V

Liste des tableaux

CHAPITRE I : CIMENTS

Tableau I. 1 : Composition chimique et minéralogique du clinker	10
Tableau I. 2 : Les différents types de ciment courants	12
Tableau I. 3 : caractéristique chimique de ciment courante	15
Tableau I. 4 : Les différentes phases de clinker	17

CHAPITRE II : BETONS ET MORTIERS

Tableau II. 1 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône	28
Tableau II. 2 : Les différentes formes de béton selon leur affaissement trouvé	28

CHAPITRE III : LES FIBRES

Tableau III. 1 : Les caractéristiques et les propriétés des fibres	61
---	----

CHAPITRE IV : PARTIE PRATIQUE

Tableau IV. 1 : Caractéristiques physiques.....	65
Tableau IV. 2 : Caractéristiques mécaniques.....	66
Tableau IV. 3 : Composition chimique du ciment.....	66
Tableau IV. 4 : Composition minéralogiques	67
Tableau IV. 5 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable.....	70
Tableau IV. 6 : Le degré d'absorption pour le sable.....	71
Tableau IV. 7 : Les résultats d'équivalent du sable.....	73
Tableau IV. 8 : Comparaison des résultats.....	73
Tableau IV. 9 : résultat d'essai de bleu méthylène	74
Tableau IV. 10 : Composition chimique de la poudre de verre	76
Tableau IV. 11 : Caractéristique physique.....	76
Tableau IV. 12 : caractéristiques des fibres	77
Tableau IV. 13 : Les résultats d'étalement de mortier avec fibre courte	78
Tableau IV. 14 : La masse volumique du mortier à l'état frais pour 14 jours	80
Tableau IV. 15 : La masse volumique de mortier à l'état frais avec différents pourcentage	81
Tableau IV. 16 : La masse volumique de mortier à l'état durci avec différents pourcentage	82
Tableau IV. 17 : La masse volumique de mortier à l'état durci avec différents pourcentage	83
Tableau IV. 18 : Effet des fibres longues sur la résistance aux flexion et compression	88
Tableau IV. 19 : Effet des fibres courtes sur la résistance aux flexion et compression.....	90

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : CIMENTS

Figure I. 1: schéma récapitulatif des quatre méthodes de fabrication du ciment .	4
Figure I. 2: Organigramme de fabrication du ciment	5
Figure I.4: Les différentes étapes de fabrication du ciment	8
Figure I.3: schéma de fabrication du ciment par voie sèche.	8
Figure I. 5: Microphotographie d'un clinker	9
Figure I.6: Le processus d'hydratation de la pâte du ciment	17

CHAPITRE II : BETONS ET MORTIERS

Figure II .1 : Les constituants de béton	21
Figure II .2: Influence du dosage en eau de ciment fixé	23
Figure II. 3 : Influence du dosage d'eau sur la rhéologie.	24
Figure II. 4: Utilisation des super- plastifiants	25
Figure II. 5 : Effet de dosage de super plastifiant	25
Figure II. 6: Sable ou Granulats et des graviers	27
Figure II. 7: Test du cône d'Abrams	28
Figure II. 8: Pourcentages des constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire	30
Figure II. 9 : La maison de COIGNET.	31
Figure II .10 : BS, BS chargé et BO	31
Figure II .11: Mise en œuvre d'un BAP	33
Figure II .12: Application de béton autoplaçant sur des armatures	33
Figure II. 13: exemple de matériaux utilisés dans les bétons conventionnel et autoplaçant volume absolu	33
Figure II .14 : Quelques exemples d'application des BHP	34
Figure II .15: Fissuration dans le béton sans et avec fibres	35
Figure II 16 : Comportement de charge -déformation de béton avec et sans fibres	36
Figure II .17: Rôle des fibres dans la matrice de béton.	37
Figure II. 18: Sable roulé (naturel) et Sable concassé (artificiel)	41
Figure II. 19: L'obtention et constituants des mortiers	43
Figure II .20 : Pose de mortier de hourdage	46
Figure II. 21: Enduits isolants et enduits de façade.	47
Figure II .22: Les chapes fluides et chape ciment	47
Figure II. 23 : Les scellements	47

Figure II .24 : Table à secousses	49
Figure II. 25 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre	49
Figure II. 26 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge	50
Figure II. 27 : Appareillage pour la mesure du retrait	51

CHAPITRE III : LES FIBRES

Figure III .1 : Fibre de verre	54
Figure III. 2 : Différentes formes géométriques de fibres métalliques	55
Figure III. 3 : Fibres de carbone	56
Figure III .4 : fibres polypropylène	57
Figure III. 5 : Illustrations de la plante d'Alfa à l'état brut	57
Figure III .6 : [Strapex] Feuillards plastiques pour le cerclage	58
Figure III. 7 : Feuillards étroits en Polypropylène PP	58
Figure III. 8 : Feuillard en polyester Haute résistance PET	59

CHAPITRE IV : PARTIE PRATIQUE

Figure IV. 1 : Ciment GICA (Sour el Ghozlane)/CEM II/A-M (P-L) 42,5 N	65
Figure IV. 2: Mesure des temps de prise (a) début de prise ; (b) fin de prise	65
Figure IV. 3: Appareil de Diffraction par des Rayons X	69
Figure IV. 4 : DRX de ciment CPA	69
Figure IV .5 : sable roulé expansé.....	70
Figure IV. 6 : séries des tamis en millimètres	71
Figure IV. 7 : courbe d'analyse granulométrique par tamisage NF EN933-1.	72
Figure IV .8 : essai équivalent de sable avec différents étapes.	73
Figure IV. 9 : l'essai de bleu méthylène.	76
Figure IV. 10 : superplastifiant SIKA VISCOCRETE 625	76
Figure IV. 11 : Poudre de verre.....	77
Figure IV. 12 : Le feillard polyester PET avant coupage à 16cm.....	78
Figure IV. 13 : Le feillard polyester PET après coupage	78
Figure IV. 14 : Essai d'étalement.....	78
Figure IV .15 : L'étalement du mortier avec différents pourcentages de fibres.	79
Figure IV .16 : masse volumique de mortier a l'état frais avec différents pourcentages et types des fibres à 14 jours.....	80
Figure IV. 17: masse volumique de mortier à l'état frais avec différents pourcentage et types des fibres à 28 jours.....	81
Figure IV. 18: La masse volumique de mortier à l'état durci avec différents pourcentage	82
Figure IV .19: La masse volumique de mortier à l'état durci avec différents pourcentage	83
Figure IV. 20: Des moules prismatique	84
Figure IV .21: table à choc	85
Figure IV. 22: La distribution des fibres longue dans les éprouvettes.....	85
Figure IV. 23: La distribution des fibres courte dans les éprouvettes.....	85
Figure IV .24: Les éprouvettes prismatique	86

Figure IV. 25: La Conservation des éprouvettes.....	86
Figure IV. 26 : Essai de traction par flexion.	86
Figure IV. 27 : essai de compression	87
Figure IV .28: Les valeurs obtenues de la résistance mécanique à la flexion pour différents pourcentage avec fibres longue et sans fibres pour 14 et 28 jours.....	88
Figure IV. 29: Les valeurs obtenues de la résistance mécanique à la compression pour différents pourcentage avec fibres longue et sans fibres pour 14 et 28 jours.....	89
Figure IV. 30: Les résultats de la résistance mécanique à la flexion pour différents pourcentages avec fibres longue et sans fibres pour 14 et 28 jours.	89
Figure IV .31 : Les résultats de la résistance mécanique à la compression pour différents pourcentages avec fibres longue et sans fibres pour 14 et 28 jours.	89
Figure IV. 32: Les valeurs obtenues de la résistance mécanique à la flexion pour différents pourcentage avec fibres courte et sans fibres pour 14 et 28 jours.....	90
Figure IV. 33: Les valeurs obtenus de la résistance mécanique à la compression pour différents pourcentage avec fibres courte et sans fibres pour 14 et 28 jours.....	91
Figure IV.35: La résistance mécanique à la flexion des fibres courte et sans fibres pour 14 et 28 jours.....	91
Figure IV. 36 : La résistance mécanique à la compression des fibres courte et sans fibres pour 14 et 28 jours.....	92

Liste des abréviations

Mf : Module de finesse

RC : Refus cumulé

T : Tamisât

CPA : Ciment Portland Artificiel

CPJ : Ciment Portland aux ajouts

E/C : Le rapport volume d'Eau / masse sèche du Ciment (en cm^3/g)

DRX : Diffraction par Rayon X

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.

A : Le degré d'absorption

M₁ : La masse du matériau sec en (g).

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

V : volume de bleu méthylène (ml)

MT : Mortier témoin.

PET : Le feillard polyester

BO : Béton ordinaire

BS : Béton de Sable

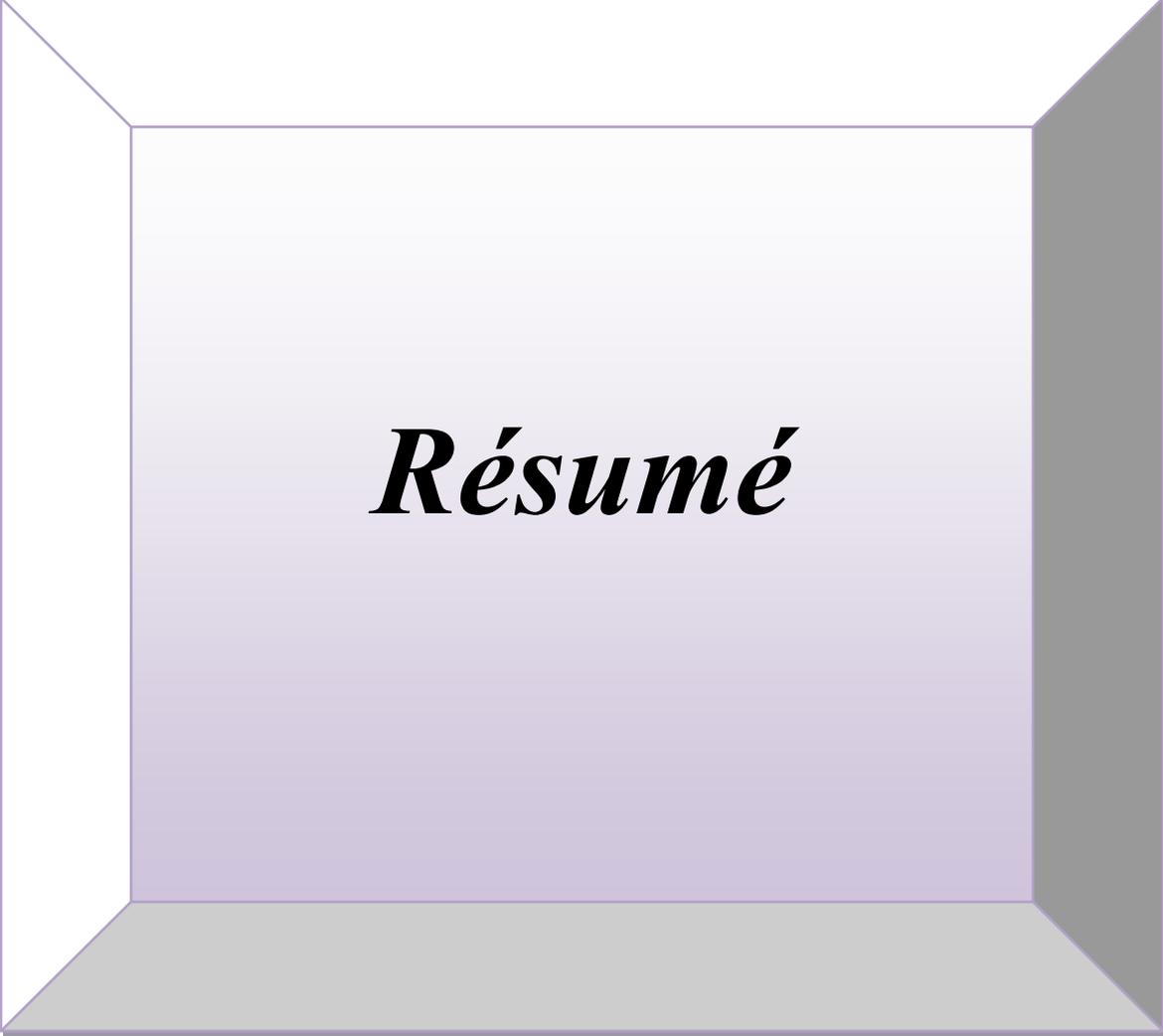
BAP : Béton Autoplaçant

BHP : Béton à hautes performances

BFUP : Les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances

NF : Norme française

LCTP : laboratoire centrale des travaux publics de Bouira



Résumé

Résumé

Le renforcement des matériaux de construction, particulièrement les mortiers par des fibres plastique (feuillard en polyester) qui confère aux matériaux une densité élevée, c'est une technique de plus en plus utilisée, dans le but d'améliorer leurs caractéristiques physicomécaniques, notamment leurs résistances à la flexion par traction et à la compression. Ce travail présenté dans ce mémoire a pour principal objectif d'étudier un mortier fibré avec différents type des fibres plastique (longue et courte) avec des taux variables (1% ,2%,3% ,4%,5%) et cela avec la formulation de plusieurs variantes d'éprouvettes qui ont été élaborées sous forme prismatique, pour évaluer les caractéristiques physicomécaniques des échantillons issus de chaque variante et à 14 et 28 jours, afin d'estimer l'effet d'âge et d'addition sur les propriétés physicomécaniques essentielles des mortiers par rapport aux échantillons témoins.

Les résultats obtenus permettent de confirmer l'amélioration de la légèreté et les propriétés physicomécaniques des mortiers.

Mots clés: mortier fibré, feuillard en polyester, résistance mécanique.

Abstract

Reinforcement of building materials, especially mortars with fibers plastic (polyester strip) which gives materials a low density, it is a technique more and more used, in order to improve their characteristics physicomechanical, in particular their resistance to bending by traction and compression.

The main objective of this work presented in this thesis is to study a fiber mortar with different type of plastic fibers (long and short) and variable rates (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) and this with the formulation of several variants of test specimens which were developed under prismatic form, to evaluate the physicomechanical characteristics of the samples of each variant and with different ages (14 and 28 days), in order to estimate the effect of age and addition on the essential physicomechanical properties of mortars compared to control samples.

The results obtained confirm the improvement in the lightness and the physicomaterial properties of the mortars.

Keywords: fiber mortar, polyester strip, mechanical resistance.

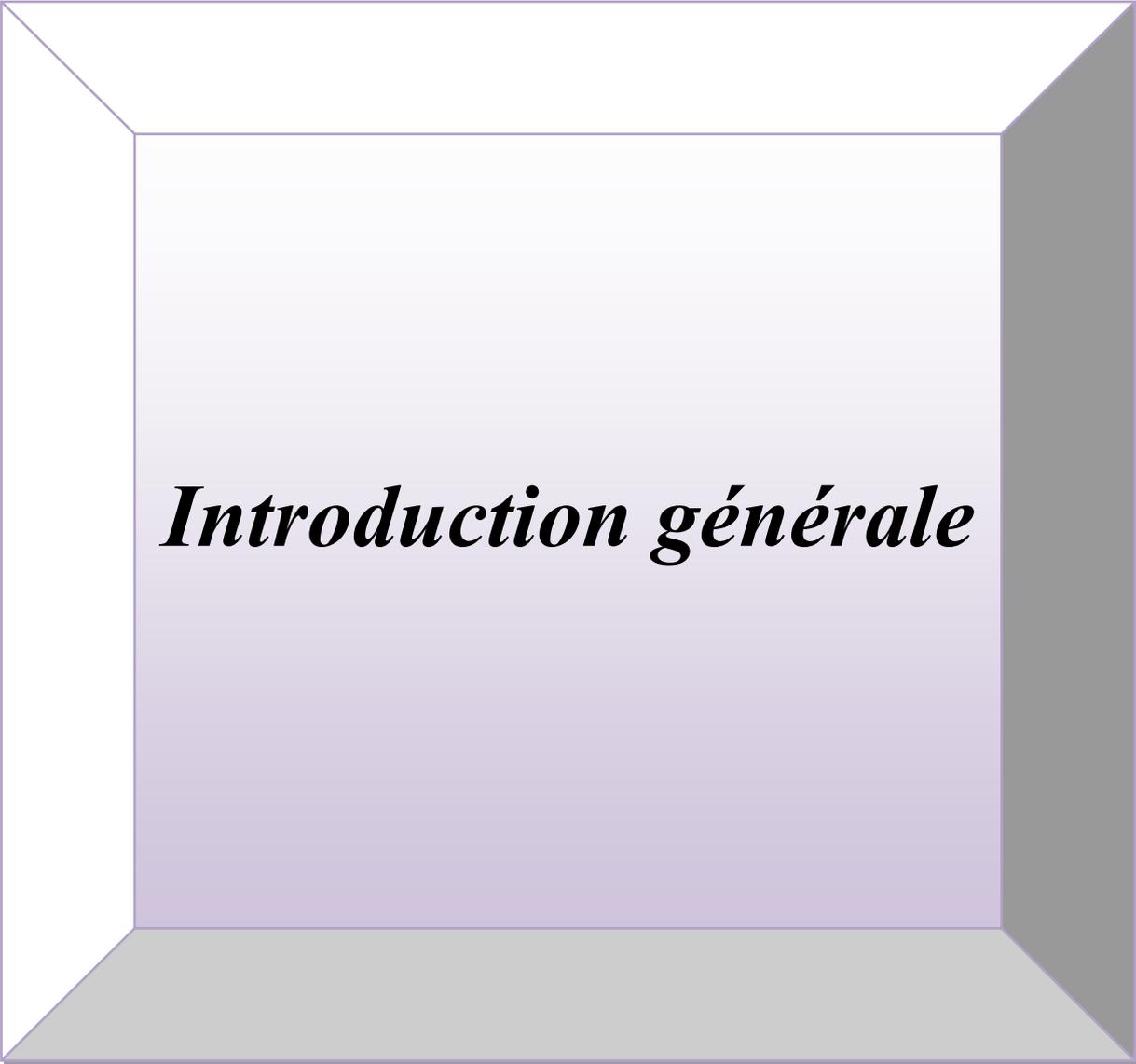
ملخص

تقوية مواد البناء وخاصة الملاط بالألياف البلاستيك (شريط بوليستر) الذي يعطي المواد كثافة منخفضة ، هي التقنية المستخدمة بكثرة ، من أجل تحسين خصائصها الميكانيكية و الفيزيائية ، ولا سيما مقاومتهم للانحناء عن طريق الجر والضغط.

الهدف الرئيسي من هذا العمل المقدم في هذه الأطروحة هو دراسة ملاط ليفي أنواع مختلفة من الألياف البلاستيكية (طويلة وقصيرة) ونسب متغيرة (1% ، 2% ، 3% ، 4% ، 5%) وهذا مع صياغة العديد من عينات الاختبار التي هي منشور مستطيل الشكل لتقييم الخصائص الفيزيائية الميكانيكية للعينات لكل متغير وبأعمار مختلفة (14 و 28 يوماً) ، من أجل تقدير تأثير العمر و بالإضافة إلى الخصائص الفيزيائية الميكانيكية الأساسية للملاط مقارنة بعينات التحكم.

تؤكد النتائج المتحصل عليها تحسين الخفة والخصائص الفيزيائية الميكانيكية للملاط.

الكلمات المفتاحية: ملاط ليفي ، شريط بوليستر ، مقاومة ميكانيكية.



Introduction générale

Introduction générale

Le mortier léger est un matériau composite hétérogène. A l'échelle macroscopique, il a une structure composée de pâte de ciment, de sable de différentes tailles, de forme, de pore, de micro fissure et d'une zone de transition interfaciale localisée autour des grains de sable.

La résistance des mortiers prend des valeurs faibles, ce qui se traduit par des fissures parallèles au plan horizontal des différents éléments de maçonnerie, en accélérant la destruction de ces derniers.

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

1- Solidariser les éléments entre eux ;

2- Assurer la stabilité de l'ouvrage;

3- Comblent les interstices entre les blocs de construction 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 pré-dosés 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.

Dans notre étude, le matériau utilisé est un mortier léger au feuillard polyester qui est connu par sa moyenne densité.

Le but de notre étude est de formuler des mortiers légers avec différents pourcentages de feuillard polyester PET (déchets plastiques) 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, et un mortier témoin sans fibre, pour remédier à ce point faible nous avons formulé plusieurs éprouvettes qui ont été élaborées sous forme prismatique. Nous faisons varier le mortier par différents dosages en feuillard polystyrène PET, le dosage de super plastifiant (réducteur d'eau) et la poudre de verre.

Après l'élaboration des mélanges plusieurs essais ont été effectués pour bien caractériser et identifier ce type de mortier léger.

Méthodologie du travail

Cette étude est structurée en deux parties, la première partie consacrée à la recherche Bibliographique qui est constituée de trois chapitres et la deuxième partie consacrée à la représentation des résultats.

Introduction Générale

Chapitre I: généralités sur les ciments portland fabrication, composition, classification et mécanisme d'hydratation.

Chapitre II en deux parties

- **Première Partie:** sur les bétons, classifications, composants, propriétés et types.
- **Deuxième Partie :** sur les mortiers, définition, constituants, domaine d'utilisation et classifications.

Chapitre III : sur les fibres, définition, types, caractéristiques, propriétés et leur rôle dans le mortier et le béton.

Chapitre IV : Ce chapitre résume la caractérisation des matériaux utilisés dans notre travail, les différents essais physico-mécaniques réalisés à l'état frais et à l'état durci (la masse volumique, comportement mécanique (flexion et compression) sur les matériaux utilisés pour la fabrication du mortier.

Enfin, nous présentons une conclusion générale sur l'étude élaborée et cela d'après les résultats expérimentaux obtenus, tout en donnant des recommandations à prendre en considération dans les prochaines recherches et cela pour une meilleure exploitation de ce matériau.

CHAPITRE I

Le ciment



I.1.Introduction

Le terme « ciment » est issu du latin coementum qui signifie mortier, liant des maçonneries. Ce sens étymologique a donc été à peu près conservé ; « Portland » nom donné par le détenteur du brevet d'invention du ciment Joseph Aspdin en 1824. Parmi tous les liants minéraux, le ciment portland est le liant qui occupe la première place par sa production et son utilisation [1].

Le ciment est un liant hydrauliques qui durci tant à l'air que sous l'eau. Il est obtenu par broyage fin du clinker avec une quantité nécessaire de gypse et un/ ou ajout (s) minéraux actifs (ciment composé), faite simultanément ou par malaxage minutieux des mêmes matériaux broyés séparément [2].

Les ciments sont des produits normalisés de fabrication industrielle faisant partie des matériaux de construction courants. Ils sont destinés principalement à la confection des bétons dans lequel ils jouent le rôle de liant. Il existe plusieurs types de ciments. Chaque type de ciment présente des aptitudes à l'emploi pour des applications liées au type d'ouvrage considéré, à son environnement, aux performances requises et à la technique de mise en œuvre retenue [2].

I.2. fabrication du ciment portland

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes :

- Préparation du cru
- Cuisson
- Broyage et conditionnement

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment figure (I.1) qui dépendent essentiellement du matériau:

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

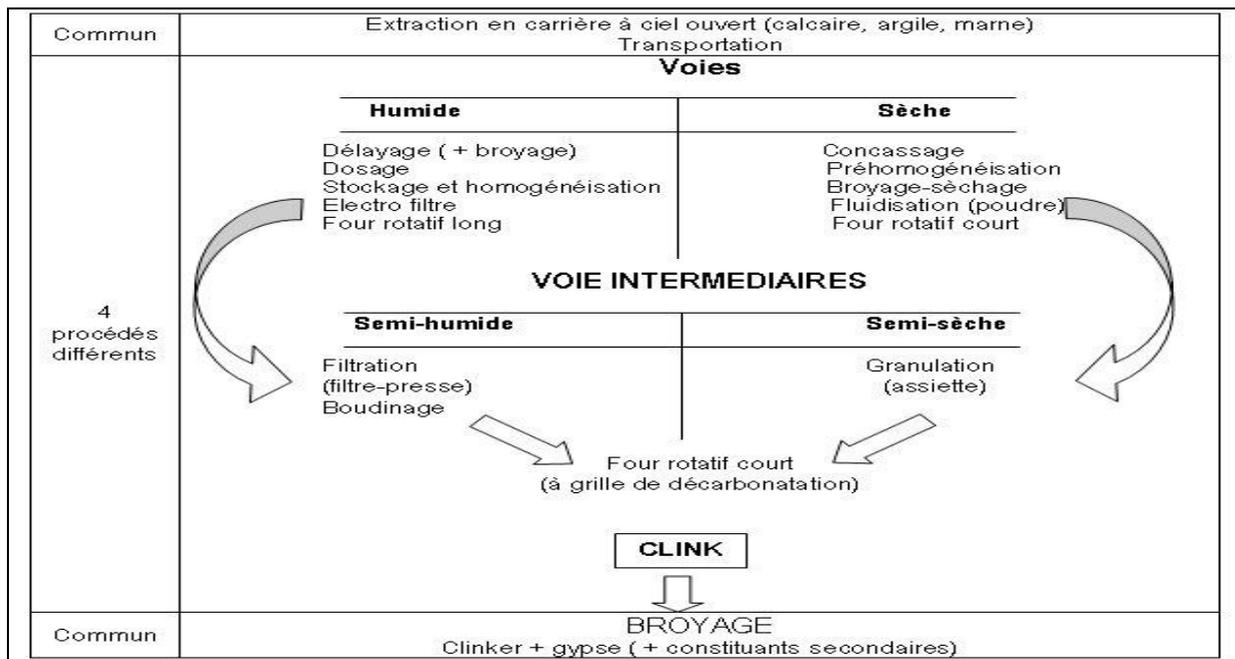


Figure I. 1: schéma récapitulatif des quatre méthodes de fabrication du ciment [1].

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃), et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Fe₂O₃, l'oxyde ferrique.

Le principe de la fabrication du ciment figure (I.2) : calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker. Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au delà de 100 °C, le départ d'eau d'avantage liée. A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique (CO₂) et en chaux (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO₃).

Le mélange est porté à 1450-1550 °C, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante : une partie de CaO est retenu par Al₂O₃ et Fe₂O₃ en formant une masse liquide. SiO₂ et CaO restant réagissent pour donner le silicate bicalcique dont une partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné [1].

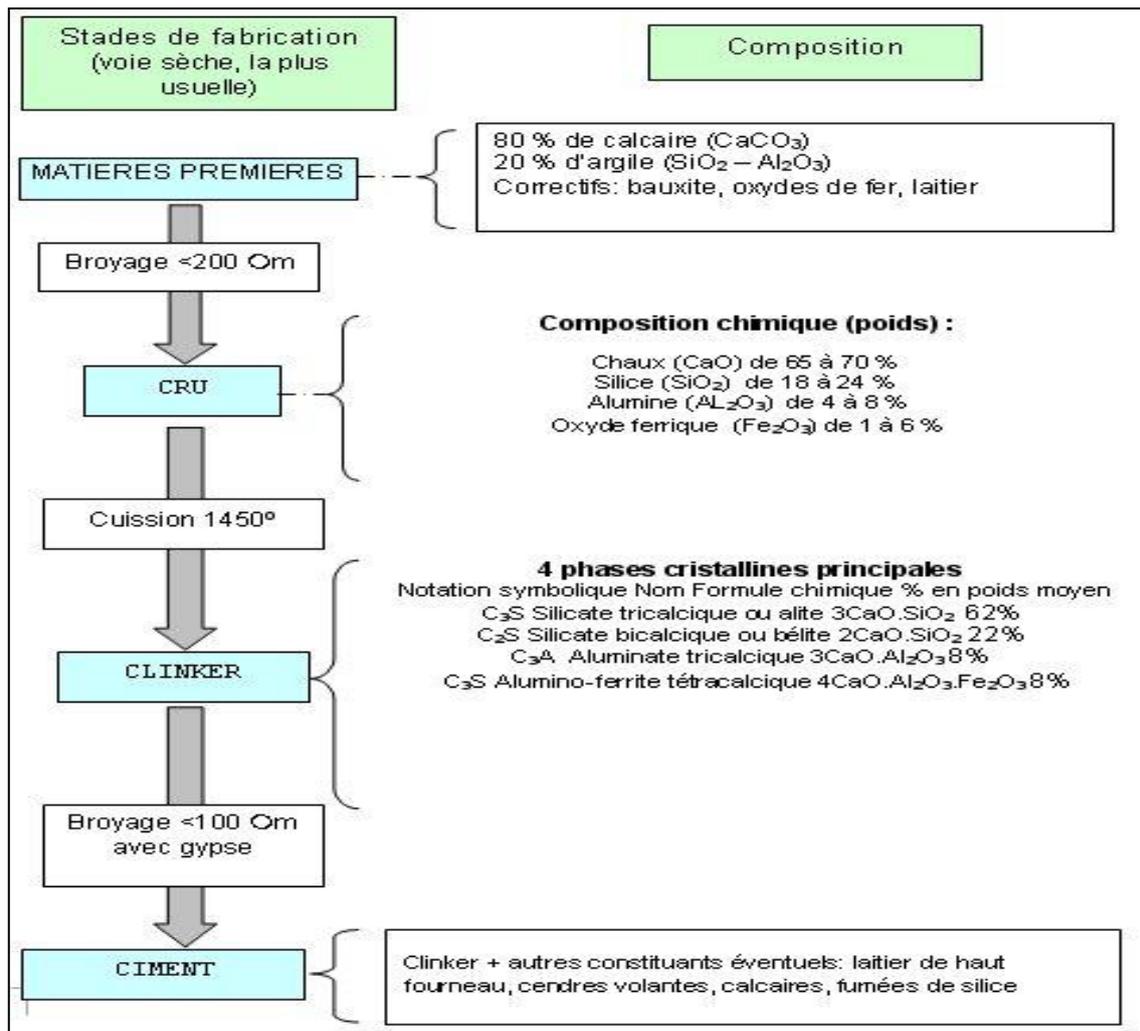


Figure I. 2: Organigramme de fabrication du ciment [1].

I.3. Les différentes étapes de fabrication de ciment

I.3.1. Fabrication par voie humide

Cette voie est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d'énergie.

Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 m de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herses.

La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Ce mélange est appelé le cru. Des analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson [1].

La pâte est ensuite envoyée à l'entrée d'un four tournant, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure. Un four rotatif légèrement incliné est constitué d'un cylindre d'acier dont

la longueur peut atteindre 200 mètres. On distingue à l'intérieure du four plusieurs zones, dont les trois zones principales sont:

- Zone de séchage.
- Zone de décarbonatation.
- Zone de clinkerisation.

Les parois de la partie supérieure du four (zone de séchage - environ 20% de la longueur du four) sont garnies de chaînes marines afin d'augmenter les échanges caloriques entre la pâte et les parties chaudes du four.

Le clinker à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs (trempe du clinker) dont il existe plusieurs types (refroidisseur à grille, à ballonnets). La vitesse de trempe a une influence sur les propriétés du clinker (phase vitreuse).

De toutes façons, quelque soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on a un même clinker qui est encore chaud de environ 600-1200 °C. Il faut broyer celui-ci très finement et très régulièrement avec environ 5% de gypse CaSO_4 afin de «régulariser» la prise.

Le broyage est une opération délicate et coûteuse, non seulement parce que le clinker est un matériau dur, mais aussi parce que même les meilleurs broyeurs ont des rendements énergétiques déplorables.

Les broyeurs à boulets sont de grands cylindres disposés presque horizontalement, remplis à moitié de boulets d'acier et que l'on fait tourner rapidement autour de leur axe (20t/mn) et le ciment atteint une température élevée (160°C), ce qui nécessite l'arrosage extérieur des broyeurs. On introduit le clinker avec un certain pourcentage de gypse en partie haute et on récupère la poudre en partie basse.

Dans le broyage à circuit ouvert, le clinker ne passe qu'une fois dans le broyage. Dans le broyage en circuit fermé, le clinker passe rapidement dans le broyeur puis à la sortie, est trié dans un cyclone. Le broyage a pour but, d'une part de réduire les grains du clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (environ 4%) pour réguler quelques propriétés du ciment portland (le temps de prise et de durcissement).

A la sortie du broyeur, le ciment a une température environ de 160 °C et avant d'être transporter vers des silos de stockages, il doit passer au refroidisseur à force centrifuge pour que la température de ciment reste à environ 65 °C [1].

I.3.2. Fabrication par voie sèche

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire (CaCO_3) environ de 80% et d'argile ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) environ de 20%. Selon l'origine des matières premières, ce

mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis [1].

Après avoir finement broyé, la poudre est transportée depuis le silo homogénéisateur jusqu'au four, soit par pompe, soit par aéroglisseur.

Les fours sont constitués de deux parties :

- Un four vertical fixe, préchauffeur (cyclones échangeurs de chaleur).
- Un four rotatif.

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO₂) et son eau. La poudre pénètre ensuite dans un four rotatif analogue à celui utilisé dans la voie humide, mais beaucoup plus court.

La méthode de fabrication par voie sèche figure (I.3) pose aux fabricants d'importants problèmes techniques :

1. La ségrégation possible entre argile et calcaire dans les préchauffeurs. En effet, le système utilisé semble être néfaste et en fait, est utilisé ailleurs, pour trier des particules. Dans le cas de la fabrication des ciments, il n'en est rien. La poudre reste homogène et ceci peut s'expliquer par le fait que l'argile et le calcaire ont la même densité (2,70 g/cm³). De plus, le matériel a été conçu dans cet esprit et toutes les précautions ont été prises.
2. Le problème des poussières. Ce problème est rendu d'autant plus aigu, que les pouvoirs publics, très sensibilisés par les problèmes de nuisance, imposent des conditions draconiennes. Ceci oblige les fabricants à installer des dépoussiéreurs, ce qui augmente considérablement les investissements de la cimenterie. Les dépoussiéreurs sont constitués de grilles de fils métalliques portés à haute tension et sur lesquels viennent se fixer des grains de poussière ionisée. Ces grains de poussière s'agglomèrent et sous l'action de vibreurs qui agitent les fils retombent au fond du dépoussiéreur où ils sont récupérés et renvoyés dans le four. En dehors des pannes, ces appareils ont des rendements de l'ordre de 99%, mais absorbent une part importante du capital d'équipement de la cimenterie.
3. Le problème de l'homogénéité du cru est délicat. Nous avons vu comment il pouvait être résolu au moyen d'une préhomogénéisation puis d'une homogénéisation [1].

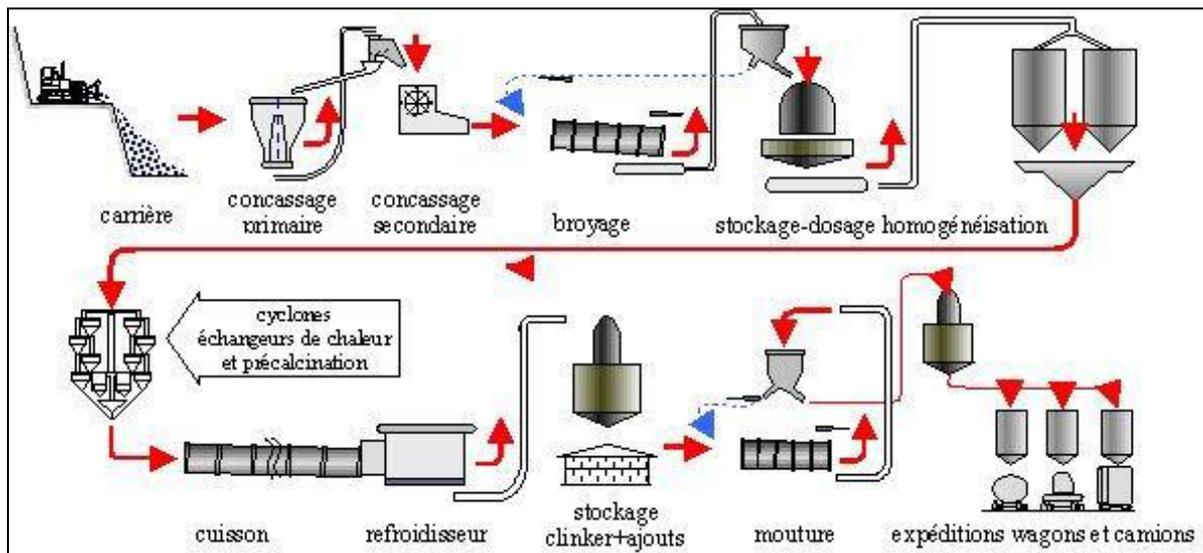


Figure I.3:schéma de fabrication du ciment par voie sèche [1].

I.3.3. Fabrication par voie semi-humide

Avant de passer dans le four rotatif, elle peut préalablement passer dans une grille de séchage (voie semi-humide).

I.3.4. Fabrication par voie semi-sèche

A la sortie du broyeur sécheur. La poudre séchée est transformée en boulette de 10 à 12 mm de diamètre par l'ajout de 10 à 15 % d'eau dans un granulateur.

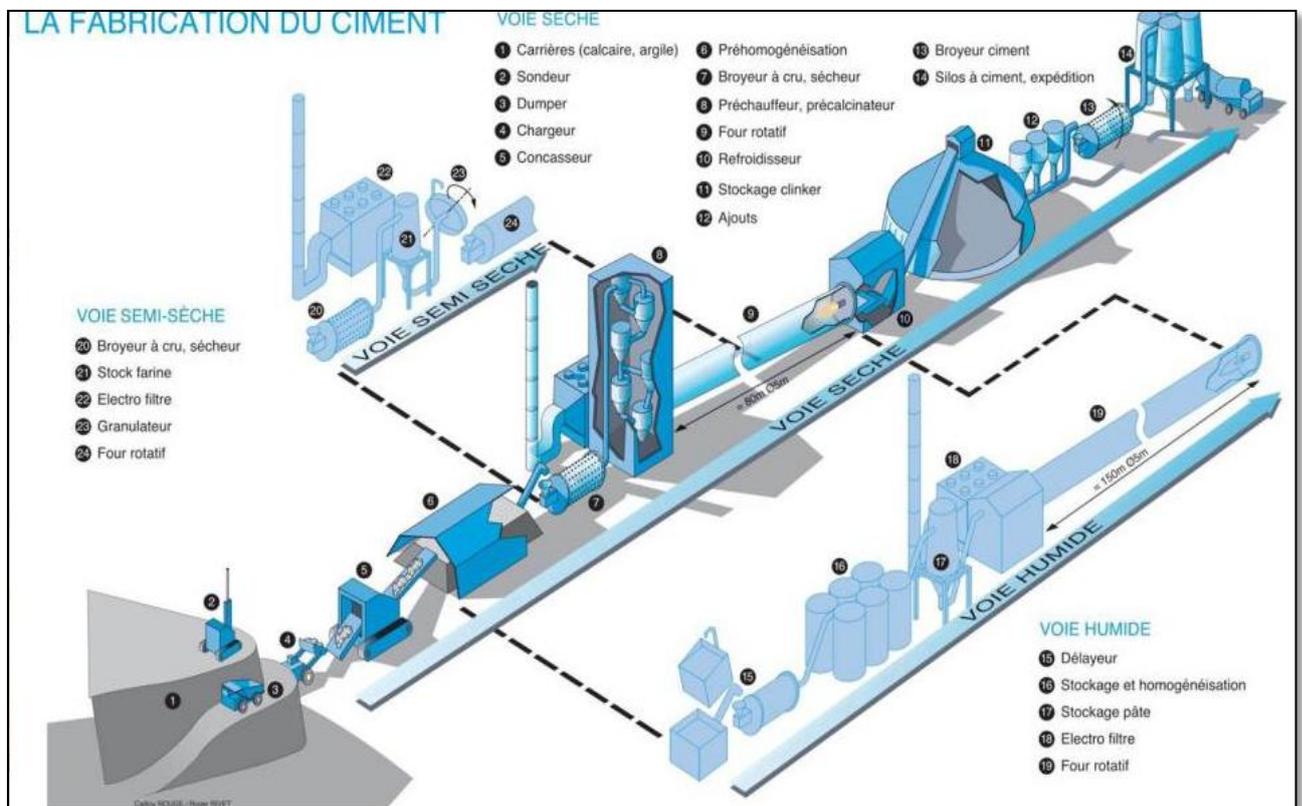


Figure I.4: Les différentes étapes de fabrication du ciment.

I.4. Constituants principaux et additions

I.4.1. Constituants du clinker

C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkirisation) du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO) de la silice (SiO₂) et de l'alumine (AL₂O₃). Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne..). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur, donne des Portland [3].

Les éléments simples (CaO, SiO₂, AL₂O₃ et Fe₂O₃) se combinent pour donner les constituants minéraux suivants : [6]

- Silicate tricalcique (C₃S) : de formule chimique 3CaO.SiO₂ (Alite).
- Silicate bicalcique (C₂S) : de formule chimique 2CaO.SiO₂ (Bélite).
- Aluminate tricalcique (C₃A) : de formule chimique 3CaO.AL₂O₃ (Célite).
- aluminoferrite tétra calcique (C₄AF) : de formule chimique 4CaO .AL₂O₃ .Fe₂O₃ (Félite).

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na₂O, K₂O), de la magnésie (MgO), diverses traces de métaux.

La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci.

A l'aide du microscope, on peut distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases, auxquelles les chercheurs donnèrent les noms suivants :

- A = alite (phase cristallisée), se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grands (grains anguleux foncés) de l'ordre de 50μ.
- B = bélite (phase vitreuse), se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).
- C = célite (phase vitreuse légèrement foncée et claire), se trouve dans le clinker sous forme impure et de phase vitreuse. [1]

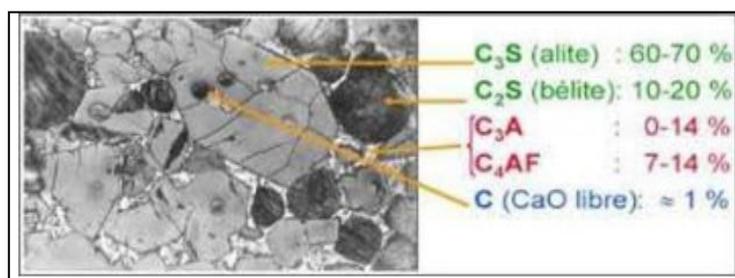


Figure I. 5: Microphotographie d'un clinker [7].

Les compositions chimiques et minéralogiques du clinker sont comprises dans les limites données par Le tableau (I.1) ci –dessous :

Tableau I. 1: Composition chimique et minéralogique du clinker [4].

Composants Minéralogiques	Teneurs limites (%)	Teneurs moyenne (%)
C_3S	40-70	60
C_2S	00-30	15
C_3A	02-15	08
C_4AF	00-15	08
Oxydes	/	/
CaO	60-69	65
SiO_2	18-24	21
Al_2O_3	04-08	06
Fe_2O_3	01-08	03
MgO	<05	02
K_2O , Na_2O_3	<02	01
SO_3	<03	01

I.4.2. Les autres constituants des ciments

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les autres constituants associés au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques [1].

Les constituants les plus utilisés sont:

I.4.2.1. Calcaires

Les calcaires sont considérés comme un des constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium $CaCO_3$ supérieure à 75% en masse [1].

I.4.2.2. Laitier granulé de haut fourneau

Le laitier est un sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau [1].

I.4.2.3. Cendres volantes (V ou W)

Elles sont les produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue :

- Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques;
- Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques [1].

I.4.2.4. Schistes calcinés

Ce sont des schistes que l'on porte à une température d'environ 800 °C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques [1].

I.4.2.5. Fumée de silice

Les fumées de silices sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0,1 µm). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent être présentes pour au moins 85 % (en masse). Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques[1] .

I.4.2.6. Fillers

Ce sont des « constituants secondaires »des ciments, dont ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau) [1].

I.5. Classification des ciments courants

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme NF EN 197 1. Le tableau (I.2) ci –dessous donne la liste des différents types des ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu'ils comportent.

Tableau I. 2 : Les différents types de ciment courants [5].

Désignations	Types de Ciments	Teneur en clinker	Teneur en% de l'un de constituants suivants : laitier pouzzolanes, cendres, calcaires schistes, fumées de silice	Teneur en constituants secondaires
C P A- CEM I	Ciment portland	95 à 100%		0 à 5%
C PJ-CEM II/A CPJ-CEMII/B	Ciment portland Composé	80 à 94% 65 à 79%	-De 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où les constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10% (*) -de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus(*).	0 à 5%
CHF-CEM III/A CHF-CEM III/B CLK-CEMIII/C	Ciment de haut fourneau	35 à 64% 20 à 35% 5 à 19%	-36 à 64 % de laitier de haut fourneau -66 à 80 % de laitier de haut fourneau -81 à 95% de laitier de haut fourneau	0 à 5% 0 à 5% 0 à 5%
CPZ-CEMIV/A CPZ-CEMIV/B	Ciment pouzzolanique	65 à 90% 45 à 64%	-10 à 35 %de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à10%. -36 à 55 %comme ci-dessus	0 à 5% 0 à 5%
CLC-CEM V/A CLC-CEM V/B	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64% 20 à 39%	-18 à 30 % de laitier de haut fourneau et 18 à 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes. -31 à 50 % de	0 à 5% 0 à 5%

			chacun des deux constituants comme ci-dessus.	
--	--	--	---	--

(*) Le pourcentage de fillers est limité à 5%.

I.6. Propriétés des ciments

I.6.1. Caractéristique physiques

I.6.1.1. Comportement physico –chimique de la pâte

Le ciment est essentiellement constitué de :

- Silicate tricalcique : C_3S
- Silicate bicalcique : C_2S
- Aluminate tricalcique : C_3A
- Aluminoferrite tétracalcique: C_4AF

Une fois la poudre de ciment mélangée à l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés tables avec formation de en aiguilles plus cristaux ou moins enchevêtrées produisant la prise. Cette réaction chimique accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon les ciments et la rapidité de prise [5].

I.6.1.2. La prise

La prise du ciment c'est-à-dire le passage de la pâte de ciment (ciment + eau) d'une consistance fluide à un état solide est une phase essentielle dans la fabrication du béton ou mortier puisqu'elle donne sa cohésion au matériau. La norme spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de : 1h30 pour les ciments des classes 32,5 et 32.5R. 1h pour les ciments des classes 42,5-42,5R-52,5-52 ,5R. D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2h 30 à 3h30 pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'entendant pour une température ambiante de 20°C [5].

I.6.1.3. Durcissement

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement rapide qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent de croître. Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classe élevé et de préférence de classe « R » c'est-à-dire ayant la

caractéristique complémentaire « Rapide ». Il est également possible d'utiliser du ciment alumineux fondu CA, qui après quelques jours a atteint la quasi-totalité de sa résistances [5].

I. 6.1.4. Chaleur d'hydratation

La dissolution des différents constituants est exothermique et, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en C3A que l'on intérêt à les temps chaud. Suivant les ciments, cette chaleur est comprise à 12 heures, approximativement, entre 65 j/g par exemple pour certains CHF-CEM III/B et 300 j/g pour certains CPA-CEM I [5].

I. 6.1.5. Finesse de mouture

La finesse de mouture, également appelée finesse Blaine, exprimée en cm^2/g , représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1kg de ciment .elle est d'une façon générale, comprise entre 3000 et 3500 cm^2/g , certains ciments prompts naturels (CNP) ont un Blaine supérieure à 4500 cm^2/g . Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'éventement du Ciment sont accrus [5].

I. 6.1.6. Retrait

Lorsque l'élément du béton ou mortier se trouvera dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent ; c'est le retrait. On mesure le retrait sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4×4cm, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%. La norme impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

- 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les ciments portland CPA-CEM I ET CPJ-CEMII de classe 32 ,5R.
- 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour des types de ciment identique mais des classes 32,5R-42,5 et 42,5R.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont : [5]

- La nature du ciment ;
- La finesse de mouture ;
- Le dosage en ciment, dans le béton ;
- Le dosage en eau ;
- La propreté et nature des granulats ;

I.6.1.7. Gonflement

Si l'élément se trouve dans une atmosphère à humidité relative supérieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier augmentent ; c'est le gonflement. Ce qui entraîne de l'apparition des tensions internes [5].

I.6.2. Caractéristiques chimiques du ciment**I.6.2.1. Ciments courants**

D'une façon générale, les ciments doivent satisfaire au respect d'un certain nombre d'exigences, résumées dans le tableau (I.3) .ci-après, quant à leur composition chimique.

Tableau I.3: caractéristique chimique de ciment courante [8].

Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale en % de la masse
Perte au feu	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes classes	≤ 5
Oxyde de magnésium MgO	CPA-CEM I	Toutes classes	≤ 5
Résidu insoluble	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes classes	≤ 5
Sulfates SO₃ limit supérieure	CPA-CEM I et CPJ-CEM II(*)	32,5 32,5 R 42,5	≤ 3.5
	CPZ-CEM IV	42.5	≤ 4
	Et CLC-CEM V	52.5 52.5 R	≤ 4
	CHF-CEM III	Toutes classes	≤ 4
Chlorure	Tous types De ciment (**)	52.5 R Toutes les autres classes	≤ 0.05 ≤ 0.10

(*) Valable pour les CPJ-CEM II/A et B à l'exception des ciments ne contenant que des schistes calcinés comme constituant, autre que le clinker, pour lesquels la limite est de 4.5% pour toutes les classes de résistance.

(**) Les CHF-CEM III/A et B et les CLK-CEM III/C peuvent contenir plus de 0.10 % de chlorures mais dans ce cas la teneur réelle doit être déclarée.

I.7. Hydratation du ciment portland

Le contacte du ciment déclenche un mécanisme d'hydratation comprenant (dans l'ordre où elles s'effectuent) les réactions d'adsorption, d'hydrolyse, de dissolution, de solvataion, de précipitation, cristallisation, germination, migration et de diffusion [9].

L'hydratation correspond à une suite de réactions chimiques entre les différents composants de clinker, le gypse et l'eau. Sur (le tableau I.4) on peut voir que les silicates de calcium représentent à peu près deux tiers de la composition du ciment. Ces produits réagissent avec l'eau et forment le produit principal d'hydratation, appelé calcium silicate hydraté C-S-H, et l'hydroxyde de calcium, CH appelé portlandite [11].

L'hydratation de l'alite (C_3S impur) et de la bélite (C_2S impur) fournit une grande partie de la résistance développée dans la pâte du ciment. Le C-S-H et le CH occupent respectivement environ 50 à 60% et 20 à 25% du volume total des hydrates.

Le C-S-H est un gel amorphe qui contient des pores, appelés pores de gel, dont le diamètre est de l'ordre de quelques nanomètres. La finesse de la porosité de gel, crée une surface spécifique de quelques centaines de m^2/g .

Par conséquent, le C-S-H est responsable de la plupart des propriétés de la pâte de ciment durcie, comme la résistance, la perméabilité, les variations de volume, etc.

Une autre conséquence de la porosité très fine et de la surface spécifique très grande est l'association et les interactions significatives entre la phase solide et la phase aqueuse de C-S-H. En plus de l'eau dans les pores de gel, le C-S-H contient une certaine quantité d'eau chimiquement liée. Contrairement au C-S-H, le CH est un matériau cristallin avec une composition fixe. C_3A et C_4AF réagissent avec le gypse et l'eau et produisent l'ettringite [10].

A température ambiante, après le mélange du ciment et de l'eau, le coulis préparé reste dans un état relativement fluide jusqu'à 2 à 4 heures et ensuite commence à se solidifier avec une vitesse plus rapide. La phase de prise initiale correspond au temps nécessaire pour que le coulis perde sa fluidité. La résistance de ciment augmente rapidement dans les deux premiers jours et continue à augmenter plus lentement pendant plusieurs mois. Le processus d'hydratation et la formation de la microstructure de la pâte du ciment, schématisés sur la figure (I. 6), commencent par la production des hydrates solides qui naissent à la surface des grains anhydres et remplacent l'espace initialement rempli par l'eau. Ces hydrates, appelés C-S-H de faible densité forment une matrice continue et relient les grains anhydres. En raison de

leur densité plus faible ($\sim 2 \text{ gr/cm}^3$ à comparer avec $3,2 \text{ gr/cm}^3$ pour les grains anhydres) ils occupent un volume plus grand que les grains anhydres. Par conséquent, la porosité capillaire qui est initialement remplie par l'eau, diminue progressivement au cours de l'hydratation. Les hydrates de faible densité contiennent des impuretés et ont une porosité élevée, environ 0,37 pour un ciment ordinaire hydraté à température ambiante [12].

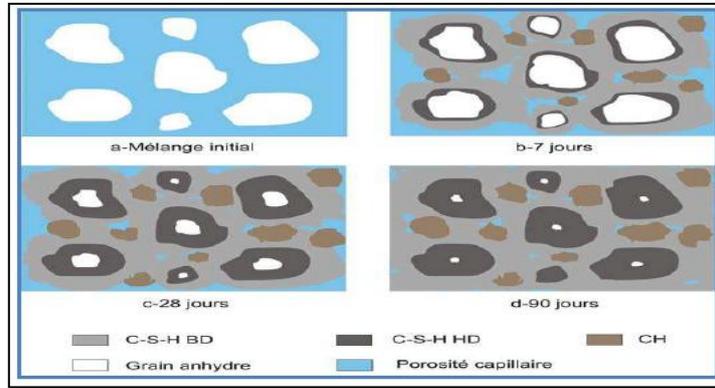


Figure I.6: Le processus d'hydratation de la pâte du ciment : (a) Mélange initial ; (b) 7 jours ; (c) 28 jours ; (d) 90 jours. [10]

Tableau I 4: Les différentes phases de clinker [13].

Désignation des minéraux purs	Formules	Abréviation	Solution solide de la phase pure présente dans le clinker	Répartition %
Silicate tricalcique	$3\text{CaO}, \text{SiO}_2$	C_3S	Alite	45 à 65
Silicate bicalcite	$2\text{CaO}, \text{SiO}_2$	C_2S	Bélite	10 à 30
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Célite	5 à 15
Aluminoferrite de calcium	$2\text{CaO}, p\text{Al}_2\text{O}_3$ $(1-p)\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_2\text{A}_p\text{F}_{1-p}$	Aluminoferrite	5 à 15

CHAPITRE II

Bétons et mortiers



II.1. Les bétons

II.1.1. Introduction

Le béton est un matériau de construction largement utilisé, ce matériau est hétérogène avec ses différents constituants, soit à la mise en œuvre (béton frais), soit après le durcissement (béton durci). Ses composants sont déterminés dans des proportions étudiées afin d'obtenir des propriétés souhaitées telles que la résistance mécanique, la consistance, la durabilité, l'aspect architectural, la résistance au feu, l'isolation thermique et phonique, et ceci en utilisant des méthodes spécialisées dites « méthodes de formulation du béton ». Il est vu comme une matière moderne, grâce à sa grande résistance à la compression. Le principe du béton est pourtant connu depuis l'antiquité. Bien que sa fabrication soit plutôt simple, certaines règles doivent être respectées. En effet, l'eau, le ciment, les adjuvants et les granulats qui constituent le béton sont soumis à des normes strictes. [20]

Le matériau béton, est devenu irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques. Simple en apparence, il est en réalité très complexe, avec une diversité d'applications et de méthodes de formulations. C'est le matériau le plus utilisé au monde : environ 7 milliards de mètres cubes de béton sont mis en œuvre annuellement.

La qualité et le potentiel du matériau béton dans la structure dépend bien sûr, des matériaux de base qui entrent dans la formulation mais également des opérations de : malaxage, mise en œuvre, vibration et cure (protection contre la dessiccation). Il s'agit de déterminer la meilleure qualité du béton qu'on puisse obtenir.

Pour ne citer que la résistance à la compression du béton qui reste, du point de vue de l'ingénieur, la propriété la plus importante du matériau, si l'on exclut les indicateurs de durabilité, nous allons examiner ci-après les différents facteurs ayant une influence sur cette résistance, et sur lesquels on pourra compter pour l'amélioration de la qualité du béton. [14]

II.1.2. Historique

L'histoire du béton montre que sa technique, bien fixée empiriquement par les Romains, avec la chaux grasse et la pouzzolane, a évolué seulement au 19^{ème} siècle, après l'apparition des chaux hydrauliques et des ciments.

L'ingénieur Bélidor, auteur de l'architecture hydraulique (1737), étudia la composition du béton et introduisit le mot béton dans son sens actuel.

L'invention de la chaux hydraulique par Louis Vicat en 1817, celle du ciment Portland par Aspdin en Ecosse en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en France en 1830 préparent l'avènement du béton.

A l'origine, le béton était constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la plupart des cas, le ciment était du ciment Portland obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation, puis broyés. Par la suite, de petites quantités d'adjuvants chimiques ont été ajoutées au mélange afin d'améliorer certaines des propriétés du béton à l'état frais ou durci. Plus tard, d'autres matériaux de nature inorganique ont été utilisés dans le béton, pour des raisons économiques, dans la plupart des cas. Ces substances inorganiques sont moins coûteuses que le ciment portland en raison de leur disponibilité à l'état naturel.

II.1.3. Principaux avantages et inconvénients du béton

II.1.3.1. Avantages du béton

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien ;
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer ;
- Il devient solide comme la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles ;
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint) ;
- Il convient aux constructions similaires. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas du béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité ;
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées ;
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication [20].

II.1.3.2. Inconvénients du béton

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toute façon, il reste les inconvénients suivants :

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de bétons légers d'isolation)

- Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux) ;
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un Ouvrage [21].

II.1.4. Classification des bétons

Béton fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par sa caractéristique de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories [22].

En général, le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique :

- Béton très lourd : $> 2500 \text{ kg/m}^3$;
- Béton lourd (béton courant) : $1800 - 2500 \text{ kg/m}^3$;
- Béton léger : $500 - 1800 \text{ kg/m}^3$;
- Béton très léger : $< 500 \text{ kg/m}^3$.

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants :

- Béton de ciment (le ciment),
- Béton silicate (la chaux),
- Béton de gypse (le gypse)
- Béton asphalte ou bitumineux (bitume) [23].

II.1.5. Les domaines d'emploi du béton

II.1.5.1. Le bâtiment

Le béton tient une place essentielle dans l'urbanisme moderne. Cela semble normale lorsqu'on considère son utilisation dans la construction de logements : pour les murs, 80% des techniques en individuelle, plus de 90% en collectif pour les structures ; pour les planchers, le béton est pratiquement le matériau idéal. Le béton s'est également largement imposé dans les autres secteurs de la construction : bureaux, hôpitaux, locaux, ainsi que dans grands édifices publics et les bâtiments industriels [22].

II.1.5.2. Les travaux publics

- **Les ponts**

Les progrès techniques et, en particulier, l'évolution des caractéristiques du béton, permettent de réaliser des portées atteignant plusieurs centaines de mètres [22].

- **Les tunnels**

Pour les grands tunnels dont les exemples se multiplient dans le monde, le béton est, soit coulé sur place, soit utilisé dans des voussoirs préfabriqués. Ceux-ci sont posés à l'avancement de la machine à forer-le tunnelier [22].

- **Les barrages**

Les grands barrages sont le plus souvent en béton permettant des implantations dans les sites les plus difficiles [22].

- **Les routes**

La chaussée béton prend une part de plus en plus importante dans les grandes voiries routières et autoroutières, grâce au développement de techniques modernes : béton armé continu, dalle épaisse traitement de surface les voiries à faible trafic et aménagements urbains montrent un regain d'intérêt pour les solutions béton, qui leur assurent durabilité et faible cout d'entretien [22].

- **Autres ouvrages**

Il faut également citer les ouvrages hors du commun : structures offshores ou centrales nucléaires, dont les exigences requièrent des bétons aux caractéristiques mécaniques et à la durabilité élevées [22].

II.1.6. Les composants d'un béton

Le béton est un matériau composite, les trois composants de base d'un béton sont : l'eau, le ciment et les granulats. Des additifs peuvent y être rajoutés dans le but de modifier les propriétés telles que la maniabilité et la résistance. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimique et mécaniques des divers constituants sont différentes. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange figure (II.1)

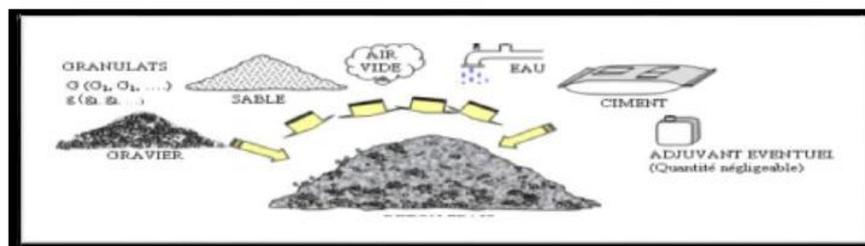


Figure II.1 : Les constituants de béton [22].

La confection d'un béton approprié à sa destination consiste à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants.

Dans les bétons les plus simples, le squelette granulaire est composé de deux coupures seulement, un sable et un gravier. Le ciment et l'eau de gâchage dont les proportions relatives en masse sont fixés; par le rapport E/C, vont former, avec les adjuvants éventuels, la pâte de ciment qui constituera le liant du béton. Ce rapport E/C joue un rôle primordial durant les étapes de vie du béton ; l'eau en excès le rend plus fluide à l'état frais mais diminue les résistances du béton durci. Des additions minérales (cendres volantes, fumées de silice, laitiers, fillers,..) Peuvent être rajoutées dans le but de modifier les propriétés du béton.

L'utilisation de ces éléments fins est toujours combinée à l'emploi de super-plastifiants pouvant réduire ainsi la quantité d'eau nécessaire à l'atteinte d'une fluidité suffisante. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les constituants présentent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques différentes et dans le quels chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange [5].

II.1.6.1. Le ciment

Le ciment est l'ingrédient essentiel pour la formation d'un béton. C'est par définition, un matériau dont les propriétés de liaison et de cohésion permettent de lier en un ensemble compact des fragments de matériaux. C'est un liant hydraulique à la base de calcaire et d'argile, qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau. Il forme ainsi une pâte qui fait prise et durcit progressivement. Dès que le ciment et l'eau sont mis en contact, plusieurs réactions chimiques ont lieu. La surface des grains de ciment se recouvre d'un film d'hydrates. Ces réactions s'opèrent alors plus lentement pendant une période dite dormante, avant de s'accélérer pendant la phase de prise. C'est le constituant de base du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

Il existe différents types de ciments sur le marché, qui se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. De ce fait, le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs) et de la nature des autres composants. Pour un béton courant, les ciments les plus utilisés sont les CEM II de classe 32,5 – 32,5 R – 42,5 – 42,5 R. Ce sont des ciments bien adaptés aux usages les plus courants du bâtiment.

El Barak et col. (2008) ont montré que le dosage en ciment a un effet sur la viscosité du béton pour un gradient de vitesse faible [16].

II.1.6.2. Additions minérales

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, le laitier de

haut fourneau et les cendres volantes. Ce sont des additions fines définies comme la fraction granulométrique d'un granulat qui passe au tamis de 0,063 mm (Norme NF EN 933 - 8). En remplissant les micro-vides dans l'empilement des agrégats (sable, graviers), ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité. Ces ajouts font augmenter la cohésion et entraînent donc une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton. Ils entraînent également une réduction de la chaleur d'hydratation et, par conséquent, le risque de fissuration thermique. D'un autre côté, les additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques [17].

II.1.6.3. L'eau

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation.

L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum en réduisant la quantité d'eau et une amélioration de l'ouvrabilité en augmentant la teneur en eau. C'est lors de la recherche de cet optimum que les adjuvants peuvent jouer un rôle.

Le rapport E/C est un critère important des études sur le béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ces performances : résistance à la compression, durabilité.

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher le béton. Certes, l'eau potable distribuée par le réseau du service public est toujours utilisable mais, de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'utiliser une eau non potable. La norme XP P 18-303, a permis de préciser à quelles conditions une eau est utilisable.

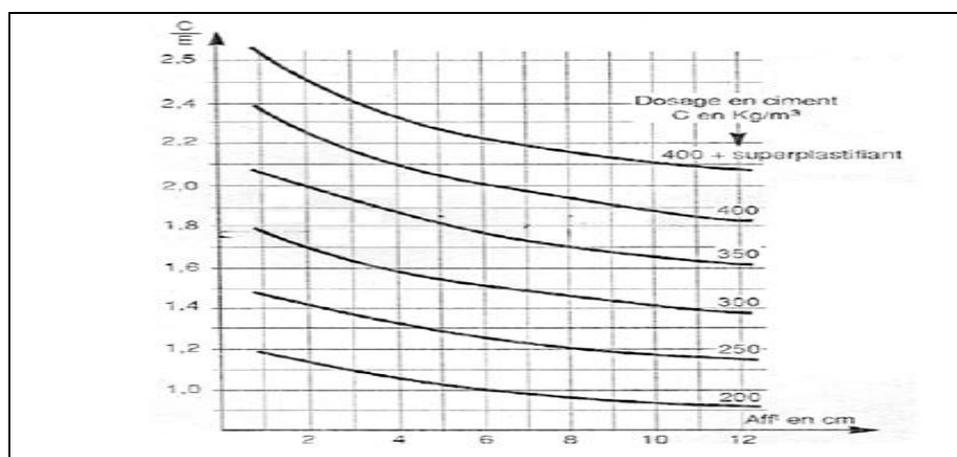


Figure II.2 : Influence du dosage en eau de ciment fixé.

L'ajout d'eau a bien sûr pour conséquence d'augmenter l'ouvrabilité du béton. A titre d'exemple, la figure (II.2) montre un abaque tiré de la méthode de formulation de Dreux et Gorisse, qui permet, pour différents dosages en ciment, d'évaluer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un affaissement visé [18].

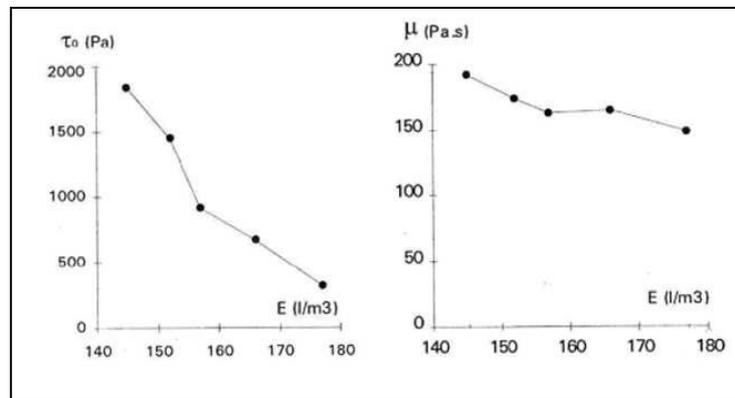


Figure II.3 : Influence du dosage d'eau sur la rhéologie.

Un ajout d'eau conduit également à une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique, comme on peut le voir sur la figure(II.3).

II.1.6.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui, incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égale à 5% du poids du ciment, permettent d'améliorer certaines de ses propriétés. Ils fournissent à la formulation de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur fabrication par temps froid ou chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés des bétons durcis, voire même lui conférer des propriétés nouvelles.

Il existe plusieurs types d'adjuvants qui sont régis par la norme NF EN 934-2, mais ceux qui conditionnent l'ouvrabilité du béton sont les super plastifiants. Ce sont des polymères organiques solubles dans l'eau, dont la synthèse, réalisée par une opération complexe de polymérisation, produit de longues chaînes de molécules de masses molaires élevées. Ces molécules vont s'enrouler autour des grains de ciment et conduisent, suivant leur nature, à une répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains ou à une répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres.

Ces réactions conduisent à une défloculation et à une dispersion des grains de ciment. Ainsi, le principal effet des super-plastifiants est une meilleure distribution des grains de ciment et, en conséquence, le mélange d'une plus grande quantité de ciment dans un même volume d'eau [16].

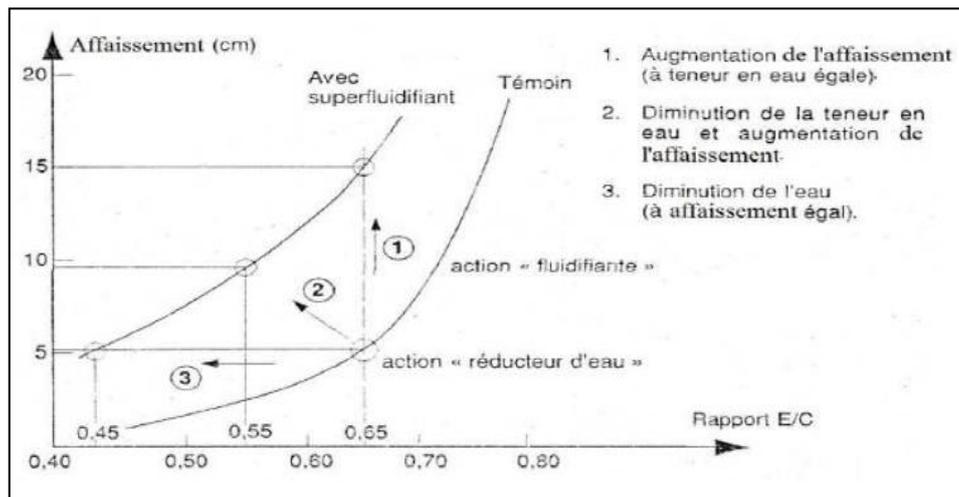


Figure II.4 : Utilisation des super- plastifiants.

Les plastifiants et les super-plastifiants permettent, comme décrit sur la figure (II.4), soit de réduire le dosage en eau à maniabilité constante, induisant donc un gain de résistance en compression, soit d'augmenter l'affaissement à teneur en eau constante. Les deux types de produits sont différenciés par leur efficacité en termes de réduction d'eau, les superplastifiants étant plus efficaces [16].

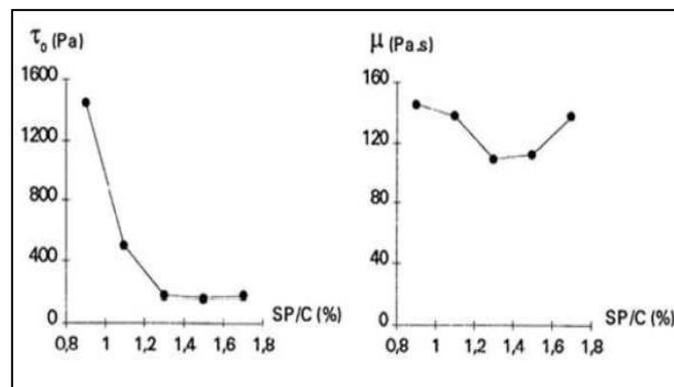


Figure II.5 : Effet de dosage de super plastifiant.

Différents adjuvants peuvent être utilisés pour améliorer les caractéristiques du béton [16] :

- ✓ Accélérateurs de prise
- ✓ Plastifiants
- ✓ Super plastifiants
- ✓ Retardateurs de prise
- ✓ Colorants en poudre
- ✓ Entraîneurs d'air

II.1.6.5 .Les granulats

Les granulats sont les constituants essentiels des bétons, qui conditionnent à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Leur élaboration relève des industries extractives.

Les granulats sont définis par la norme P18-540, comme étant un ensemble de grains minéraux destinés à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondations, de bases de roulement des chaussées des assises et des ballasts de voies ferrées.

On peut distinguer les granulats naturels issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (c'est-à-dire concassage, broyage, criblage, lavage, sélection) et artificiels qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais, de sous-produits industriels (laitiers, scories, etc.) ou encore de la démolition d'ouvrages de bâtiments divers en béton, souvent appelés granulats recyclés.

Les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et, dans certains cas, chimiques influencent les performances du béton. Par ailleurs, les granulats présentent un certain nombre de propriétés intrinsèques qui ne sont pas reliées à la nature du massif rocheux d'origine, telles la forme et la dimension des grains, la texture de surface et l'absorption ; or toutes ces propriétés peuvent avoir une influence considérable sur la qualité du béton, autant à l'état frais qu'à l'état durci. Il ne faut pas perdre de vue qu'un béton tire du granulat une bonne part de sa résistance et plus particulièrement du gros granulat. D'où la nécessité d'employer des granulats de qualité, et de dimension maximale, celle-ci devant rester compatible avec une bonne facilité de mise en œuvre. Pour pouvoir construire des ouvrages fiables, selon les normes et de haute efficacité technico-économique, il faut donc, déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, puisque ces derniers influent fortement sur les caractéristiques du béton ; à savoir les propriétés dimensionnelles, physico-chimiques et mécaniques.

On a constaté qu'un granulat peut paraître insatisfaisant sous certains aspects, alors qu'aucun problème n'a été détecté lorsqu'il a été utilisé dans le béton. Par exemple, une éprouvette de roche peut se rompre lorsqu'elle est soumise au gel, mais ne pas se briser si elle est confinée dans du béton. Cela est d'autant plus vrai lorsque les granulats sont bien enrobés d'une pâte de ciment de faible perméabilité. Cependant, les granulats considérés comme mauvais sous plus d'un aspect, ne sont pas souhaitables pour la confection d'un béton de qualité. Ceci dit, les essais sur les granulats sont d'une aide précieuse lors de leur sélection pour la fabrication des bétons [16].

On distingue les familles de granulats suivantes :

- Fillers 0/D où $D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm

- Sablons 0/D où $D < 1$ mm avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm
- Sables 0/D où $1 < D < 6,3$ mm - Graves 0/D où $D > 6,3$ mm
- Gravillons d/D où $d > \text{let } D < 125$ mm
- Ballasts d/D où $d > 25$ mm et $D < 50$ mm [24].



Figure II.6: Sable ou Granulats et des graviers [16].

II.1.7. Propriétés des bétons

Le béton est un matériau facile à mouler quelles que soient les formes de l'ouvrage, à l'épreuve du temps, économique, résistant au feu et nécessitant peu d'entretien. Matériau composite, mis en œuvre de multiples manières, il répond à un grand nombre de spécifications : résistance mécanique, notamment à la compression, isolation thermique et phonique, étanchéité, aspect, durabilité, sécurité incendie. Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés: d'une part à l'état frais, alors qu'il est plastique et qu'on peut le travailler; d'autre part, à l'état durci, alors que sa forme ne peut plus être modifiée mais que ses caractéristiques continuent à évoluer durant de nombreux mois, voire des années [29].

II.1.7.1. L'ouvrabilité

Essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend apte à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés. L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures [30].

De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité: type et dosage en ciment, forme des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau. Il ne faut cependant pas considérer que le dosage en eau peut être augmenté au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'améliorer l'ouvrabilité. Un excès d'eau se traduit, entre autres inconvénients, par un phénomène de « ressuage », qui est la création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation. Les autres conséquences d'une trop forte teneur en eau sont:

- la diminution de la compacité et, corrélativement, des résistances;
- une porosité accrue;
- un risque de ségrégation des constituants du béton;
- un retrait augmenté;
- un état de surface défectueux se traduisant notamment par du bullage.

La teneur en eau doit être strictement limitée au minimum compatible avec les exigences d’ouvrabilité et d’hydratation du ciment. La grandeur qui caractérise l’ouvrabilité est la consistance; sa mesure peut être effectuée facilement sur chantier avec la méthode du cône d’Abrams ou « slump test », qui est un essai d’affaissement d’un volume de béton de forme tronconique [31].

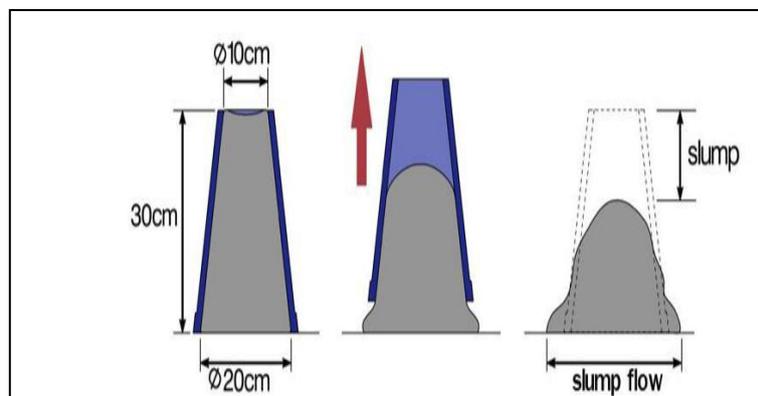


Figure II.7: Test du cône d’Abrams [31].

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

Tableau II.1 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône [32].

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	1
Plastique P	5 à 9	2
Très Plastique TP	10 à 15	—
Fluide F	16	3

Tableau II.2: Les différentes formes de béton selon leur affaissement trouvé [32].

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

II.7.2. Le béton durci

La porosité

Une caractéristique essentielle du béton durci est sa porosité – rapport du volume des vides au volume total. Les études de Féret (début du siècle) avaient déjà établi le lien entre la porosité du béton et sa résistance. L'importance de cette caractéristique sur la résistance du béton aux agents agressifs, sur la carbonatation et sur la tenue au gel a été démontrée depuis. C'est donc un facteur déterminant de la durabilité du béton. [30]

La recherche d'une porosité minimale doit nécessairement passer par:

- l'augmentation de la compacité du béton frais grâce à une bonne composition du béton et à des moyens de mise en œuvre adaptés; les compacités réellement atteintes sur chantier ne dépassent guère 0,850: dans 1 m³ de béton très bien préparé et vibré par des moyens puissants, il existe encore 150 litres d'air ou d'eau, constitués notamment par des canaux extrêmement fins, répartis dans la pâte de ciment durcie (capillaires);
- l'augmentation du dosage en ciment et le choix de son type ont une influence favorable sur la diminution de la porosité; les hydrates formés par l'hydratation du ciment ont un rôle essentiel de colmatage des capillaires.

On améliore la compacité du béton en jouant sur la granulométrie des granulats dans la fraction des éléments fins, et sur la réduction d'eau. La faible porosité d'un béton présente de nombreux avantages déterminants pour sa durabilité.

- Un béton en contact avec un milieu agressif (eau pure, eaux séléniteuses, eau contenant des acides organiques) subira une attaque beaucoup plus lente si les capillaires du béton sont moins nombreux et plus fins.
- Dans le cas du béton armé, une faible porosité est indispensable, pour protéger les armatures contre les risques de corrosion.

L'acier est en effet protégé contre son oxydation tant qu'il est dans un milieu de pH basique; or, l'hydratation du ciment produit suffisamment de chaux pour créer ce milieu basique. En revanche, si cette chaux est mise en contact avec le gaz carbonique de l'air, elle se carbonate pour former du carbonate de calcium CaCO₃ de pH acide. La diffusion de l'air dans les capillaires du béton sera d'autant plus lente que le béton présente une faible porosité retardant ainsi sa carbonatation et la protection des armatures contre la corrosion [30].

II.1.8. Différents types de bétons

II.1.8.1. Béton ordinaire BO

Le béton est un ensemble homogène obtenu par le mélange du ciment, de l'eau, des granulats et quelque fois d'adjuvants. Sa masse volumique se situe aux alentours de 2 500 Kg/m³, Les bétons peuvent être armés ou non, ou même précontraints.

Ses performances (durabilité, résistance au feu, etc.) varient selon ses composants. C'est un matériau dont le moulage est assez facile et il est adapté à tous les types de formes d'ouvrage. Pour un béton ordinaire, nous pouvons utiliser des ciments de type CEM I, CEM II, CEM III, CEM III/C ou CEM V.

Le choix et le dosage déterminent la résistance du béton ainsi que ces différentes propriétés et une bonne partie de la résistance du béton est tirée des granulats, principalement des gros granulats, d'où l'importance de l'emploi des granulats ayant des dimensions maximales et de bonnes qualités. Plus les grains seront fins, plus le dosage du ciment devra être élevé, l'eau doit être propre dans le but d'éviter au maximum les impuretés telles que les matières organiques ou les alcalis pouvant entraîner la corrosion du béton armé en cas d'utilisation d'armatures. La quantité d'eau est en général comprise entre 140 et 200 litres/m³. On estime que 50% de l'eau de gâchage servira à l'hydratation du ciment et les 50% restant contribuera à la plasticité du béton, nécessaire pour sa mise en œuvre, le rapport granulat-sable doit être inférieur à 2. En effet, si le rapport est supérieur à 2,2 la résistance en compression ainsi que la densité augmenteront considérablement. Par contre, cela rendra l'ouvrabilité ou la maniabilité du béton moindre.

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes existent notamment :

- La méthode de Baron
- La méthode de Bolomey
- La méthode de Féret
- La méthode de Faury
- La méthode de Dreux-Gorisse [28].

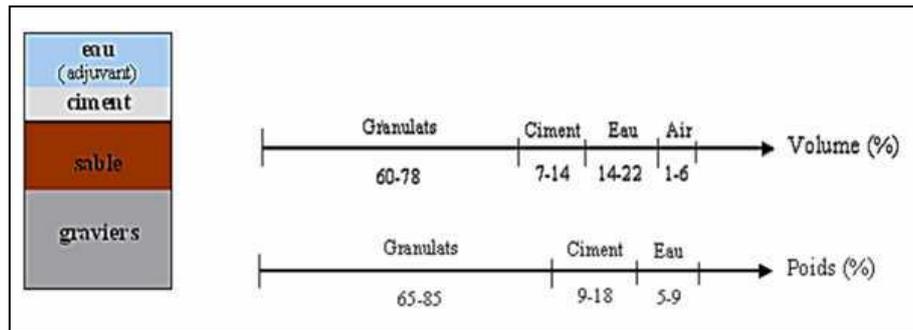


Figure II.8: Pourcentages des constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [34].

II.1.8.2. Béton de Sable

Le béton de sable est un matériau utilisé bien antérieurement au béton traditionnel.

Selon POIEVIN [43], ce matériau trouve ses origines dans les années 1850-1875 sous l'appellation de "béton aggloméré". Il était alors constitué de sable, ciment, chaux et eau.

COIGNET qui est à l'origine de ce matériau construisit pour sa famille en 1851 à saint Denis (nord de Paris, France) comme le montre la figure (II.9), une maison 60m de long et 7m de hauteur, du type R+4, avec mur de soutènement. Cet ouvrage fût entièrement édifié en béton aggloméré, des fondations jusqu'au toit [44].



Figure II.9: La maison de COIGNET [45].

Un béton de sable est un béton fin constitué par un mélange de sables, de ciments, d'additions et d'eau ; et éventuellement des adjuvants. Pour répondre aux besoins de certains usages, des ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, colorants...

Un béton de sable chargé est un béton de sable comportant un ajout de gravillon avec un rapport gravillon (G) / sable (S) est inférieur à 0,7 ($G / S < 0,7$)

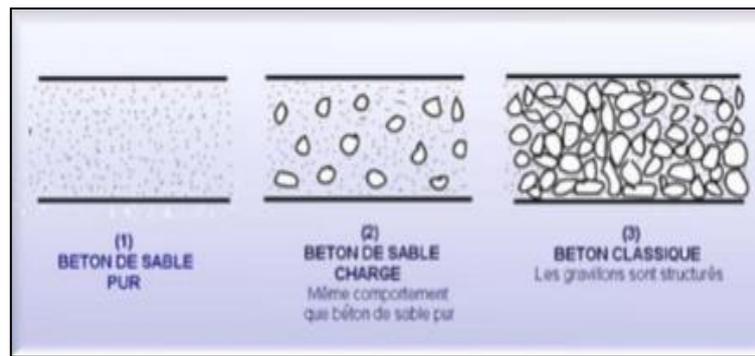


Figure II.10: BS, BS chargé et BO [46].

II.1.8.3. Béton Autoplaçant BAP

Les maîtres d'ouvrage, architectes, ingénieurs, entrepreneurs du BTP, fabricants de béton et pré-fabricants ont toujours recherché un béton permettant une mise en place aisée ; un bon remplissage des coffrages et des moules ; un parfait enrobage des armatures ; une forte compacité. Avec comme principaux objectifs la suppression des opérations coûteuses en main d'œuvre (vibration, tirage à la règle, ragréage, etc.); l'obtention d'une qualité, d'une régularité et d'une durabilité des bétons encore plus grandes; le coulage facilité de structures complexes et souvent fortement ferrillées; l'allongement des temps d'ouvrabilité; l'amélioration de la qualité esthétique des parements; l'augmentation des cadences de production et de la productivité des chantiers et des usines; la réduction de la pénibilité des tâches des ouvriers; la réduction des nuisances sonores sur les chantiers; l'obtention d'une parfaite planéité des hourdis et des dalles; la fabrication de ces bétons dans la majorité des centrales du réseau BPE et des usines de préfabrication à partir de matériaux courants disponibles localement; la diminution des reprises de bétonnage.

Le béton autoplaçant a été développé au Japon en 1988, il représente l'un des plus importantes avancées dans la technologie des bétons dans les deux dernières décennies.

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton capable, sous le seul effet de la pesanteur, de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et très encombrés sans nécessiter pour autant des moyens de vibration afin de consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène. Ce type de béton doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrées avec, cependant, une vitesse dépendante de la viscosité du mélange. Pour remplir cette condition, le béton doit être très fluide, c'est-à-dire très déformable. Or ceci n'est possible que si le rapport eau/ciment est élevé ou si le béton contient un superplastifiants [27].

Le BAP constitue dans de nombreux domaines une alternative intéressante au béton conventionnel vibré. Ces domaines comprennent le bâtiment, le génie civil, les tunnels, la préfabrication et les travaux d'assainissement et de réhabilitation. Comparé au béton vibré,

Les arguments en faveur du BAP sont les suivants:

- ✓ Rendements améliorés et exécution plus rapide
- ✓ Réduction des nuisances sonores durant l'exécution
- ✓ Liberté accrue des formes de coffrage
- ✓ Facilité de bétonnage d'éléments exigus
- ✓ Qualité accrue des surfaces de béton
- ✓ Réduction/suppression des travaux de ragréage
- ✓ Facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante
- ✓ Remplissage de parties difficilement accessibles
- ✓ Diminution de la pénibilité du travail et suppression de l'apparition du syndrome du vibreur.

Autre l'amélioration de la productivité des entreprises, le béton BAP permet d'accroître la qualité et la durabilité des ouvrages en béton [25].



Figure II.11: Mise en œuvre d'un BAP [35].



Figure II.12 : Application de béton autoplaçant sur des armatures [36].

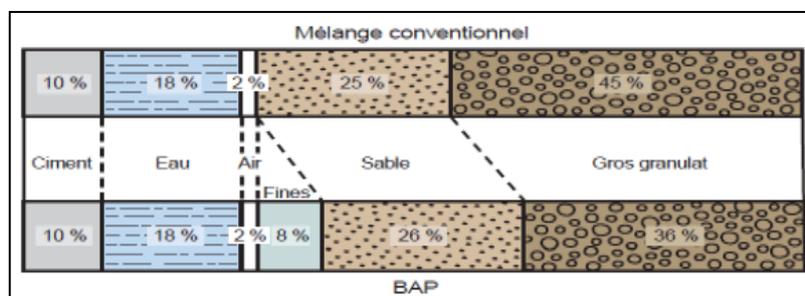


Figure II.13 : exemple de matériaux utilisés dans les bétons conventionnel et autoplaçant en volume absolu [26].

II.1.8.4. Béton à hautes performances (BHP)

Hautes performances signifient facilite de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages [37].

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance. Cette caractéristique facilement mesurable a fait des progrès spectaculaires à partir des années quatre-vingt. Elle est passée de 30/35 MPa à plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances, voire plus (150 à 200 MPa pour des bétons fibrés à ultra hautes performances, BFUP).

Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté. Ces bétons sont, en fait, des matériaux à très haute compacité.

Les BHP présentent une micro-texture très dense et une faible porosité, plus résistants aux agents agressifs et de façon générale présentent une durabilité accrue. Ils permettent d'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat, agressions marines, effets du gel, attaques acides, etc).

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par :

- une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre ;
- un rapport Eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4[28].



Figures II.14: Quelques exemples d'application des BHP [35].

II.1.8.5. Béton fibré

a) Introduction

Le béton de fibres est un matériau qui a connu ces derniers temps un grand développement et nombreuses sont les études qui ont été effectuées durant les trois dernières décennies. On peut améliorer la résistance mécanique (post-fissuration) du béton en y incorporant des fibres (dosages traditionnels de l'ordre de 600 à 1200g/m³). L'incorporation de celles-ci dans le

béton rend ce dernier davantage ductile (moins fragile), multi fissurant, capables de limiter la propagation de l'endommagement tout en assurant une durabilité accrue.

Différents types de fibres peuvent être utilisés avec des propriétés spécifiques. C'est surtout le rapport entre la longueur et le diamètre des fibres (élancement) qui aura une influence sur les performances finales du béton fibré. On obtient ainsi un « béton fibré », souvent mis en œuvre par projection (tunnels) ou couramment utilisé [16].

b) Définition des bétons fibrés

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporé des fibres, Une technique récente, consiste à ajouter au béton, des fibres afin d'améliorer ses propriétés mécaniques (compression, fissuration, flexion). A la déference des armatures, les fibres sont réparties dans la masse du béton; elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement homogène.

Les fibres les plus couramment utilisées sont les fibres métalliques, les fibres organiques, et les fibres synthétiques [16].

c) Caractéristiques du béton fibré

Avant tout, il faut savoir qu'on appelle « fibre » un matériau d'une longueur allant de 5 à 60mm. Il existe plusieurs natures de fibres : métalliques, organiques et minérales. En fonction de leur nature, ces fibres ont des caractéristiques différentes et ne réagissent pas de la même façon. De ce fait, leur impact sur le béton peut varier.

Le principal avantage que présente le béton fibré métalliquement par rapport au béton ordinaire est le remplacement total ou partiel de ferraille dans la composition. Le premier but de l'utilisation de ces fibres est donc de remplacer les armatures traditionnelles, ce qui facilite la mise en place du béton. Pas de découpe ni de manipulation de ferraille à prévoir. De plus, elles ont aussi la capacité d'offrir au béton certaines propriétés telles qu'une résistance au feu augmentée ou une diminution des risques de fissuration. Les fibres organiques, quant à elles, améliorent le comportement du béton au jeune âge. Le treillis anti-fissuration devient inutile, le béton est plus homogène et les retraits de dessiccation pendant la phase de prise sont limités. Il est à noter que le rôle principal des fibres dans un matériau peut être lié à deux points essentiels :

- Le contrôle de la propagation des fissures dans un matériau en service, en réduisant l'ouverture des fissures (Couture des fissures), comme indiqué dans la figure (II.15)[38].

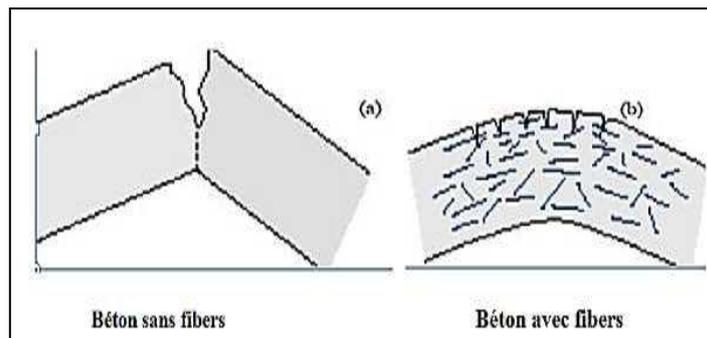


Figure II.15 : Fissuration dans le béton sans et avec fibres [39].

- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes voir figure (II.16).

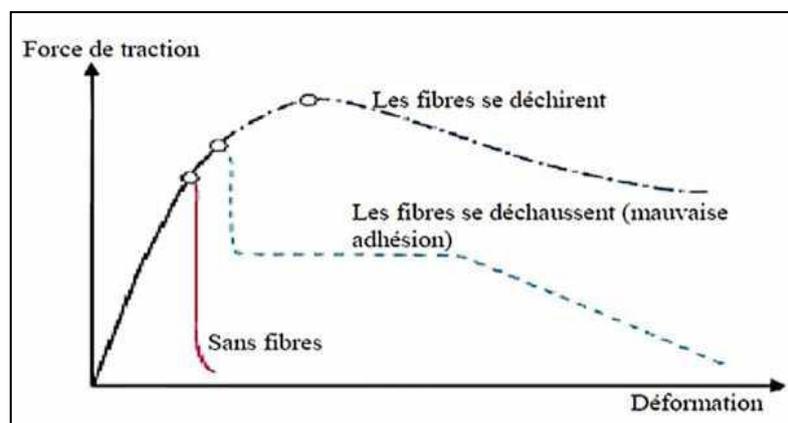


Figure II.16 : Comportement de charge -déformation de béton avec et sans fibres [40].

Les fibres sont intégrées dans le béton afin de l'améliorer. Mais il est bon de savoir que ces fibres lui confèrent également d'autres caractéristiques qu'on ne retrouve pas chez les autres bétons.

Parmi ces caractéristiques on peut citer :

- Résistance à la flexion et ductilité

Les fibres améliorent la ductilité du béton. Autrement dit, elles permettent au béton fibré de se déformer sans se rompre.

- Résistance à la fatigue

Les fibres rendent également le béton plus résistant sur le long terme en limitant la fissuration du matériau sous l'effet de charge cylindrique de fatigue.

- Résistance à l'abrasion

L'abrasion est un phénomène d'usure provoqué par des frottements répétés, pouvant provoquer la fissuration du matériau. Le fait d'incorporer des fibres au béton permet donc d'améliorer la résistance à l'abrasion et par conséquent de limiter la fissuration.

Les différentes propriétés de ces fibres rendent possible la construction d'ouvrages confrontés à des contraintes plus élevées.

Note :

L'utilisation de fibres augmente comme mentionné précédemment, la ductilité du béton, c'est-à-dire le béton fibré continue à se déformer après atteinte de sa résistance maximale. Cette propriété est fonction de la nature, de la quantité et de l'efficacité des fibres utilisés.

Il est important de se rappeler que la distribution uniforme des fibres dans le mélange est la condition essentielle pour obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques du béton fibré [41].

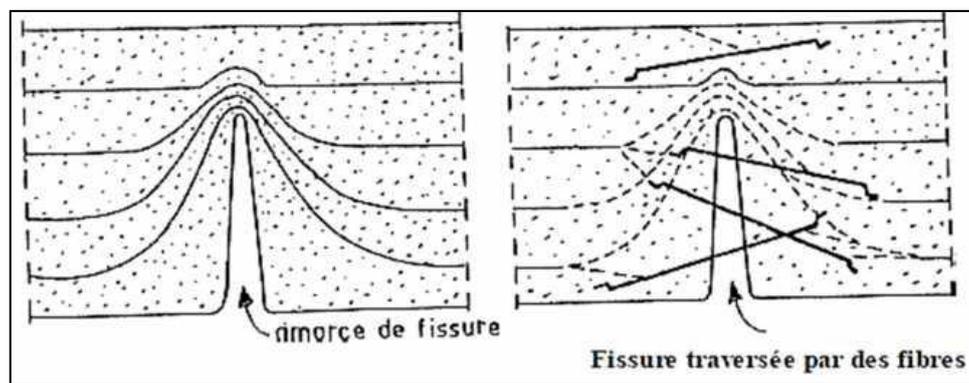


Figure II.17 : Rôle des fibres dans la matrice de béton [42].

d) Domaines d'application des bétons fibrés

Les bétons fibrés peuvent être utilisés pour une grande variété d'applications en bâtiment et en génie civil:

- béton coulé en place (dalles, planchers, fondations, voiles, pieux, etc.);
- béton préfabriqué (poutres, voussoirs, tuyaux d'assainissement, etc.);
- béton projeté (voie mouillée/voie sèche, construction et réparation de tunnels, confortement de parois, etc.);
- mortiers (prêts à l'emploi) de réparation et de scellement.

Le choix du type de fibres est fonction du domaine d'application et des performances souhaitées [33].

e) Avantages du béton fibré

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique [16].

✚ Aspect technique

L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépend du type de fibres et du dosage utilisé.

Aspect économique

Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont :

- ✓ Une réduction des intervenants sur le chantier, ce qui implique une réduction du coût de mise en place et du temps de construction;
- ✓ Une optimisation du dimensionnement [16].

a) Les principaux avantages techniques sont

- ✓ Un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton;
- ✓ Une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post fissuration

(Résistance résiduelle);

- ✓ Une énergie d'absorption élevée;
- ✓ Une résistance aux impacts, élevée;
- ✓ Une résistance à la fatigue élevée;
- ✓ Une augmentation de la résistance en cisaillement [16].

II.1.8.6. Les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances – BFUP

Les progrès en matière de matériaux de construction fait en permanence évoluer l'ingénierie des structures. Au cours des 20 dernières années, le développement de matériaux composites à base du ciment pourvus de fibres a permis d'établir une gamme de matériaux, actuellement appelés « bétons fibrés ultra-performants (BFUP) ».

Les BFUP sont toujours définis dans un premier temps par le niveau de résistance mécanique atteint, généralement supérieur à 150 MPa à la compression à 28 jours. Même si des essais en laboratoire avancent un potentiel bien plus élevé encore, les applications industrielles les plus nombreuses sont réalisées avec des BFUP de résistance standard. Les produits fabriqués aujourd'hui peuvent être des poteaux, des poutres, des dalles, des poutrelles, des panneaux de façades, des éléments de couverture, des passerelles, des corniches, des éléments pour l'assainissement, du mobilier urbain, du mobilier d'intérieur, des éléments pour les machines outils, etc. Outre la résistance à la compression, les BFUP se distinguent des bétons traditionnels par bien d'autres propriétés telles que leur résistance à la flexion, aux chocs, à l'abrasion, aux agressions chimiques, au gel, plus généralement leur ductilité, leur tenue dans le temps, ainsi que leurs caractéristiques esthétiques. Les BFUP disposent de formulations élaborées où la sélection des matières premières est essentielle pour l'atteinte des performances souhaitées. Le coût élevé du matériau provient du dosage

important en fibres, en ultrafines, en liant et en adjuvants. Les fibres sont introduites pour augmenter la ductilité du matériau, et accroître la résistance. Les ultrafines permettent de réduire la porosité et d'accroître la résistance à la compression et la durabilité. Les adjuvants permettent d'obtenir une rhéologie adéquate pour la mise en œuvre tout en ayant un rapport Eau/Liant (E/L) très faible et peuvent participer à l'accélération du durcissement. Le surcoût lié aux matières premières peut être compensé par la diminution des dimensions et du poids des éléments en BFUP, par des gains de temps sur le chantier résultant d'un assemblage et d'un montage plus rapide de l'ouvrage ainsi que par une diminution des coûts de transport des matériaux et des matériels. L'allégement de l'ouvrage qui en découle permet de réduire la dimension des fondations et des autres éléments porteurs.

Enfin, des économies sont réalisées sur le long terme grâce à l'excellente durabilité des BFUP [47].

II.2. Les mortiers

II.2.1. Historique

Les mortiers ont été très utilisés du 16^{em} siècle. En 1959, l'anglais JHON Smeaton produit un mortier aussi dur que la pierre en mélangeant des CaO hydrauliques et des cendres volcaniques à la première guerre mondiale, en raison de leur grande légèreté, pour le même calibre, par rapport aux autres bouches à feu, et parce qu'ils permettent de tirer à partir d'un emplacement encaissé ou d'atteindre des objectifs masqués. Pendant la seconde guerre mondiale, leur emploi a été plus restreint, le bombardement aérien s'étant révélé plus efficace.

C'est pourquoi l'utilisation des mortiers lourds (jusqu'à 160 mm) a pratiquement disparu au profit des mortiers légers, dit d'infanterie. [48]

II.2.2. Introduction

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 dans les dernières années, les mortiers retardés stabilisés, ont un temps d'emploi supérieur à 24 heures.

Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années; permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers parfois exigus et difficiles d'accès rénovation, travaux souterrains.

A chaque domaine d'application correspond un type de mortier pouvant être dédié à :

- La protection et la décoration (sous-enduits, enduits de parement colorés, enduits monocouche),
- La pose des carrelages (mortier colles et mortier des joints),
- La préparation des sols (chapes, ragréages, enduits de lissage, d'égalisation),
- Les assemblages (élément de maçonnerie, fixation des éléments de cloisons et de doublage),
- L'isolation et l'étanchéité (système d'isolation thermique par l'extérieur, d'imperméabilisation, d'étanchéité, d'isolation phonique, d'ignifugation),
- Les travaux spéciaux (gunitage, épations d'ouvrage d'art et de génie civil, scellement et calages, coulis d'injection, cuvelages) [49].

Les mortiers sont très utilisés pour des travaux de tous types, ces derniers se déclinent en divers produits, qu'ils soient de ciment, de chaux ou de résine, tous ne s'utilisent pas de la même façon [50].

II.2.3. Définition

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, différant selon les réalisations et d'adjuvant.[50]

II.2.4. Constituants des mortiers

II.2.4.1. Le Liant

On utilise généralement des liants hydrauliques qui peuvent être le ciment, cette dernière est une matière pulvérulente à base de silicate et d'aluminate, et de la chaux obtenue par la cuisson [51].

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.

II.2.4.2. Le sable

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 et même le prix. 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 [56].

II.2.4.2.1. Origines de sable

- **Sable d'origine naturelle**, Le sable est une roche sédimentaire meuble, constituée principalement de quartz, provenant de la désagrégation des roches sous l'action de divers agents d'érosion et de l'altération des roches riches en quartz (granites, gneiss) sous l'action de processus physiques (vent, eaux courantes) ou chimiques (action dissolvante de l'eau). Les grains de sable qui se forment sont généralement gros et anguleux, difficilement transportables par le vent et les cours d'eau. Les plus gros grains de sable se retrouvent ainsi le long des cours d'eau, aux bords des mers, ou dans les régions désertiques. En milieu fluvial, les grains s'usent peu et restent donc gros et anguleux. En milieu continental, l'usure des grains de sable par le vent et l'eau entraîne une modification de leur forme (ou morpho -scopie) figure (II.18) au cours des temps géologiques. Les grains de sable usés deviennent émoussés et luisants (milieu littoral), ou ronds et mats (milieu éolien). En s'arrondissant, les grains deviennent plus petits. Les sables peuvent également se consolider et se cimenter ultérieurement pour donner naissance à des grès (grès quartzeux, grès calcaires). Ce type de sables est

Principalement constitué de quartz (silice), avec de faibles proportions de mica, de feldspath et de magnétite. La couleur du sable est d'autant plus claire que la teneur en silice est élevée. Les sables sont toujours définis en fonction des constituants (masses orbitaires), on parle ainsi de sable quartzeux, feldspathique, ferrugineux, micacé, calcaire, ou encore de sable coquillier. Toutefois, dans le langage courant, le sable est généralement associé au sable quartzeux [50].

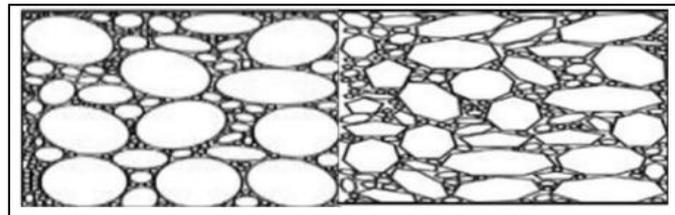


Figure II.18: Sable roulé (naturel) et Sable concassé (artificiel) [50].

- **Sable d'origine artificiel**, Provient de concassage des roches naturelles comme le calcaire, ou artificielle (Pouzzolane), dit aussi sable concassé, caractérisées par une meilleure adhérence agrégat/liant [50]. (figure II.18)
- **Sables spéciaux (lourds, réfractaires, légers)**
 - Sable de laitier;
 - Sable d'oxydes de fer, de chromite;
 - Corindon;
 - Sable de briques concassées;
 - Polystyrène expansé;
 - Vermiculite, perlite.

II.2.4.2.2. Granulométrie

Certains sables sont à éviter, notamment les « sables à lapin », généralement très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres. Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est :

- Extra-fins : jusqu'à 0,08 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire).
- Fins : jusqu'à 1,6 mm.
- Moyens : jusqu'à 3,15 mm.
- Gros : jusqu'à 5 mm. [50]

II.2.4.2.3. Rôle du sable dans le mortier

L'introduction des sables permet de diminuer le retrait du liant (ossature mortier) en augmentant les résistances mécaniques, ajoutant du ça, sa disponibilité et son aspect esthétiques (couleur). 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 et même le prix. 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 [50].

II.2.4.2.4. Exigences sur le sable d'usage général

Le sable doit être siliceux, silico-calcaire ou même calcaire à condition que les grains ne soient pas friables. Il doit être propre, c'est-à-dire dépourvu d'impuretés susceptibles de compromettre la qualité du mortier en œuvre (argile, vase, terre végétale, plâtre, sels minéraux). Le degré de propreté du sable est mesuré par l'essai d'équivalent de sable L'indice fourni par cet essai (ESV) doit être inférieur à 75%. Il est préférable d'utiliser des sables roulés de rivière. Les sables de carrière conviennent s'ils ne renferment pas d'impuretés nocives. Les sables de mer doivent être lavés (sinon ils sèchent mal et peuvent donner lieu à des efflorescences en raison des sels qu'ils contiennent). La granulométrie des sables doit être limitée à 3mm. En général, les dosages du mortier sont exprimés en poids de liant par m³ de sable sec. Or, le plus souvent, sur le chantier, le sable renferme un certain pourcentage d'eau (pouvant varier de 0% à 20 %) et il suffit de très peu d'eau pour que le poids du m³ de sable soit modifié, c'est le phénomène bien connu du foisonnement du sable. [50]

II.2.4.3.L'eau de gâchage

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé.

Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme **NA-442**. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale [52].

II.2.4.4. Les ajouts

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 ajouts que l'on utilise dans les mortiers sont:

- Poudres fines pouzzolaniques (cendres, fumée de silice..);
- Fibres de différentes natures;
- Colorants (naturels ou synthétiques);
- Polymère [56].

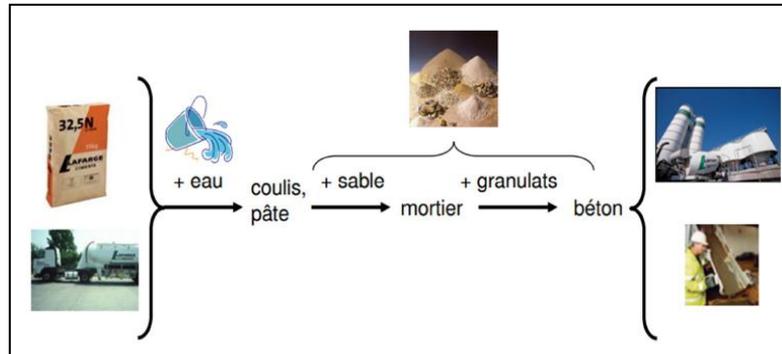


Figure II.19 : L'obtention et constituants des mortiers [62].

II.2.5. Le rôle d'utilisation de mortier

La pâte plastique obtenue peut jouer plusieurs rôles essentiels :

- Assurer la liaison, la cohésion des éléments de maçonnerie entre eux, c'est-à-dire la solidité de l'ouvrage, le rendre monolithique.
- Protéger les constructions contre l'humidité due aux intempéries ou remontant du sol.
- sous forme d'enduits aériens.
- sous forme d'écrans étanches.
- Constituer des chapes d'usure, un pour dallages en béton.

Devenir la matière première dans la fabrication de blocs manufacturés, carreaux, tuyaux divers éléments moulés [53].

II.2.6. Classification des mortiers

La classification des mortiers est comme suite:

II.2.6.1. Classification générale des mortiers

- Selon leur domaine d'utilisation

Généralement les mortiers varient selon leur domaine d'application, on peut citer les catégories suivantes:

- ✓ Mortier de pose.
- ✓ Mortier de joints.
- ✓ Mortier pour les crépis
- ✓ Mortier pour le sol.
- ✓ Mortier pour les stucs.

- ✓ Pierres artificielles.

Support pour les peintures murales.

- ✓ Mortier d'injection.
- ✓ Mortier pour les mosaïques.
- ✓ Mortier de réparation pour pierres [54].

- Selon la nature du liant

On peut classer les mortiers selon la nature du liant en:

➤ **Mortier de ciment portland**

Le ciment portland donne au mortier de maçonnerie sa résistance mécanique, en particulier la résistance initiale, qui est indispensable à une époque où la vitesse de construction est telle que l'on exige qu'un mur puisse supporter une charge importante le lendemain même de sa construction. Les mortiers de ciment portland manquent de plasticité, ont un faible pouvoir de rétention d'eau et sont difficiles à travailler. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1,3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables [54].

➤ **Mortier de chaux**

C'est le composant traditionnel du mortier, il possède une plasticité et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La chaux grasse, obtenue par extinction de la chaux vive en la laissant vieillir, est le produit de qualité que l'on devrait utiliser, mais le vieillissement prend beaucoup de temps et le travail de la chaux grasse est très salissant. C'est pourquoi il est plus pratique d'utiliser la chaux hydratée sèche. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air; ce processus peut être fortement ralenti par un temps froid et humide [54].

➤ **Mortiers bâtards**

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux, dans les proportions égales, suivant leur domaine d'utilisation éventuelle, les compositions de chaux et ciment peuvent être variées [54].

➤ **Mortier à base de ciment de maçonnerie**

C'est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air, les adjuvants donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers de ciment. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec des adjuvants [54].

➤ **Les Mortier réfractaire**

Il est fabriqué avec du ciment fondu, qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues [55].

➤ **Les Mortier rapide**

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements [55].

➤ **Les Mortier industriel**

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins:

- ✓ Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.
- ✓ Mortiers d'imperméabilisation.
- ✓ Mortier d'isolation thermique.
- ✓ Mortier de jointoiement.
- ✓ Mortier de ragréage.
- ✓ Mortier de scellement, mortier pour chapes.
- ✓ Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment.
- ✓ Mortier de réparation [55].

II.2.7. Classes des mortiers

- **Classe 1:** Adjuvant modifiant les caractéristiques des mortiers, bétons et coulis à l'état frais.
- **Classe 2:** Adjuvant modifiant les caractéristiques des mortiers, bétons et coulis pendant la prise et le durcissement.
- **Classe 3:** Adjuvant modifiant la teneur en air ou en autre gaz.
- **Classe 4:** Adjuvant modifiant la résistance des mortiers, bétons et coulis.
- **Classe 5:** Adjuvant améliorant la durabilité des mortiers, bétons et coulis.
- **Classe 6:** Adjuvant modifiant des propriétés spéciales [57].

II.2.8. Emplois des mortiers

II.2.8.1. Le hourdage de maçonnerie

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierre de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques

suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche. [58]



Figure II.20: Pose de mortier de hourdage [58].

II.2.8.2. Les enduits

Ce domaine d'application constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers. À côté des enduits traditionnels en trois couches décrites dans la norme NF P 15 201-1 et 2 (DTU 26.1), se développent aujourd'hui des enduits monocouches épais, ainsi que des enduits isolants[58].



Figure II.21: Enduits isolants et enduits de façade. [58]

II.2.8.3. Les chapes

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau du dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition : on y incorpore alors souvent des produits spécifiques. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol. Les chapes doivent présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au support, et parfois résister à l'abrasion ou au poinçonnement (sols industriels). Adhérente ou flottante, la chape peut également avoir une fonction thermique ou acoustique [59].



Figure II.22: Les chapes fluides et chape ciment [59].

II.2.8.4. Les scellements et les calages

La multiplicité des problèmes de scellement et de calage a conduit les producteurs de mortiers industriels à mettre au point des produits spécifiques adaptés aux travaux à réaliser : scellements d'éléments de couverture, d'éléments de second œuvre, de mobiliers urbains, de regards de visite [59].



Figure II.23: Les scellements [59].

II.2.8.5. Les coulis

Le coulis est un mélange fluide, à base de charges fines inférieures à une valeur de 0.3 mm de liants hydrauliques et d'adjuvants, les ciments utilisés sont des ciments portland artificiels ou des ciments portland composés. Les ciments de laitier ou les ciments aluminieux sont utilisés pour leur résistance aux milieux agressifs. Il existe aussi des liants spéciaux pour coulis d'injection. Les charges sont constituées par des suspensions d'argile, de bentonite (argile colloïde). Les domaines d'utilisation des coulis sont les remplissages des cavités et fissures dans les roches, les sols ou les ouvrages béton ou maçonneries [61-60].

II.2.9. Préparation des mortiers

La préparation du mortier s'appelle le gâchage, il s'agit simplement de mélanger les trois composants, ciment, sable et eau [63].

II.2.9.1. Fabrication à la main

Il faut tout d'abord, avec la pelle, mélanger à sec le sable et liant aussi parfaitement que possible et former ensuite au milieu du mélange une cuvette qui recevra l'eau de gâchage. La masse est humectée progressivement puis malaxée à l'aide d'un robot à mortier. Cependant il faut savoir :

- Le mélange à sec doit être fait soigneusement pour que le liant soit parfaitement réparti dans toute la masse.
- L'eau doit être versée en plusieurs fois, d'abord pour la commodité et la qualité du mélange, ensuite parce qu'il est facile d'ajouter un peu d'eau alors qu'on ne peut pas en enlever.

II.2.9.2. Fabrication mécanique

La fabrication des mortiers se fait à l'aide des engins appelés bétonnières. Avec certains modèles, le mélange doit être fait à sec, en partie avant l'introduction dans les tambours mélangeur où il est mouillé convenablement. D'autres font elles-mêmes le mélange complet : on introduit soit directement dans le tombeur, soit dans une benne, l'ensemble des éléments constitutifs du mortier. L'opération ne dure que quelques minutes, elle est beaucoup plus rapide et moins pénible qu'à la main.

II.2.10. Caractéristiques des mortiers

Les caractéristiques principales des mortiers sont [50] :

II.2.10.1. Ouvrabilité :

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont :

❖ Table à secousses

Après le démoulage du mortier, ce dernier reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule :

$$E\% = 100 \frac{D_r - D_i}{D_i}$$

Avec : **Dr**: diamètre final

Di: diamètre initial

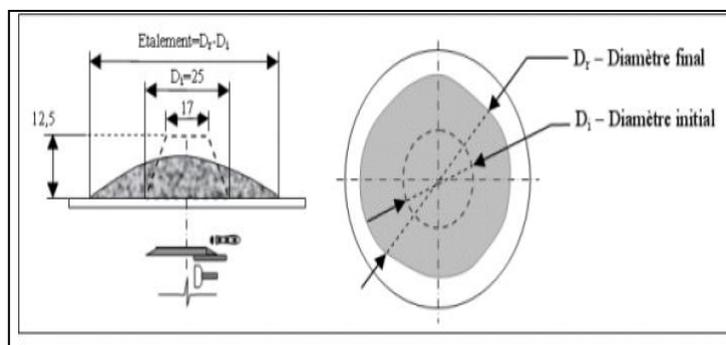


Figure II.24: Table à secousses [50].

❖ Maniabilimètre du LCPC :

Il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule [50].

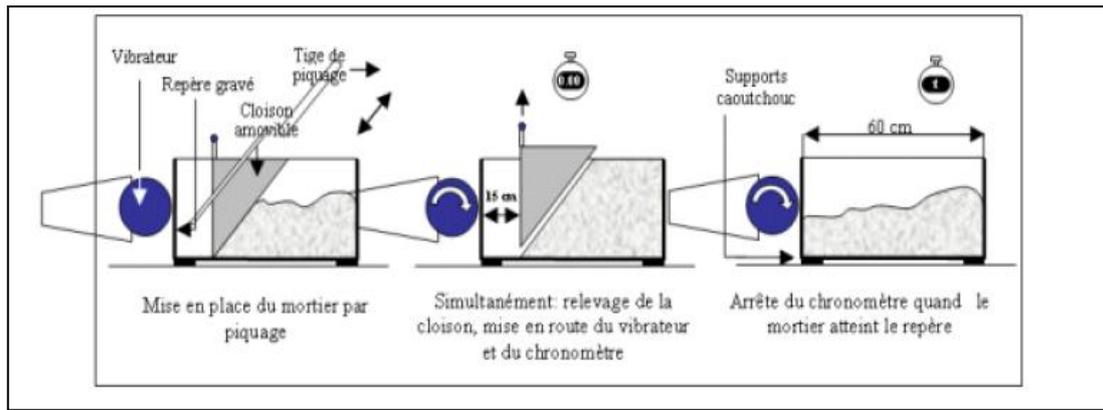


Figure II.25: Principe de fonctionnement du maniabilimètre [50].

❖ Le cône

Dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le Cône peut aussi être muni d'un vibrateur [50].

II.2.10.2. Prise

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance Normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir (hors norme) le temps de prise d'un mortier avec le même Appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur [50].

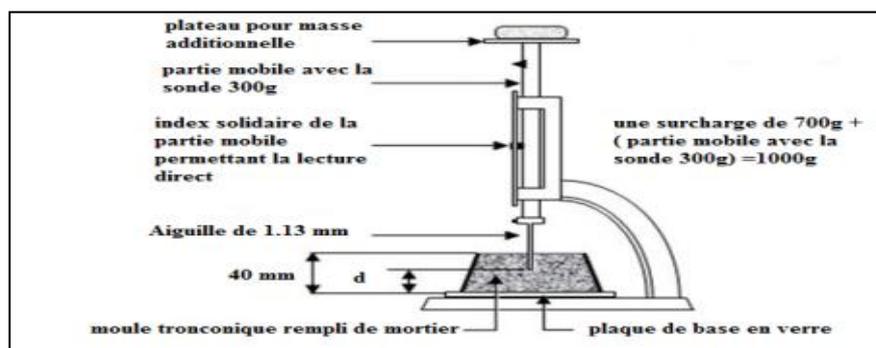


Figure II. 26 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge [50].

II.2.11.Capacité d'absorption d'eau

La capacité d'absorption d'eau (CAE) des matériaux de constructions est leurs pouvoirs d'absorber et de retenir l'eau. Elle se caractérise par la quantité d'eau absorbée par un

matériau sec entièrement immergé dans l'eau et s'exprime en pourcentage de la masse (capacité d'absorption massique) ou du volume (capacité d'absorption volumique).

Elle se calcule d'après la formule suivante [69] :

$$CAE = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sec}}} \times 100\%$$

M_{sat} : la masse du matériau saturé d'eau

M_{sec} : la masse du matériau sec

La CAE varie principalement en fonction du volume des pores, de leurs types et de leurs dimensions. Elle est aussi influencée par la nature de la substance et son pouvoir hydrophile.

La CAE des mortiers de finissage à agrégats en sable de quartz, pas plus de 8 % ; et celle des mortiers à agrégats en roches de 12 % au maximum [64].

• Coefficient de ramollissement

Le coefficient de ramollissement est le rapport de la résistance à la compression d'un matériau saturé d'eau R à la résistance à la compression du matériau à sec.

• Retrait et gonflement

On sait que l'hydratation du ciment s'accompagne, du fait de la contraction le Chatelier, de la réaction d'un fin réseau de pores capillaires à l'intérieur de la pâte de ciment hydratée. Mais lorsque la consommation d'eau pour l'hydratation du ciment provoque leur assèchement, cela aboutit à la formation de ménisques. On s'accorde à expliquer le retrait par les forces de traction (capillaires ou autres) qui se développent de ce fait à l'intérieur des capillaires les plus fins. Le départ d'eau par évaporation a les mêmes conséquences [61].

• Le gonflement

Observé après la prise est dû à la constitution d'hydrates comme la Portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, qui, contrairement à la formation des autres hydrates, se fait avec augmentation de volume. Ce gonflement s'oppose en partie au retrait et est lié à la quantité de chaux libre non hydratée restant après la prise. Si cette quantité est faible, le gonflement pourra être négligeable [65].

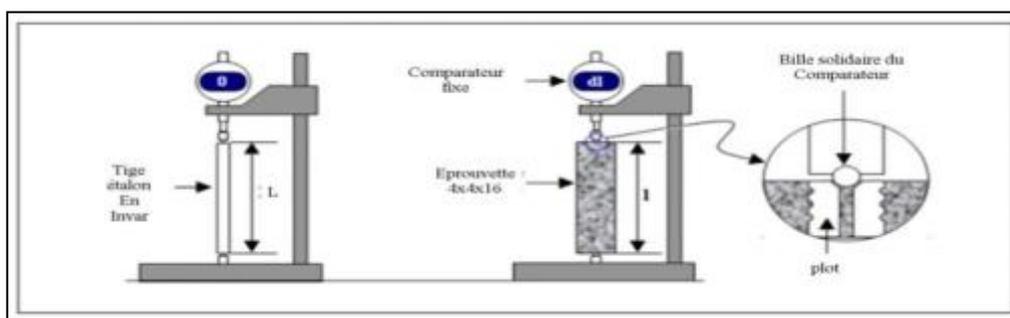


Figure I. 27: Appareillage pour la mesure du retrait [50].**• Porosité et perméabilité**

La porosité (contraire de la compacité) est le rapport du volume des vides au volume total. Elle se mesure donc par la quantité : $1 - (C + S)$

• La perméabilité

La propriété qu'a le mortier de se laisser traverser par les liquides [66].

• Compacité

La compacité est une des qualités essentielles d'un mortier car elle entraîne une bonne résistance ainsi qu'une bonne étanchéité. L'étude de la compacité (C+S) revient principalement à l'étude de la composition granulométrique du mortier et à la détermination des dosages en ciment et en eau. Pratiquement, dans les conditions les plus favorables, la compacité d'un mortier de ciment atteint 0.90 et peut descendre jusqu'à 0.75. Pour les mortiers de chaux hydrauliques, cette compacité varie de 0.60 à 0.80 suivant les cas.

• Adhérence

L'adhérence concerne la liaison du mortier lui-même avec les maçonneries. Une des conditions essentielles pour que le mortier adhère bien aux pierres et que ces dernières soient propres. Par ailleurs, le ciment portland adhère mieux que les ciments prompts et les chaux.

• Décomposition des mortiers

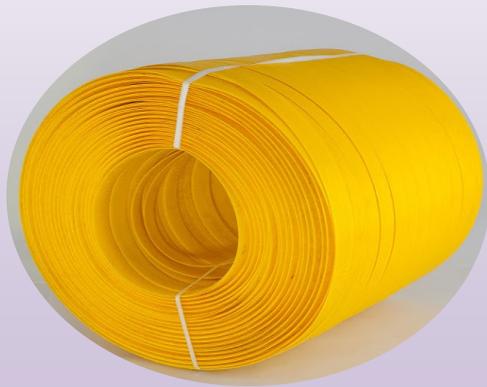
On distingue deux types d'actions selon les auteurs [66].

• Actions des liquides agressifs

On désigne par le nom des liquides agressifs les eaux séléniteuses, les eaux très pures et les eaux de mer. Pour les travaux de fondations qui sont en contact avec les eaux séléniteuses, on utilisera les ciments de laitier au clinker ou, à défaut, de ciment de laitier à la chaux. Pour les mortiers en contact avec l'eau de mer, on utilisera des ciments pouzzolanique ou des ciments riches en laitier.

CHAPITRE III

Les fibres



III.1.Introduction

Ils ont cherché depuis longtemps à renforcer les matériaux de construction fragiles à l'aide de fibres de différentes natures, Citons par exemple, les briques en terres armées de pailles, le mortier de chaux armé de poils d'animaux, le plâtre armé de fillasse, etc. En rappelant que l'état fragile des matériaux correspond à une faible résistance à la traction, une faible énergie de rupture ou une faible plasticité en compression ou en traction. Des fibres de toute nature ont été expérimentées dans le renforcement des matériaux.

Les plus répandues sont : l'amiante, le verre, l'acier, le plastique (nylon et polypropylène), le carbone, et les fibres végétales. Pour cela nous avons confectionné des mortiers renforcés de fibres végétales, Nous exposons, ultérieurement en détail, les différents types de fibres notamment les fibres végétales utilisées dans la construction et dans les domaines pratiques. Dans un premier temps, et pour bien positionner le cadre scientifique de la recherche, nous allons commencer par donner la définition des fibres [68].

III.2.Les fibres

Généralement les fibres sont aussi utilisées pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, et la fibre de grande longueur ou filament continu.

Il existe un grand nombre de fibres qui se différencient par leur origine (naturelles, artificielles et synthétiques), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc.), leur dimension (macro ou micro - fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour des applications, il est nécessaire de tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et la mode de performance du composite.

Les différentes fibres actuellement disponibles peuvent être classées selon leur origine en :

- Fibres naturelles minérales et végétales : amiante, cellulose.
- Fibres synthétiques d'origine minérale : verre, carbone, fibres métalliques.
- Fibres synthétiques organique : polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, Aramide.

III.3. Les types des fibres

On retrouve sur le marché plusieurs types de fibres, elles peuvent être classées par familles, un choix approprié du type de fibre à utiliser est essentiel. Chaque type de fibre possède des caractéristiques particulières qui les rendent apte à servir à une utilisation plutôt qu'à une autre.

Ainsi l'adoption d'une fibre influencera les facteurs suivants:

- Densité,
- Résistance tension et en compression,
- Résistance aux impacts et à la fatigue,
- Module d'élasticité,
- Conductivités thermique et électrique,
- Stabilité dimensionnelle,
- Résistance aux conditions environnementales,
- Coût,

Les principales fibres utilisées sont :

III.3.1. Les fibres de verre « E » et « AR »

Les fibres « E » sont les fibres de verre classique à forte teneur en bore elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, mais sont sensibles aux alcalis libères par l'hydratation du ciment. Leur emploi dans le béton nécessite donc l'incorporation de polymères ou autres ajouts au mélange, au moment du gâchage qui ont pour fonction d'enrober la fibre et de la protéger de l'attaque alcaline.

Les fibres **AR** (alcali-résistantes) sont obtenues avec un verre riche en zirconium moins sensible aux alcalis.

Un traitement d'ensimage (dépôt d'un produit de protection) améliore encore leur tenue [68].



Figure III. 1 : Fibre de verre.

III.3.2. Fibres d'acier

Les fibres d'acier, qui sont sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil, ont fait l'objet de plusieurs recherches. En effet, les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion inter faciale entre fibre et matrice.

Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre. Il existe de nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur diamètre, leur longueur et leurs modes d'élaboration. Elles peuvent être rectilignes, ondulées, ou présenter des élargissements aux extrémités, soit en crochets pour améliorer l'accrochage dans le même but, elles peuvent présenter des aspérités, des crans.

Les fibres métalliques notamment d'acier ont donné lieu à de nombreuses recherches pour développer leur emploi dans le béton.

A recherche de l'adhérence au béton a donné naissance à une grande variété de fibres susceptibles, par leur forme ou leur état de surface, de mieux s'ancrer dans le béton :

- fils étirés et coupés, ondulés crantés, torsadés, avec crochets
- fibres usinées à surface rugueuse
- fibre de fonderie la fibre de fonte se présente sous forme d'un mince ruban de 30 μm d'épaisseur.

Les fibres métalliques sont de types et de formes variées et présentent une très bonne compatibilité avec le béton. Les fibres sont composées d'acier au carbone, d'acier inoxydable ou d'acier galvanisé contre la corrosion. En général, la longueur des fibres varie de 25 à 60 mm et le diamètre varie de 0,5 à 1,3 mm. La fabrication des fibres métalliques s'effectue, selon plusieurs méthodes en relation avec leurs formes géométriques multiples (ASTM A820).

La résistance en traction de ces fibres varie généralement entre 1000 et 3000MPa, mais cette résistance est rarement utilisée dans le composite dû au phénomène de pull – out des fibres [68].

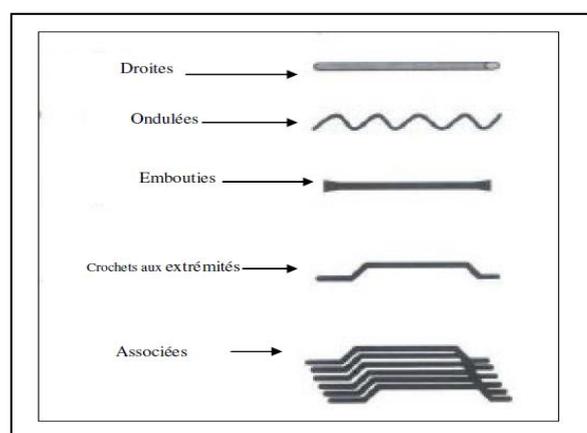


Figure III. 2 : Différentes formes géométriques de fibres métalliques [70].

III.3.3. Fibres de carbone

Le carbone est très dispendieux ce qui le rend beaucoup moins populaire que le verre moins disponible sur le marché, les fibres de carbone sont cependant reconnues comme étant les fibres les plus performantes.

Les types de fibres de carbone sont classés selon leurs propriétés mécaniques. Ces propriétés dépendent des cycles de pyrolyse ainsi que de la nature du précurseur.

On distingue deux types de fibres divisés en quatre grandes classes de fibres [68].

a) Les types I

Sont les types hauts modules soient les classes UHM (ultra haut module) et HM (haut module).

b) Les types II

Sont les types hautes résistances soient les classes I THR ou VHS (Très haute résistance ou very high strength) et HR ou HS (haute résistance ou high strength).

En général, Les fibres de faible module ont une densité et un coût plus faible ainsi qu'une résistance en tension et une déformation aux ruptures plus grandes que les fibres de hauts modules.

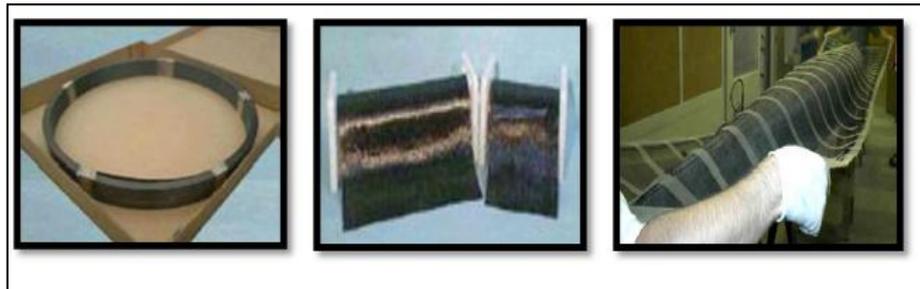


Figure III. 3 : Fibres de carbone [68].

III.3.4. Fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 par l'industrie textile.

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines des produits chimiques. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants : déformabilité élevée, imputrescibilité et bonne résistance en traction qui peut atteindre 800 MPa. Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions (Londonderry House Hôtel), ainsi que l'élaboration de panneaux décoratifs de 33cm d'épaisseur et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux.

Les fibres de polypropylène sont en général assez longues (30 à 60 mm), légères et ne sont pas attaquées par le ciment. Leur module d'élasticité plus faible que la pâte durcie.

Il convient de les utiliser de préférence pour les pièces minces devant résister, soit à l'action corrosive de certaines ambiances dans lesquelles l'acier pourrait se corroder rapidement, soit aux chocs mécaniques.



Figure III. 4 : fibres polypropylène [68].

III.3.5. La fibre d'alfa

L'Alfa est une herbe vivace typiquement méditerranéenne, elle pousse en touffes d'environ 1m à 1m20 de haut formant ainsi de vastes nappes. Elle pousse spontanément notamment dans les milieux arides et semi arides, elle délimite le désert, là où l'Alfa s'arrête, le désert commence figure (III.5) [69].



Figure III. 5 : Illustrations de la plante d'Alfa à l'état brut [70].

III.3.6. Le feillard en plastique

Le feillard en plastique comprend deux types de feillards différents :

a) Le feillard polypropylène PP

Très économique, le feillard en polypropylène (PP) est à privilégier pour le cerclage de colis ou de palettes relativement légers (350 Kg maximum). Son principal atout est d'être souple et donc facile à utiliser. Il est également très résistant à la rouille et aux variations de

température. Il peut servir à sécuriser des produits fragiles ou à empêcher le vol de produits de valeur ou bien servir au stockage de marchandises mais seulement pour une courte durée.

Il peut le dérouler manuellement ou bien à l'aide d'un tendeur électrique ou d'une autre machine. Le feillard de cerclage PP est un feillard synthétique pour des applications manuelles et automatiques. Ce feillard PP bon marché et sûr est utilisé pour le cerclage de boîtes en carton, colis et charges moyennes de palettes. Souple, léger et maniable : s'adapte à toutes les formes d'emballages sans les détériorer. La résistance à la rupture est déterminée par la largeur et l'épaisseur de la bande [68].

b) Le feillard polyester PET

Le feillard en polyester (PET) est parfait pour le cerclage de charges relativement lourdes (jusqu'à 550 kg ou 1000 kg selon les modèles) ou compressibles comme le bois, le carton (mis à plat) et les matériaux de construction. Grâce à sa très grande résistance et à sa souplesse, il protège efficacement les marchandises emballées face aux chocs rencontrés sur la route. De plus, ce feillard polyester permet une manipulation facile et sûre. Il résiste à l'humidité, aux UV et à une température maximale de 80°C. Il ne rouille pas et ne se déforme pas. Il peut également servir au stockage de longue durée des marchandises.

Enfin, il peut être appliqué sur la charge à cercler manuellement ou à l'aide d'une machine pneumatique ou d'un tendeur électrique [68].

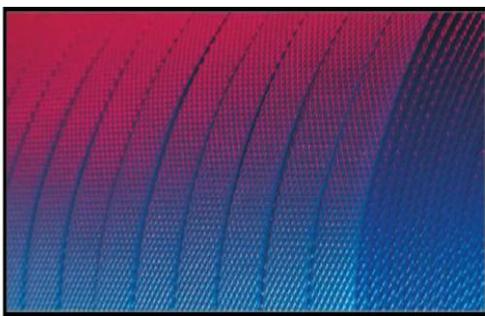


Figure III. 6 : [Strapex] Feuillards plastiques pour le cerclage [68].



Figure III. 7 : Feuillards étroits en Polypropylène PP [68].

De nombreux avantages parlent en faveur des feillards de cerclage Strapex :

Feuillards étroits en Polypropylène PP

- Pour colis légers pesant jusqu'à 30 kg.
- Pour paquets, colis en vrac ainsi que pour journaux et magazines.
- Assurent la sécurité contre le vol pour les produits de valeur.
- Sécurisent le transport des produits délicats.

- Pour un cerclage manuel ou à la machine.
- Supportent des écarts de températures allant de -18°C bis $+50^{\circ}\text{C}$.
- La solution industrielle universelle pour la logistique et la sécurité du transport.

Feuillards haute résistance en Polyester PET

- Pour la sécurité du transport des marchandises sur palettes de tout type.
- Grâce à leur résistance aux UV, peut s'employer pour les produits stockés en plein air.
- Supportons-les :
 - Contraintes liées au maniement et au transport, comme secousses etc.
 - Influences climatiques comme l'humidité ou les écarts de températures allant de (-30°C) à $(+80^{\circ}\text{C})$ (rétractation ou dilatation des colis).
- Pour un cerclage manuel ou à la machine.
- L'alternative qui l'emporte sur les feuillards en acier :
 - Économie de coûts.
 - Colis moins endommagés (surface, arêtes).
 - Réduction du danger de se blesser en coupant le feuillard.
 - Réduction du danger de se blesser en coupant le feuillard.

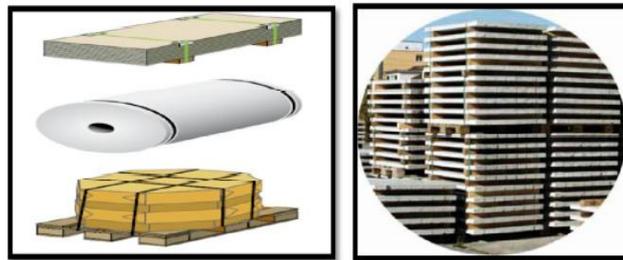
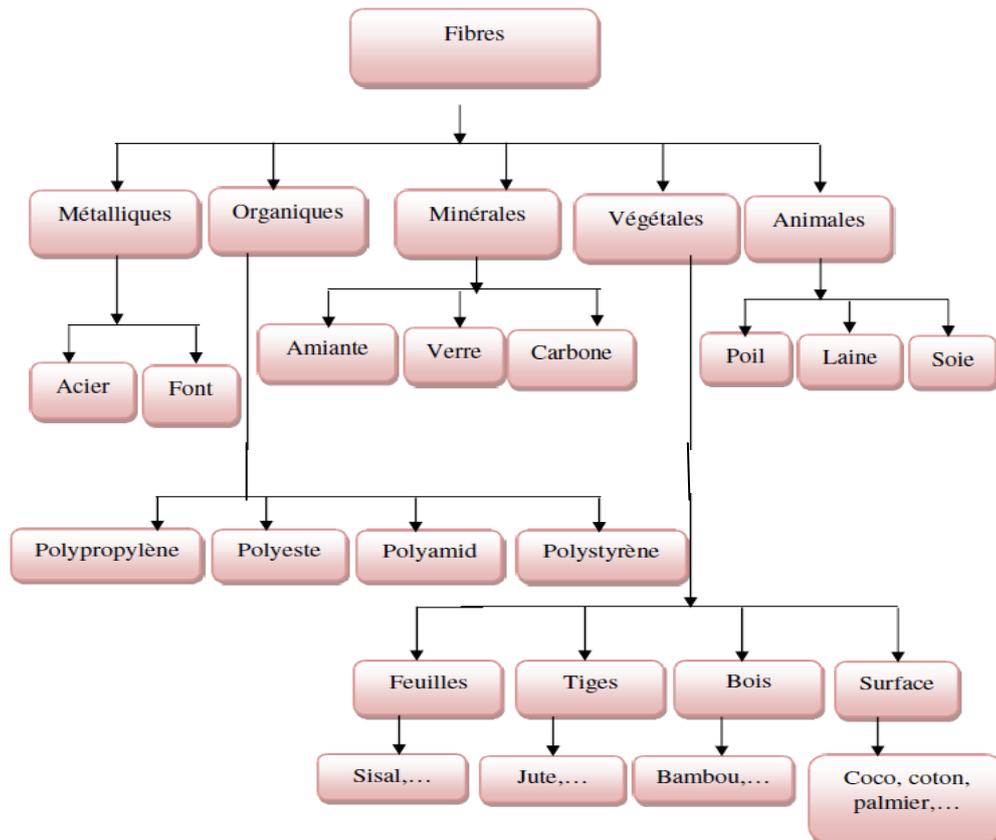


Figure III. 8 : Feuillard en polyester Haute résistance PET [68].

❖ Les différents types des fibres

**III.4. Les caractéristiques et les propriétés des fibres**

Chaque famille de fibres présente des caractéristiques et des propriétés spécifiques.

Pour faciliter leur utilisation, les fibres doivent :

- être faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage (leur dispersion dans le béton doit être rapide) ;
- se répartir de manière homogène lors du malaxage au sein du béton (pas d'agglomération de fibres) lors du bétonnage.

Tableau III.1 : Les caractéristiques et les propriétés des fibres [70].

Caractéristiques et propriétés spécifiques de chaque famille de fibres					
	Masse volumique (en g/cm³)	Diamètre moyen (en µm)	Résistance à la traction (en N/mm²)	Module d'élasticité (en GPa)	Allongement à la rupture (en%)
Fibres métalliques	7.85	50-1000	1000-2500	150-200	3-4
Fibres de verre	2.6	9-15	2000-3000	80	2-3.5
Fibres polypropylène	0.9	> 4	500-750	5-10	10-20

Remarque :

L'influence des fibres sur la maniabilité du béton dépend de leur dimension et de leur dosage.

Pour améliorer les performances mécaniques des bétons (ductilité, résistance en flexion, résistance aux chocs, etc.), elles doivent :

- être déformables sans être fragiles ;
- être relativement longues et fines et présenter une grande surface spécifique ; offrir une bonne capacité de déformation ;
- posséder un module d'élasticité plus élevé que celui de la matrice cimentaire;
- présenter une bonne adhérence avec la pâte de ciment [70].

III.5.Rôles des fibres dans le béton

Au début, les chercheurs ont essayé par l'addition de fibres dans le béton d'augmenter ses caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression ou la résistance à la flexion. Le but est uniquement une résistance très élevée du béton elles peuvent également dans certaines applications remplacer les armatures passives [71].

Selon les fibres utilisées (forme et nature) et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives a :

- la cohésion du béton frais.
- la déformabilité avant rupture.
- la résistance à la traction par flexion.

- la ductilité et la résistance post fissuration.
- la résistance aux chocs.
- la résistance à la fatigue.
- la résistance à l'usure.
- la résistance mécanique du béton aux jeunes âges.
- la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures.
- la tenue au feu.
- la résistance à l'abrasion.

III.6. Les atouts des fibres

Grâce à leurs propriétés mécaniques, les fibres, permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton, de réaliser des pièces minces de grandes dimensions et d'offrir au concepteur une plus grande liberté architecturale. Elles confèrent aux bétons de nombreux atouts :

- la maîtrise de la fissuration.
- une facilité et rapidité de mise en œuvre.
- un renforcement multidirectionnel et homogène.
- un remplacement partiel ou total des armatures passives [70].

III.7. Mécanismes de fonctionnement des fibres dans le béton

Rossi a décrit le comportement vis-à-vis de la fissuration du béton renforcé de fibres et des structures en béton fibré en fonction de la sollicitation imposée. Dans le cas des efforts de traction, des microfissures apparaissent, suivies de leur connexion et de la formation de macrofissures, jusqu'à la rupture de la structure. Les fibres peuvent couvrir les microfissures, et retarder la formation des macrofissures conférant ainsi une capacité portante résiduelle et une ductilité à l'échelle de la structure [72].

III.8. La dispersion et l'orientation de la fibre

Il est évident que la dispersion du renfort qui conduit à un mélange plus ou moins intime des composants est un paramètre qui influence les propriétés physico-mécaniques du matériau composite. Cependant, les dimensions ne sont pas les seuls paramètres qui diffèrent, en effet, ceux-ci induisent l'orientation de ces fibres dans le polymère. La dispersion du renfort conduit à un mélange plus ou moins homogène des composants, ce paramètre influence les propriétés. En effet, les fibres ont tendance à se regrouper et à s'agglomérer ce qui crée des

hétérogénéités. L'orientation des fibres génère une anisotropie, qui détermine des «Axes forts» pour le polymère, selon lesquelles les fibres seront sollicitées longitudinalement (direction la plus résistante de la fibre) [73].

Raj et ses collaborateurs ont étudié l'influence du traitement de la surface du renfort fibreux par l'acide stéarique, l'huile minérale et par l'agent de couplage polypropylène greffé par l'anhydride maléique (PP-g-AM) sur les propriétés des composites polypropylène/fibres cellulosiques. Ils ont utilisé des taux de fibres de 10, 20, et 30 % et ont varié la concentration de l'agent de couplage de 0.5, 1 et 1.5 %. La résistance à la rupture et le module d'Young des composites ont augmenté avec le taux de fibres, lorsque l'acide stéarique et l'huile minérale sont utilisés à une concentration de 1 (% m) durant la transformation. L'acide stéarique a donné une meilleure amélioration de la dispersion des fibres dans les composites comparé à l'huile minérale.

L'orientation des fibres est un autre facteur important qui influe sur le comportement des composites. Car les fibres sont rarement orientées dans les matériaux composites en une seule direction, laquelle est nécessaire pour que les fibres donnent un effet de renforcement maximal. Le degré de renforcement dans les composites à base des fibres courtes, dépend beaucoup de l'orientation individuelle de chaque fibre par rapport à l'axe d'étirement. Le changement de l'orientation des fibres se fait continuellement et progressivement durant la transformation du matériau composite à fibres courtes. Elle est reliée aux propriétés géométriques des fibres, les propriétés viscoélastiques de la matrice et la variation de la forme du matériau qui est produit par l'opération de transformation [74].

III.9. Influence de la morphologie des fibres

La morphologie des fibres inclut aussi d'autres paramètres que la longueur des fibres, comme leur diamètre, l'épaisseur des cellules et le diamètre des lumens.

Ces paramètres varient tous à divers niveaux, en fonction de la nature des fibres. Les fibres de bois sont caractérisées par un rapport L/D élevé, mais sont souvent réduites en farine pour en faire des composites bois/polymère. La réduction de la taille des fibres en farine favorise l'écoulement du mélange bois/polymère et augmente du même coup le retrait au moulage. Les traitements de surface des fibres réduisent considérablement le rapport (L/D), mais augmentent considérablement l'adhésion et les propriétés mécaniques [75].



CHAPITRE IV

Partie pratique

IV.1.Introduction

Dans cette partie pratique, qu'a été réalisée au niveau du laboratoire centrale des travaux publics de Bouira (LCTP).

Avant d'entamer la partie expérimentale, il nous semble important d'une part d'identifier et de caractériser des matériaux employés dans la fabrication des mortiers et d'autre part, de présenter les outils expérimentaux utilisés, tels que les étapes de formulation de ces mortiers, le mode de leur préparation et de leur mise en œuvre pour chaque essai, ainsi que les techniques de mesure des propriétés du matériau à l'état frais et à l'état durci.

Notre travail effectué pour atteindre l'objectifs de notre étude nous avons divisez notre travail en trois parties comme suit :

Dans la première partie, on a procédé à la caractérisation de tous les matériaux utilisés à savoir

- Le ciment (GICA Sour el Ghozlane)
- Le sable (Sable roulé de la société ALGEXPAN) (voir l'annexe C)
- Ajouts (sika 625 et poudre de verre)
- Fibre plastique
- Eau de gâchage

La deuxième partie elle est consacrée à la formulation des différentes variantes élaborées par fibres plastique à des taux de (1 %, 2 %, 3% 4 % et 5 %), qui seront comparés aux échantillons de mortier témoins (sans addition), puis une présentation des résultats d'essais physicomécaniques, à savoir (la masse volumique, l'étalement et la résistance mécanique en flexion et compression a différentes âge 14 et 28 jours), obtenus après les essais sur les différentes variantes étudiées.

La troisième partie est consacrée aux résultats et interprétations des caractérisations physico mécaniques (à l'état frais) et (à l'état durci) des mortiers réalisés, avec une conclusion générale.

IV.2. Méthodes et matériaux utilisés

IV.2.1.Le ciment

Le ciment de base utilisé dans notre recherche, est un ciment Portland composé CEM II/A-M (P-L) 42, 5 N (voir l'annexe A).

Ciment Portland composé, dont les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques satisfont aux exigences du ciment selon la norme **NA442/2013**.



Figure IV. 1: Ciment GICA (Sour el Ghozlane)/CEM II/A-M (P-L) 42,5 N.

IV.2.1.1. Les essais physiques

a) Mesure des temps de début et fin de prise de la pâte

L’essai consiste à suivre l’évolution de la consistance d’une pâte de consistance normalisée a l’aide de l’appareil de Vicat qui permet la mesure de l’enfoncement d’une aiguille dans la pate et le temps correspondant.

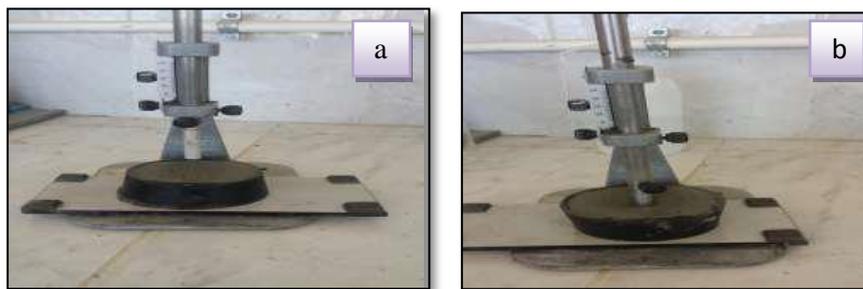


Figure IV.2 : Mesure des temps de prise (a) début de prise ; (b) fin de prise

Si $d= 4\text{mm} \pm 1 \text{ mm}$ on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé «temps de début de prise». Le « temps de fin de prise» est celui au bout duquel l’aiguille ne s’enfonce plus que de **0.5 mm**. Les caractéristiques physiques de ce ciment sont présentées dans le tableau ci-après

Tableau IV.1: Caractéristiques physiques

Caractéristiques	Détaille	résultats	Unités	normes
Consistance normale	23.1		%	
Délai de prise	Début de prise	170	Min	NA 230
	Fin de prise	410	Min	NA 230
Surface spécifique(SSB)		3613	Cm²/g	NA 230
Masse volumique		3.13	Kg/m³	

IV.2.1.2. Les essais mécaniques

Le tableau suivant représente la résistance mécanique à la flexion et à la compression d'un mortier normalisé conformément à la norme EN P 196-1.

Tableau IV. 2 : Caractéristiques mécaniques.

Resistance(Mpa)	Age (jours)		
	2j	7j	28j
compression	14.1	30.0	52.8
flexion	3.3	5.6	8.2

IV.2.1.3. Les essais chimiques

L'analyse thermique gravimétrique permet de déterminer qualitativement et quantitativement les compositions des oxydes contentent dans le ciment y compris la fraction des parties au fau, comme indique le tableau suivant :

Tableau IV.3: Composition chimique du ciment

Composition Chimique	Teneur %
SiO₂	20.06
Al₂O₃	3.99
Fe₂O₃	3.04
CaO	61.57
MgO	1.62
K₂O	0.54
Na₂O	0.26
SO₃	0.06
CaO libre	1.56
Cl⁻	<0.001
P.F	7.16

IV.2.1.4. Les essais minéralogiques

A partir de microscope optique polarisé, la détermination des différentes phases minéralogiques s'effectue par la déférence de coloration entre les composants de clinker, a partir des calcule des surface de chaque phase cristalline, on peut déterminer la teneur de Chacun de ces derniers, comme indique le tableau(IV.4)

Tableau IV.4: Composition minéralogiques

phase	Constituants minéraux Du clinker	Teneur rapportée au clinker (%)
clinker	C_3S	46
	C_2S	28
	C_3A	03
	C_4AF	16
	CaO_L	01
Régulateur de prise	Gypse	05

IV.2.1.5. 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 [78]. La condition de la réflexion est donnée par l'équation de Bragg :

$$n \lambda = 2d \sin \theta.$$

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 IV.3 : Appareil de Diffraction par des Rayons X [76].

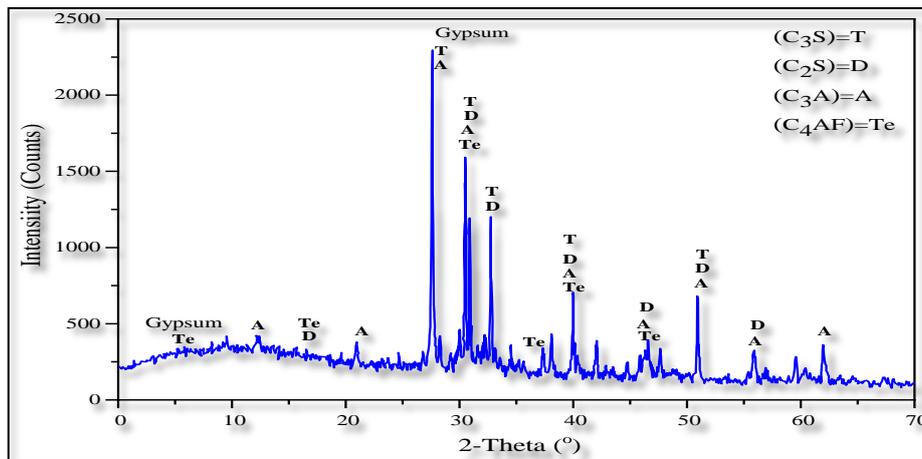


Figure IV.4 : DRX de ciment CPA.

D'après le spectre DRX obtenu pour le ciment figure(IV.4), les principaux constituants du ciment sont détectés (C_2S , C_3S , C_4AF , C_3A).

IV.2.2. Le sable

✚ **Sable expansée** : également connue sous les termes d'argile cuite de galet hydrocorns, latérite, ou plus simplement « billes d'argile », est un matériau granulaire léger constitué de petits globes de brûlé et bouffi d'argile.

Le schiste expansé est une variante d'argile expansée obtenue par cuisson de schistes appropriés, utilisée dans la construction.

✚ L'utilisation

L'argile expansée est utilisée dans :

- la construction (bétons et mortiers : réfractaire, allégeant, isolant thermique),
- les infrastructures,

- le traitement de l'eau,
- le pot et les plantes,
- l'élevage et la culture hydroponique.

Modes d'emploi

L'emploi de sable à partir d'une argile expansée est possible de plusieurs façons en fonction des exigences ; les modes d'emploi vont du simple étalage à sec au gâchage avec différents types de liants.

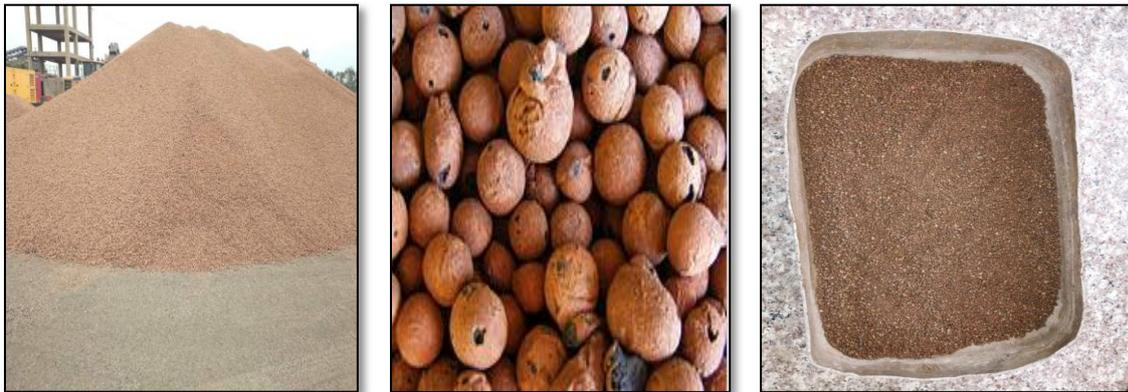


Figure IV.5: sable roulé expansé

IV.2.2.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique traduit la distribution pondérale des grains par classe granulaire définit deux dimensions d'ouvertures mailles carrées avec des teneurs déterminées de tamisât et du refus.



Figure IV.6 : séries des tamis en millimètres

L'essai a été réalisé selon les modalités de la norme EN- NF 933-1, les résultats analyse granulométrique du sable sont récapitulés dans le tableau.

Tableau IV.5 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable.

Masse sèche totale : $M_1=1100g$		Masse sèche des fines retirées par lavage		
Masse sèche après lavage :		$M_1 . M_2=33.3g$		
$M_2=1066.7g$				
Ouverture des tamis (mm)	Poids(g)	Teneurs (%)		M F (%)
	Refus cumulés(Ri)	Refus cumulés	Tamisât cumulés	
5	0	0	0	3.1
2.5	7.1	0.64	99.36	
2	126.6	11.5	88.5	
1.25	540	49.09	50.91	
0.63	876.8	79.7	20.3	
0.315	996.2	90.56	9.44	
0.125	1056.3	96.02	3.97	
0.08	1064.6	96.78	3.22	
0.063	1066.6	96.96	3.04	

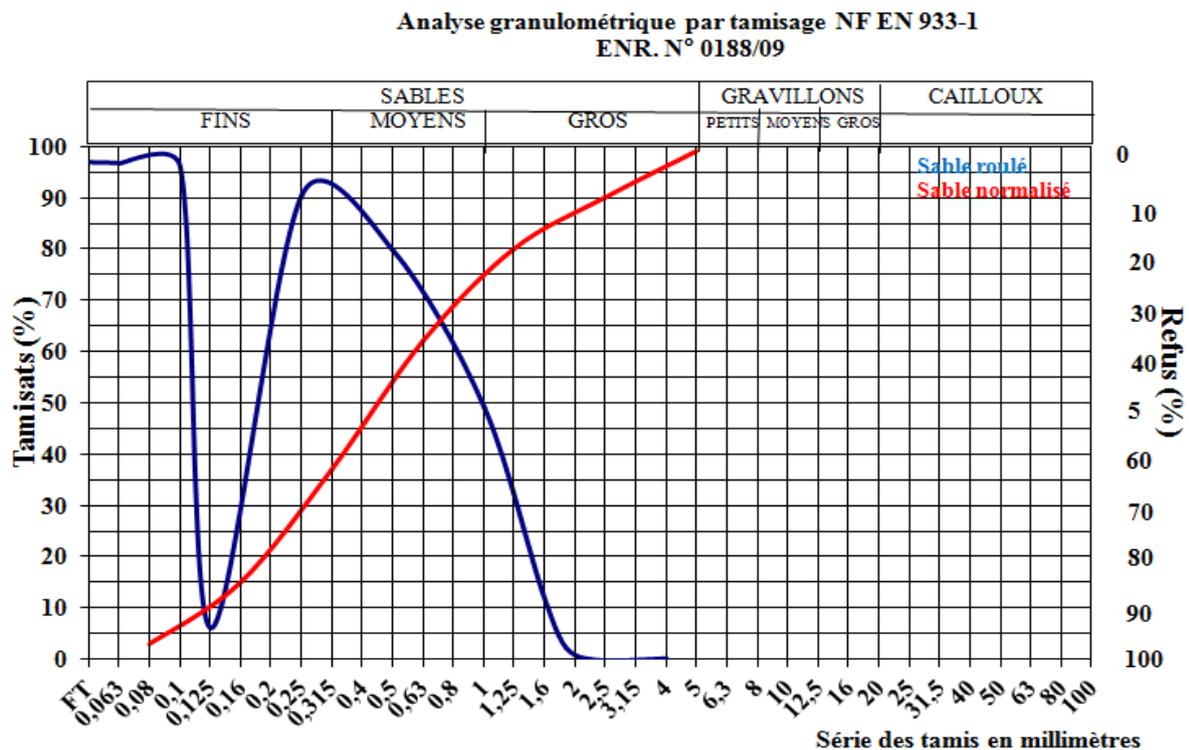


Figure IV. 7 : courbe d'analyse granulométrique par tamisage NF EN933-1.

IV.2.2.2. Caractéristiques physiques du sable

Module de finesse

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles calculé par la relation suivante :

$$Mf = \frac{\Sigma \text{ refus des tamis}(0.125,0.315,0.63,1.25,2.5,5)}{100}$$

Pour notre sable: $Mf = 3.1$

Où : RC = Refus cumulé

T = Tamisât en %

Les normes soviétiques spécifient le Mf des sables comme suit :

- Sable gros $Mf > 2,5$
- Sable moyen $2 < Mf < 2,5$
- Sable fin $1.5 < Mf < 2$
- Sable très fin $1 < Mf < 1,5$

Pour notre sable : $Mf > 2,5$ donc c'est un sable gros.

Le degré d'absorption

Elle est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau, elle est définie en pourcentage selon la norme **NF P 18-555** d'après la formule suivante.

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

- M_1 : La masse du matériau sec en (g).

- M_2 : La masse du matériau saturé d'eau superficiellement sec en (g).

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 6 : Le degré d'absorption pour le sable.

N°d'essai	M1(g)	M2(g)	A(%)	A moy (%)
1	500	510	2	3.06
2	500	516	3.2	
3	500	520	4	

Selon le mode opératoire défini dans les normes NF P18- 554 et NF P18- 555, la limite supérieure du coefficient d'absorption d'eau du granulat est fixée à 5%, c'est -à- dire $Ab < 5\%$.

Donc, dans notre cas, cette propriété est vérifiée.

L'essai équivalent de sable

Cet essai permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses ou ultrafines contenues dans le sable, le pourcentage de poussières nuisibles et les éléments argileux qui diminuent la qualité du béton et mortier, l'essai d'équivalent de sable est déterminé selon la norme **NF EN933-8+A1**.

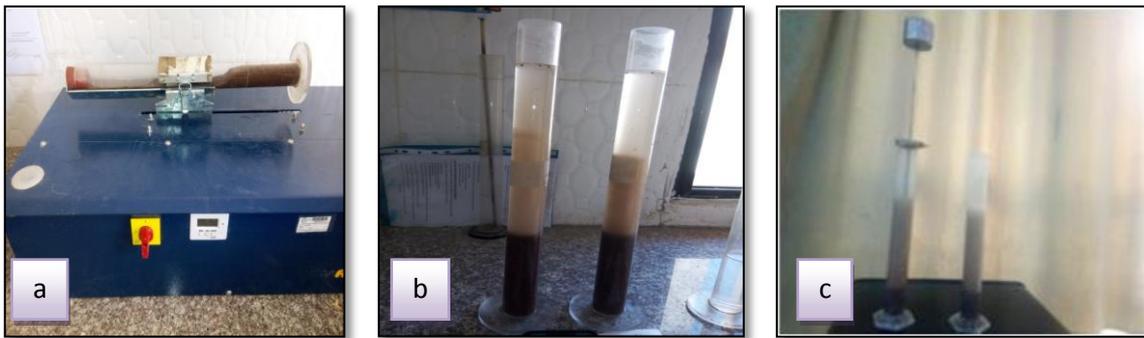


Figure IV .8: essai équivalent de sable avec différents étapes.

a) Equivalent de sable visuel (ESV)

Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau supérieure du flocculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle. Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

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

D' où: $h_2 < h_1$

Avec

h_1 : hauteur de sable propre + hauteur des impuretés.

h_2 : hauteur de sable propre.

b) Equivalent de sable avec piston (ESP)

La détermination du ESP de sable utilisé dans ce travail est effectuée selon les étapes suivantes :

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

Introduire le réglelet dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston. Soit h_2 la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

$$ESP = h_2 / h_1 \times 100$$

Avec

h_1 : hauteur de sable propre + hauteur des impuretés.

h_2 : hauteur de sable propre.

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 7 : Les résultats d'équivalent du sable.

Essais	h_1 (mm)	h_2 (mm)	SE%	SE moy%
ESV	141	140	99.29	96.12
ESP	142	132	92.95	

Tableau IV. 8: Comparaison des résultats.

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
$ES < 65$	$ES < 60$	Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
$65 < ES < 75$	$65 < ES < 70$	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
$75 \leq ES \leq 85$	$70 \leq ES \leq 80$	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de hautes qualités.
$ES \geq 85$	$ES > 80$	Sable très propre : L'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

D'après le tableau on constate que :

$$ESV > 85 \quad ESP > 80$$

Pour le sable

Sable très propre l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

✚ L'essai au bleu méthylène

L'essai au bleu de méthylène a été réalisé selon les modalités de la norme EN-NF933-9. cet essai permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse contenant dans le sable.

On a

$$MB(MBF) = \frac{V}{M} \times 10$$

Avec

V : volume de bleu méthylène (ml)

M : la masse de sable (g)



Figure IV.9 : l'essai de bleu méthylène.

Tableau IV.9 : résultat d'essai de bleu méthylène

Essai	M(g)	V (ml)	MB(MBF) ml/g
1	200	5	0.25

IV.2.3.L'eau de gâchage

L'eau joue un rôle primordial dans la fabrication des matériaux à base de ciment leur résistance mécanique et leur durabilité dépendent fortement de la qualité ainsi que de la quantité de l'eau de gâchage. nous avons utilisé pour le gâchage des mortiers l'eau de robinet de laboratoire centrale des travaux publics de Bouira (LCTP).

IV.2.4. Adjuvant

IV.2.4.1. Le superplastifiant sika 625

L'adjuvant utilisé est un Superplastifiant / Haut réducteur d'eau fabriqué par la société, Algérienne « SIKA-Algérie » (Voir l'annexe B). Le sika viscocrete 625 figure (IV.10) de forme liquide de couleur marron, d'un PH égal à $5 \pm 0,01$, de densité $1,085 \pm 0,015$ et d'une teneur en chlore $\leq 0.1\%$.



Figure IV. 10: superplastifiant SIKA VISCOCRETE 625.

IV.2.4.2. La poudre de verre

Dans notre travail l'ajout fin utilisé, c'est la poudre de verre figure (VI.11), Obtenue par broyage des bouteilles et vitres brisés, c'est un verre incolore (blanc)



Figure IV .11: Poudre de verre.

Tableau IV. 10: Composition chimique de la poudre de verre.

Composant poudre de verre	%
SiO₂	70.26
CaO	8.92
Al₂O₃	0.85
Na₂O	5
MgO	1.71
K₂O	0.58
Fe₂O₃	2.03

Tableau IV. 11: Caractéristique physique

Caractéristiques	Poudre de verre
La masse volumique absolue (g/cm ³)	2.1
Surface spécifique (g/cm ³)	3500
La masse volumique apparente (g/cm ³)	1.08
La porosité(%)	44.26
La compacité(%)	55.74

IV.2.5.Les fibres

IV.2.5.1.Le feillard polyester PET (déchets plastiques)

Les fibres polypropylènes utilisées sont nommées déchets plastiques. L'incorporation de ces fibres dans le béton ou mortier réduit la fissuration.

a) Propriétés

- Les fibres dans le béton ou mortier créent un réseau fibré de haut densité qui :
- Améliore la cohésion à l'état frais
- Réduction la fissuration du retrait et le <cracking >
- Résistance aux milieux alcalins
- Augmentation les résistances à l'abrasion et aux chocs, pouvant atteindre des valeurs 100 fois supérieurs à celle de témoin.

b) Domaine d'application

- Hangars de stockage.
- Ateliers mécanique Revêtement extérieurs.
- Aires de circulation.
- Parking.



Figure IV.12 : Le feillard polyester PET avant coupage à 16cm

Le tableau suivant présent les résultats des caractérisations effectuées.

Tableau IV.12 : caractéristiques des fibres

type	nature	couleur	Masse volumique (g/cm ³)	langueur (cm)	Epaisseur (cm)
Fibre longue	plastique	jaune	0.9	16	0.3
Fibre courte	plastique	jaune	0.9	1.5	0.3

IV.3. Formulation des mortiers

Le mortier est préparé selon les modalités de la norme **NF P15-403**, qui prend en considération une partie de liant, sable, ajouts et d'une demi-partie d'eau ($E/C = 0,45$).

Cette norme **NF P15-403** fait l'objet d'une caractérisation à la flexion et à la compression simple à 14 jours et 28 jours, des éprouvettes prismatique (4×4×16) cm³, suivant ce protocole, nous avons confectionné des éprouvettes avec différents pourcentages de fibres (PET) : 1% ; 2% ; 3% ; 4% ; 5%.

IV.3.1. Les différentes étapes de confection

IV.3.1.1. Pesée des constituants

La masse des constituants nécessaires aux essais est déterminée en fonction des éprouvettes à préparer ; elle pesée avec une précision de 0,5%. Dans le cas de la préparation de 3 éprouvettes (4×4×16)× 3, les quantités sont respectivement les suivantes :

Sable1350 g ;

Liant450 g ;
 Poudre de verre3% par apport la quantité de ciment.
 Eau202,5 g (E/C = 0,45).
 Superplastifiant1,5% d'après le point de saturation (voir annexe D).

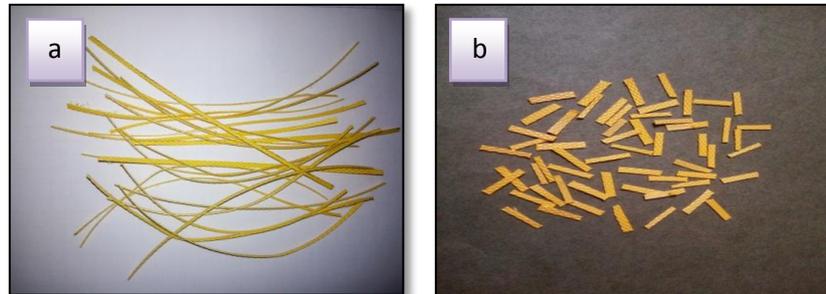


Figure IV .13: Le feillard polyester PET après coupage (a : fibre longue, b : fibre courte)

IV.3.2.Caractérisation de mortier

IV.3.2.1.L'étalement

L'essai au mini cône a pour but de mesurer le diamètre d'étalement d'un certain volume de mortier placé dans ce dernier sur une plaque en plexiglas ,et avec des caractéristiques géométriques un diamètre supérieure de 19 mm .un diamètre inférieur de 38 mm et une hauteur de 57 mm.



Figure IV.14: Essai d'étalement.

Tableau IV.13 : les résultats d'étalement de mortier avec fibre courte

Type	T	1%	2%	3%	4%	5%
Etalement	15	13,8	13,5	13,1	12,8	12,2

Ces résultats sont présentés schématiquement par l'histogramme suivant :

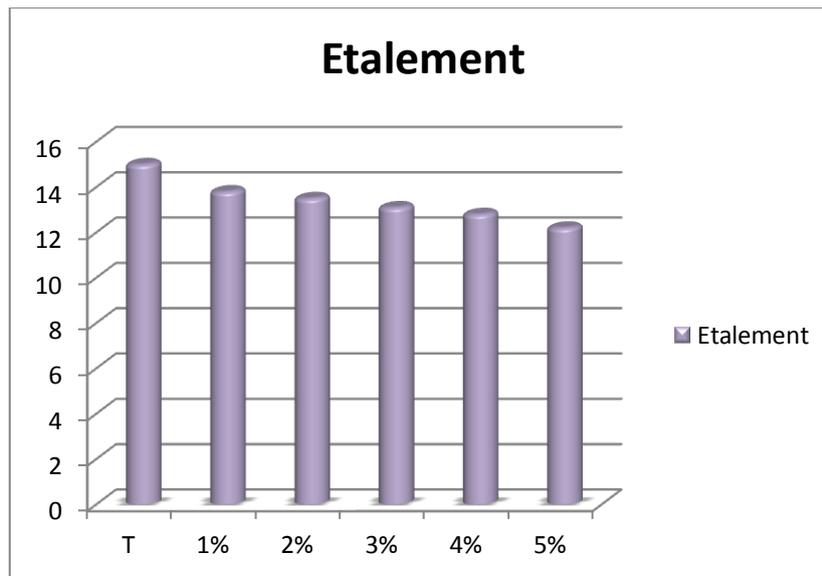


Figure IV.15 : L'étalement du mortier avec différents pourcentages de fibres.

Commentaire

L'ajout de fibre influe négativement sur la fluidité du mortier cela est due a la forme longitudinal de fibre qui empêche l'étalement de mortier.

IV.3.2.2.La masse volumique

On a déterminé la masse volumique à l'état frais par la différence des pesées des moules vides et remplis sur le volume du moule.

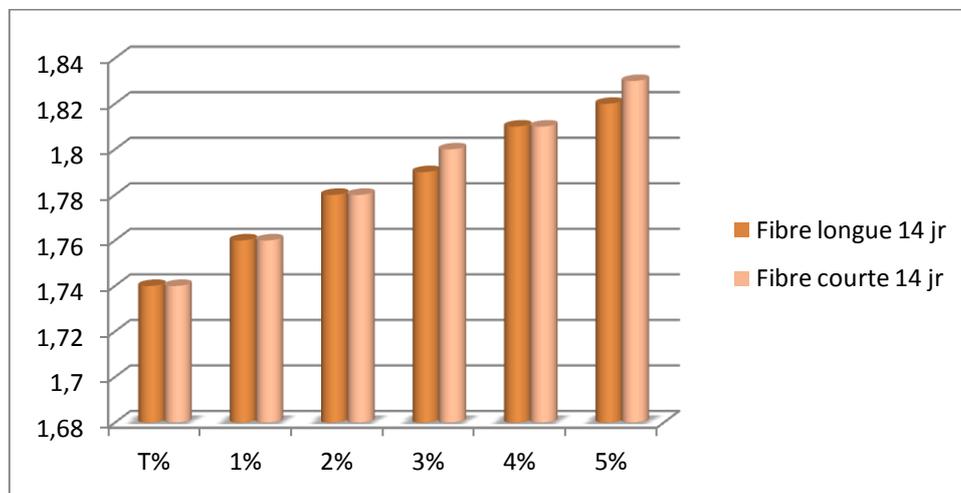
$$Mv = (\text{masse de mortier} / \text{volume de moule})$$

$$\text{Avec : volume du moule} = 3(4 \times 4 \times 16) = 768 \text{ cm}^3$$

Tableau IV.14 : La masse volumique du mortier à l'état frais pour 14 jours.

code	Masse volumique g/cm ³
Fibre longue 14 jr	
T%	1,74
1%	1,76
2%	1,78
3%	1,79
4%	1,81
5%	1,82
Fibre courte 14 jr	
1%	1,76
2%	1,78
3%	1,80
4%	1,81
5%	1,83

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous :

**Figure IV.16** : masse volumique de mortier à l'état frais avec différents pourcentages et types des fibres à 14 jours.**Tableau IV.15** : La masse volumique de mortier à l'état frais avec différents pourcentage des fibres à 28 jours.

code	Masse volumique
Fibre longue 28jr	
T	1,60
1%	1,62
2%	1,63
3%	1,67
4%	1,69
5%	1,75
Fibre courte 28jr	
1%	1,61
2%	1,62
3%	1,64
4%	1,66
5%	1,69

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous :

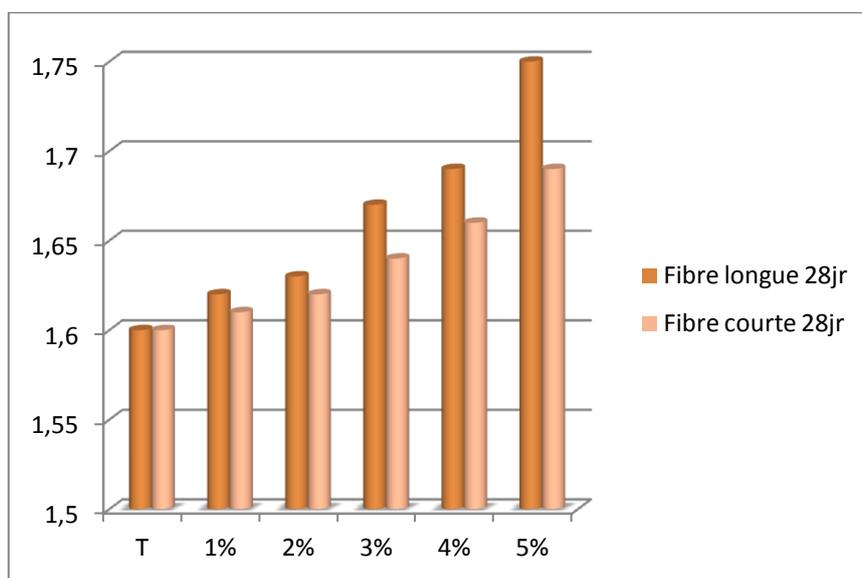


Figure IV.17 : masse volumique de mortier à l'état frais avec différents pourcentage et types des fibres à 28 jours.

Tableau IV.16 : La masse volumique de mortier à l'état durci avec différents pourcentage des fibres à 14 jours.

code	Masse volumique (g/cm ³)
Fibre longue à 14jr	
T	1,80
1%	1,83
2%	1,85
3%	1,87
4%	1,89
5%	1,92
Fibre courte à 14jr	
1%	1,81
2%	1,83
3%	1,85
4%	1,87
5%	1,89

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous :

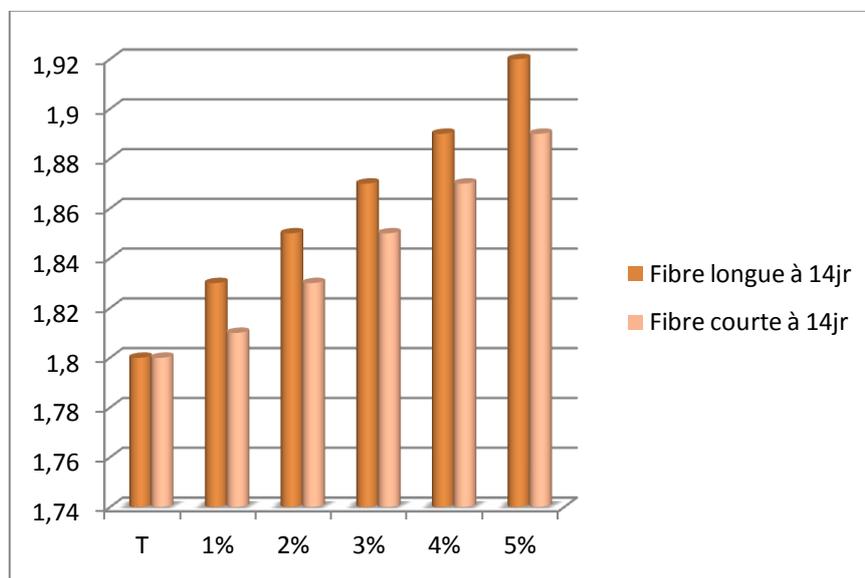


Figure IV.18 : La masse volumique de mortier à l'état durci avec différents pourcentage des fibres à 14 jours.

Tableau IV.17 : La masse volumique de mortier à l'état durci avec différents pourcentage des fibres à 28 jours.

code	Masse volumique (g/cm ³)
Fibre longue à 28 jr	
T	1,72
1%	1,75
2%	1,77
3%	1,80
4%	1,81
5%	1,83
Fibre courte à 28 jr	
1%	1,73
2%	1,75
3%	1,77
4%	1,79
5%	1,81

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous

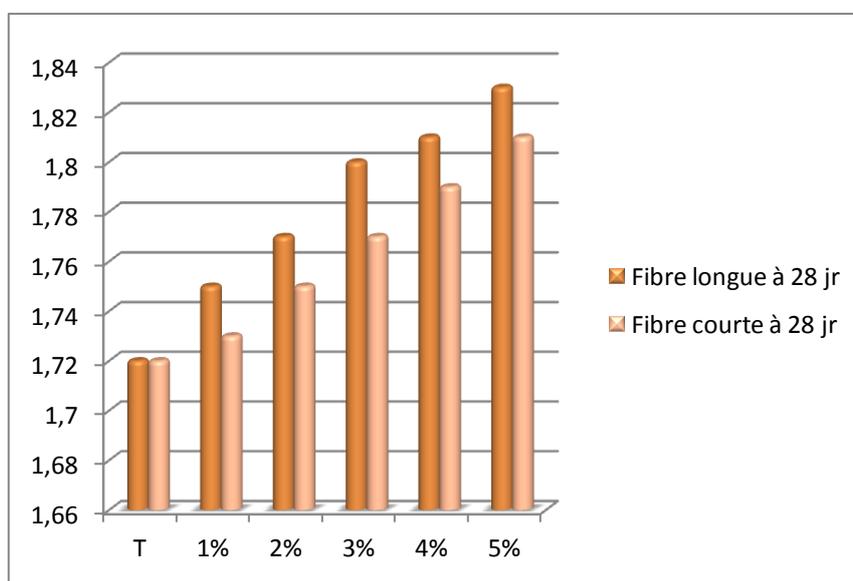


Figure IV.19 : La masse volumique de mortier à l'état durci avec différents pourcentage des fibres à 28 jours.

Commentaire

On remarque dans les figures IV : 12,13 ,14 ,15 augmentation légèrement de la masse volumique par rapport aux différents pourcentages des fibres à l'état frais et durci.

IV.3.3. Préparation des moules

Pour la préparation des moules, nous avons procédé de la façon suivante:

- Préparer une série des moules des dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ convenables, avec la quantité du mortier ;
- Huiler les moules et vérifier leurs serrages ;
- Placer les moules sur une table vibrante.



Figure IV. 20: Des moules prismatique $(4 \times 4 \times 16)$ cm³.

IV.3.4. Préparation des éprouvettes

Le malaxage est effectué au moyen d'un malaxeur spécifié par la norme EN 196-1, le malaxeur étant en position de fonctionnement :

- a) Mettre 202.5 ml d'eau et 6.75g du superplastifiant **sika 625**;
- b) Mettre 450 g de ciment et 13.5 de poudre de verre ;
- c) Malaxer pendant 30s à vitesse lente, introduire le sable d'une manière aléatoire ; puis malaxer pendant 2 mn à vitesse rapide.
- d) Arrêter le malaxeur, démonter le batteur, puis racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie de mortier n'échappe au malaxage.
- e) Après remontage du batteur reprendre le malaxage pendant 2 min à vitesse rapide.
- f) Après le malaxage couler le mortier dans les moules normalisés $(4 \times 4 \times 16)$ cm³, qui doivent être graissés au préalable, remplir la moitié du moule qui doit être placé sur la table à choc, avec un nombre de coups égal à 60coup/mn.



Figure IV.21 : table à choc

g) Retirer le moule après la vibration et le remplir de nouveau jusqu'au débordement, agrafer l'excès puis remettre sur la table à choc pour compléter l'homogénéisation.



Figure IV.22: Les constituants et le malaxeur automatique.

h) nous avons préparé 66 batteries de trois éprouvette de « 4×4×16 » deux batterie témoins l'un de 14jours et l'autre de 28jours ,5 batteries de différent pourcentages des fibres longue de 14jours et 5 autre de 28jours et 5 batteries de différents pourcentages des fibres courte de 14jours et 5 autre de 28 jours.



Figure IV.23: La distribution des fibres longue dans les éprouvettes



Figure IV.24 : La distribution des fibres courte dans les éprouvettes

IV.3.5. Conservation des éprouvettes

Après 24 h de la confection des éprouvettes et Après le démoulage des éprouvettes, elles seront conservées dans un milieu humide (eau) à 22°C.

Après cette période de conservation on tire après chaque période de 14 et 28 jours les éprouvettes qui seront soumises aux essais mécaniques.



Figure IV. 25 : Les éprouvettes prismatique (4x4x16) cm³



Figure IV. 26 : La Conservation des éprouvettes.

IV.4. Essais mécaniques

IV.4.1. essai en flexion

Les essais les plus courants sont des essais de traction par flexion. Ils s'effectuent en général sur des éprouvettes prismatiques de côté a et de longueur $4a$, reposant sur deux appuis sous charge concentrée unique appliqué au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre).



Figure IV. 27 : Essai de traction par flexion.

IV.4.2. Essai de compression

Les demis éprouvettes provenant de l'essai de flexion vont subir l'essai de compression sur leurs faces de moulage, sous une section de 40×40 mm, entre deux plaques de métal dur d'au Moins 10 ± 1 mm d'épaisseur, de 40 ± 1 mm de largeur et de longueur et dont la tolérance de plénitude est de 0.01mm. Le demi-prisme est placé entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'environ 1 cm.



Figure IV.28 : essai de compression

Les résultats de la résistance mécanique en flexion et compression des différents pourcentages et type des fibres et deux témoins sans fibres aux différents âges (14, 28 jours)

Tableau IV.18 : Effet des fibres longues sur la résistance aux flexions et compression

Age	type	Resistance à la Flexion (Mpa)	Resistance à la compression (Mpa)
14	témoin	5,709	34,681
	1%	5,865	43,188
	2%	6,660	40,826
	3%	5,723	42,070
	4%	6,177	39,246
	5%	5,922	40,472
28	témoin	6,092	46,745
	1%	6,192	41,543
	2%	6,887	44,367
	3 %	6,447	44,660
	4 %	6,021	44,792
	5 %	6,419	45,159

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous :

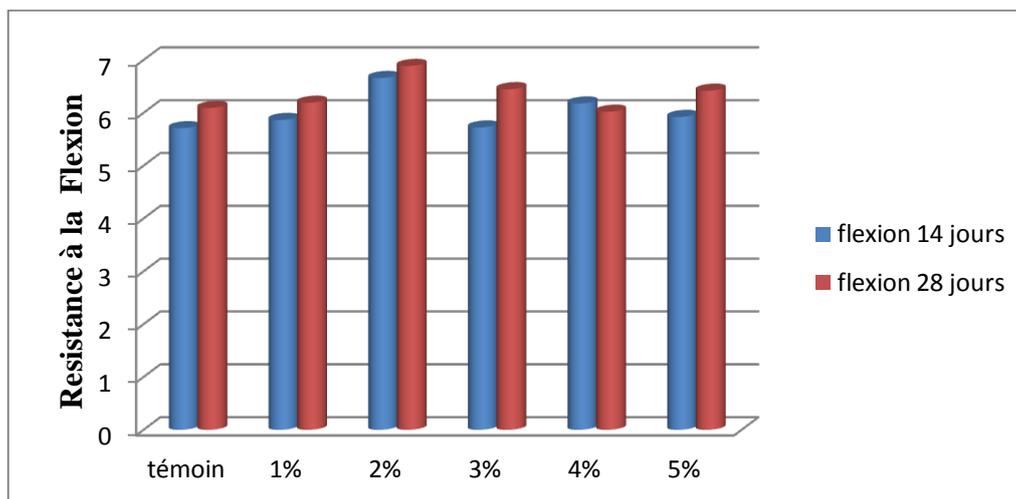


Figure IV.29 : la résistance mécanique à la flexion des fibres longue et sans fibres pour 14 et 28 jours.

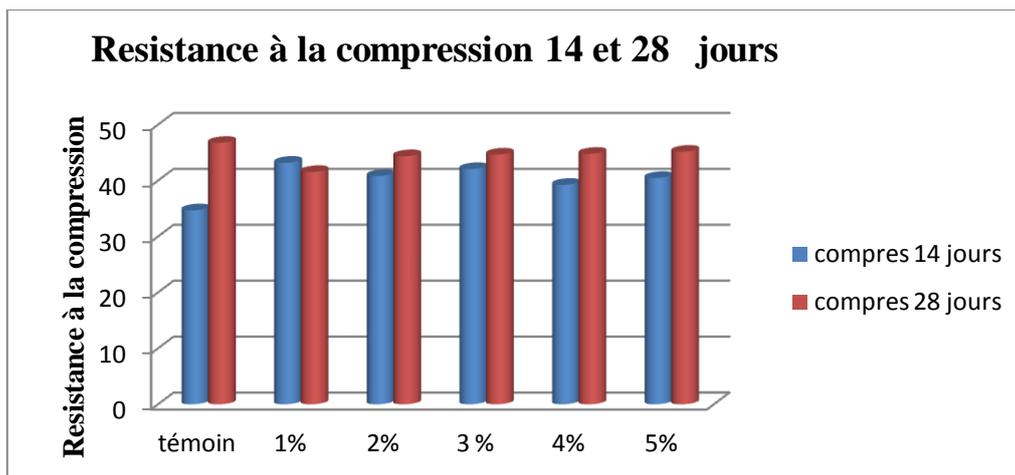


Figure IV.30 : La résistance mécanique à la compression des fibres longue et sans fibres pour 14 et 28 jours.

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci-dessous :

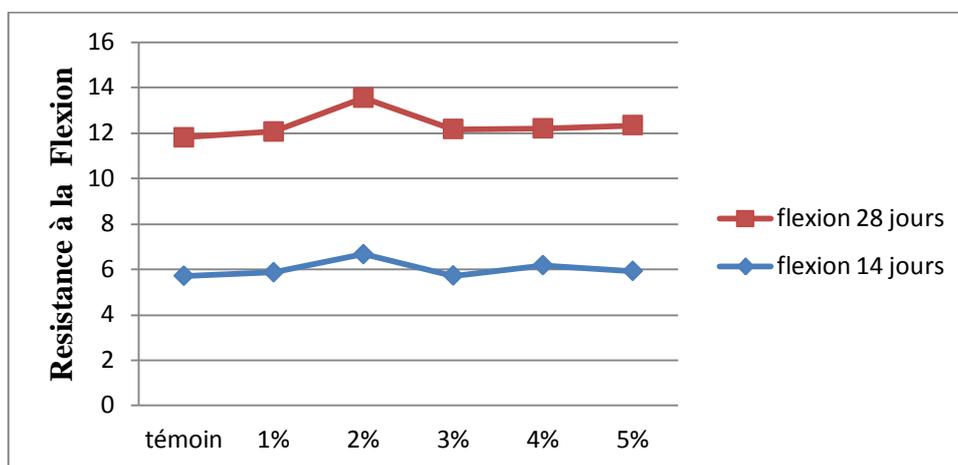


Figure IV.31: La résistance mécanique à la flexion des fibres longue et sans fibres pour 14 et 28 jours.

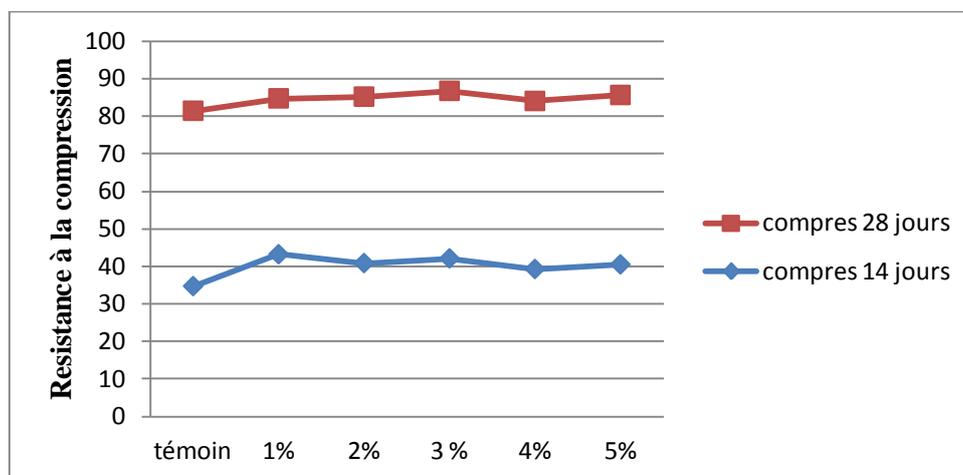


Figure IV.32 : La résistance mécanique à la compression des fibres longue et sans fibres pour 14 et 28 jours.

Commentaire

D'après les résultats obtenus, la résistance à la traction par flexion et compression des éprouvettes de mortier avec fibre longue augmente légèrement avec l'augmentation d'âge, sauf la flexion à 3% pour 14 jours presque la même par rapport au témoin. La flexion à 4% et la compression à 1% diminué par l'augmentation d'âge. Ceci est à l'effet peut être de malaxage et les vides créés entre les fibres ajouté.

Tableau IV.19 : Effet des fibres courtes sur la résistance à la flexions et à la compression

Age	type	Resistance à la flexion (Mpa)	Resistance à la compression (Mpa)
14	témoin	5,709	34,681
	1%	5,695	39,385
	2%	6,263	38,379
	3%	6,605	36,869
	4%	5,751	39,498
	5%	5,269	37,120
28	témoin	6,092	46,745
	1%	7,399	40,001
	2%	6,774	40,103
	3%	5,368	39,657
	4%	5,936	40,654
	5%	6,334	41,729

Les résultats sont représentés schématiquement sur l'histogramme de la figure ci-dessous

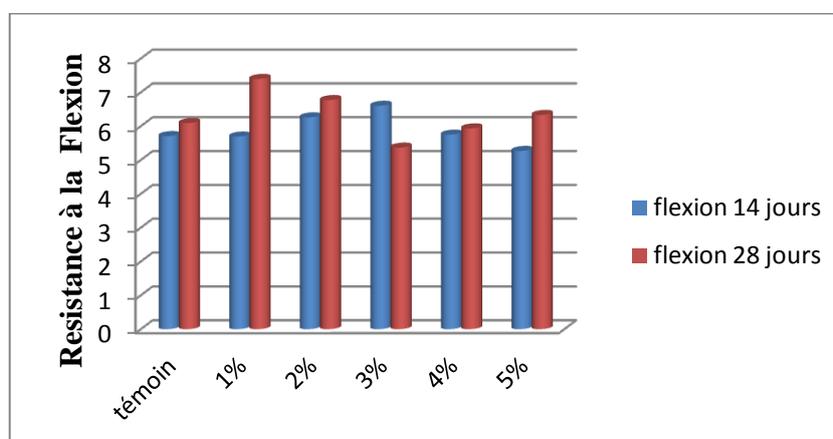


Figure IV.33: La résistance mécanique à la flexion pour différents pourcentage avec fibres courte et sans fibres pour 14 et 28 jours.

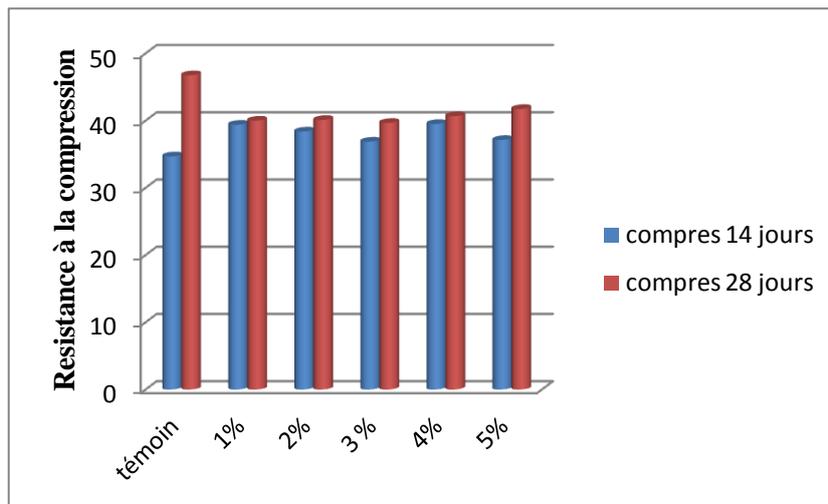


Figure IV.34: La résistance mécanique à la compression des fibres courte et sans fibres pour 14 et 28 jours.

Les résultats sont présentés graphiquement sous forme des courbes sur la figure ci-dessous :

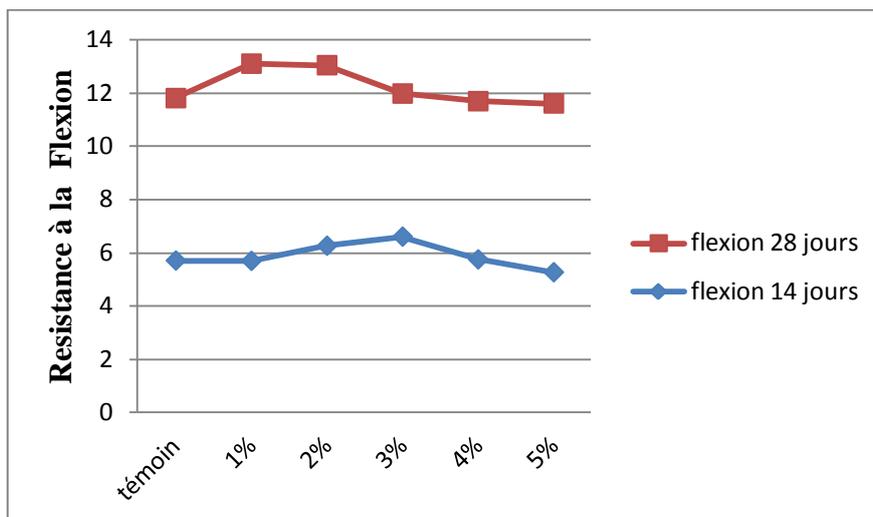


Figure IV.35: La résistance mécanique à la flexion des fibres courte et sans fibres pour 14 et 28 jours.

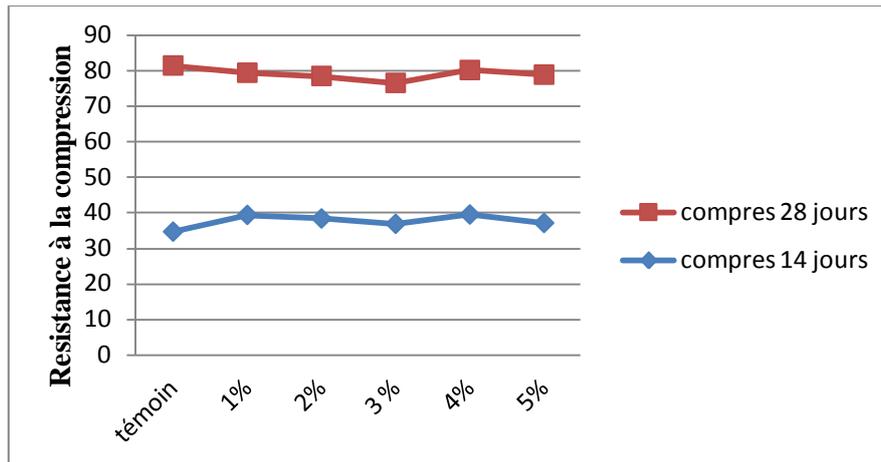
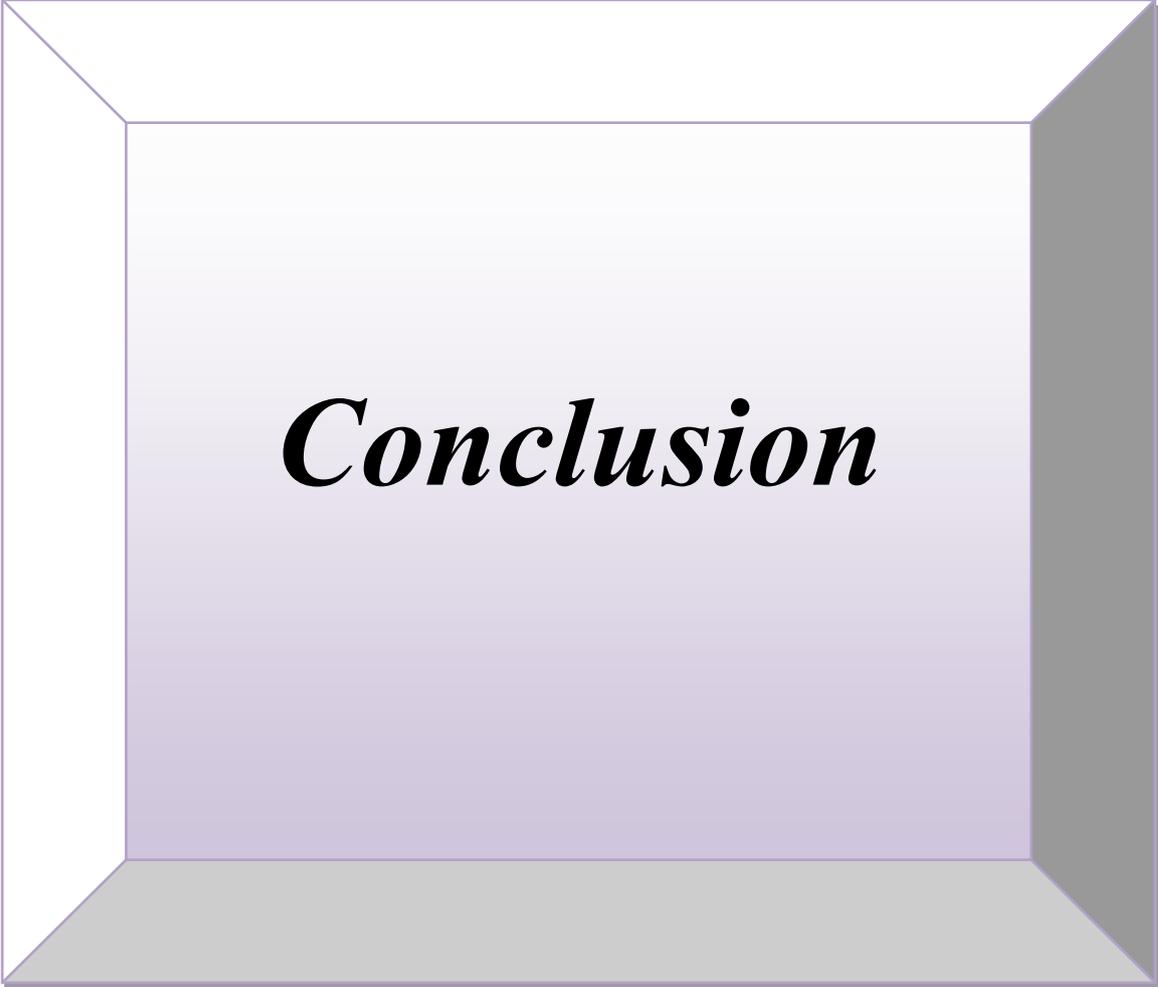


Figure IV.36: La résistance mécanique à la compression des fibres courte et sans fibres pour 14 et 28 jours.

Commentaire

D'après l'histogramme qui indique, la résistance à la traction par flexion et la compression des éprouvettes de mortier avec fibres courte augmente avec l'augmentation d'âge sauf la flexion à 1% pour 14 jours presque la même avec le témoin et la flexion à 3% diminué par l'augmentation d'âge. Une augmentation major remarquable au témoin à la compression pour 28jour par rapport aux éprouvettes de déférent pourcentage des fibres.



Conclusion

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Rappelons que l'objet de ce mémoire est la formulation et la caractérisation d'un mortier léger par introduction du feillard polyester PET. En effet, il a été conclu qu'ils se caractérisent essentiellement par leurs moyenne masse volumique, adaptable aux exigences, ces mortiers présentent une augmentation de la densité avec augmentation des pourcentages des fibres. Nous nous proposons, ici de dresser le bilan des contributions apportées sur les trois chapitres concernant la revue bibliographique et la partie expérimentales.

Les trois chapitres **I, II et III** sont consacré à la revue bibliographique respectivement sur le ciment, les bétons et les mortiers et les fibres en général et particulièrement les fibres plastiques(feillard polyester).

Dans le quatrième chapitres **IV** de ce travail, nous avons conduit une étude expérimentale Sur la formulation d'un mortier léger fibré (feillard polyester) avec leurs différents pourcentage (1%,2%,3% ,4%,5%) et types (longue et courte), nous avons fait le point sur les caractéristiques des matériaux utilisés à savoir : Le sable, le ciment portland composé **CEM II / A-M (P-L) 42.5N**, l'eau du robinet du laboratoire LCTP de BOUIRA, l'adjuvant Superplastifiants(Réducteur d'eau) et poudre de verre. Nous avons apporté également une compréhension de l'effet des fibres sur paramètres et les caractéristiques physicomécaniques de mortier léger à différents âge.

Dans ce chapitre, nous avons présentés les résultats d'une étude expérimentale de mortier léger de feillard polyester PET, elles sont basées sur les pourcentages bien choisies afin d'avoir ces effets sur les propriétés physiques et mécaniques tels que : la masse volumique et la résistance (compression, flexion). Enfin, Les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- La masse volumique augmente avec l'augmentation des pourcentages du feillard polyester PET.
- Le mortier léger de feillard polyester et un mortier plus résistant à la compression et à la flexion par rapport au mortier témoin sauf la flexion à 1% pour 14jours(fibre courte) , 4% et 5% pour 28 jours (fibres longue) diminution légère par rapport aux témoins est ça peut être à l'effet de malaxage et les vides créé entre les fibres ajouté, et une augmentation remarquable pour le témoin a la compression pour 28jours par rapport aux éprouvettes de différents pourcentages des fibres et ceci peut être sous l' effet d'âge.

CONCLUSION GENERALE

Il ya une croissance considérable dans la résistance à la flexion par traction a trois point et compression de mortier fibré. Cela traduit par l'ajout des fibres dans la matrice, améliore de façon importante la ductilité du matériau.

Nous aspirons que cette étude contribuera à une large diffusion des éléments à la base de mortier renforcés par les fibres plastique PET.

Référence Bibliographique

- [1]: Dr. A.MERDAS, Cours de matériaux de construction « Les liants minéraux » U.F.A. de Sétif 1
- [2]: TLEMSANI I, TOUBAL S, Elaboration caractérisation des mortiers à base des biopolymères et des tiges dures (Alfa) (Boumerdes 2015-2016)
- [3]: M. Venuat– La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. 1989- 277 p.
- [4]:J. Baron, J.P. ollivier et J.C. Weiss, « Les bétons, bases et données pour leur formulation», Edition Eyrolles,Troisième tirage, 1999, pp 3-12.
- [5]:G. Dreux "Nouveau guide du béton et de ses constituants " Edition, Eyrolles- Paris- 1998, pp 29-41.
- [6]:Abdelkader Ameer« Influence de l'ajout pouzzolane sur la résistance du ciment de la cimenterie de Saïda », mémoire d'ingénieur d'état en chimie et génie des procédés, Département de chimie, Université Abou-BakrBelkaïd, 13/11/2006, 13p.
- [7]:Le site web : www.perso.médiafiltre.com/web/master_gp/ciment.ntm. Mai 2015.
- [8]:Pablo Picasso«Dossiers rallye», N°5, France, 11 novembre 2004.
- [9]:T.Mahmoud,’’ étude de matériaux renforcés par des fibres organique en vue de leur utilisation dans le renforcement et la réparation des ouvrages tels que les ponts ‘’ thèse de doctorat, Institut nationale des sciences appliqués de Lyon, Génie Mécanique, 2005.
- [10]: M. J. Ghazali, C.H.Azhari, S. Abdullah & M. Z. Omar "Characterization of natural fibers (Sugarcane Bagasse) in Cement Composites" Proceedings of the World Congress on Engineering , London, Vol II July 2 - 4, 2008.
- [11]: A, Govin,"Aspects Physico -Chimique de l'interaction bois-ciment modification de l'hydratation du ciment par le bois" thèse de Doctorat de l'université de Limoges ,2004.
- [12]: M.N. Noirfontaine, Étude structurale et cristallographie du composé majoritaire du ciment anhydre : le silicate tricalcique’’ thèse de doctorat, école polytechniques, 2000.
- [13]:G. Seidel, H. Huckuf et J. Stark, « Technologie des ciments, chaux et plâtres, processus et installations de cuisson » Paris : septima, 1980.
- [14]: ADAM. M. NEVILLE. (Propriétés des bétons) Eyrolles Paris, 2000.

Référence Bibliographique

- [15]:Thèse doctorant Stéphan ASSIE : durabilités de béton. Laboratoire matériaux et durabilité des constructions INSA-UPS génie civil, 135 avenue de Ranguil, 31077 Toulouse cedex année 2004.
- [16]:DJELOUABI HAYET Influence des fibres végétales sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton (BOUMERDES 2016/2017).
- [17]:Thèse en cotutelle internationale Mohamed Rissel Khalifa effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons, université de Constantine juin 2009.
- [18]: FRITIH Y, «apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton», thèse de doctorat université de Toulouse juillet 2009.
- [19]:BEN ABDELKARIM .S, KRIM .Kh Effet de la température des constituants sur le comportement mécanique du béton (ADRAR 2019/2020)
- [20]: J. M. Sganzi, Programme ou résumé des leçons d'un cours de constructions: avec des applications tirées spécialement de l'art de l'Ingénieur des ponts et chaussées.
- [21]: R. Vittone, Bâtir : manuel de la construction, PPUR Presses polytechniques, 2010.
- [22]: LAFARGE, Documents de LAFARGE, France.
- [23]: o. d. bibliothèque, pratiques actuelles pour la formulation des bétons (5/191), F.S.I.
- [24]: Cours de MDS .Les granulats .Sétif : université Farhate Abes. p.1.
- [25]: Béton Autoplaçant chapitre 2, Partie I : Revue bibliographique.
- [26]: S-Laldji Cours-ETS hiver 2015, Caractéristiques fondamentales du béton
- [27]:HanaaFares, «Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons Autoplaçants exposés à une Température élevée», Thèse de Doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise Décembre 2009.
- [28]: AYACHE B, RAHAL I, BENMANSOUR W « CARACTERISATION DES DIFFERENTS TYPES DU BETON A BASE DE COPEAUX DE BOIS (Béton Ordinaire – Béton Autoplaçant – Béton A Haute Performance) U BM ANNABA Année 2019 ».
- [29]: Cimbéton « Les bétons : Formulation, fabrication et mise en œuvre »
- [30]:<http://www.prc.cnrs.fr/spip2.php?article92>
- [31]: Hachemi, Bousa "Influence des différentes granulométries du sable sur le comportement mécanique du béton" université de m'Hamed Bougara Mémoire Master
- [32]:CHERAIT YACINE, NAFA ZAHREDINNE« Eléments de matériaux de construction et essais» Université de Guelma 2007.
- [33]: FICHES TECHNIQUES TOME 2 G11, Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre

Référence Bibliographie

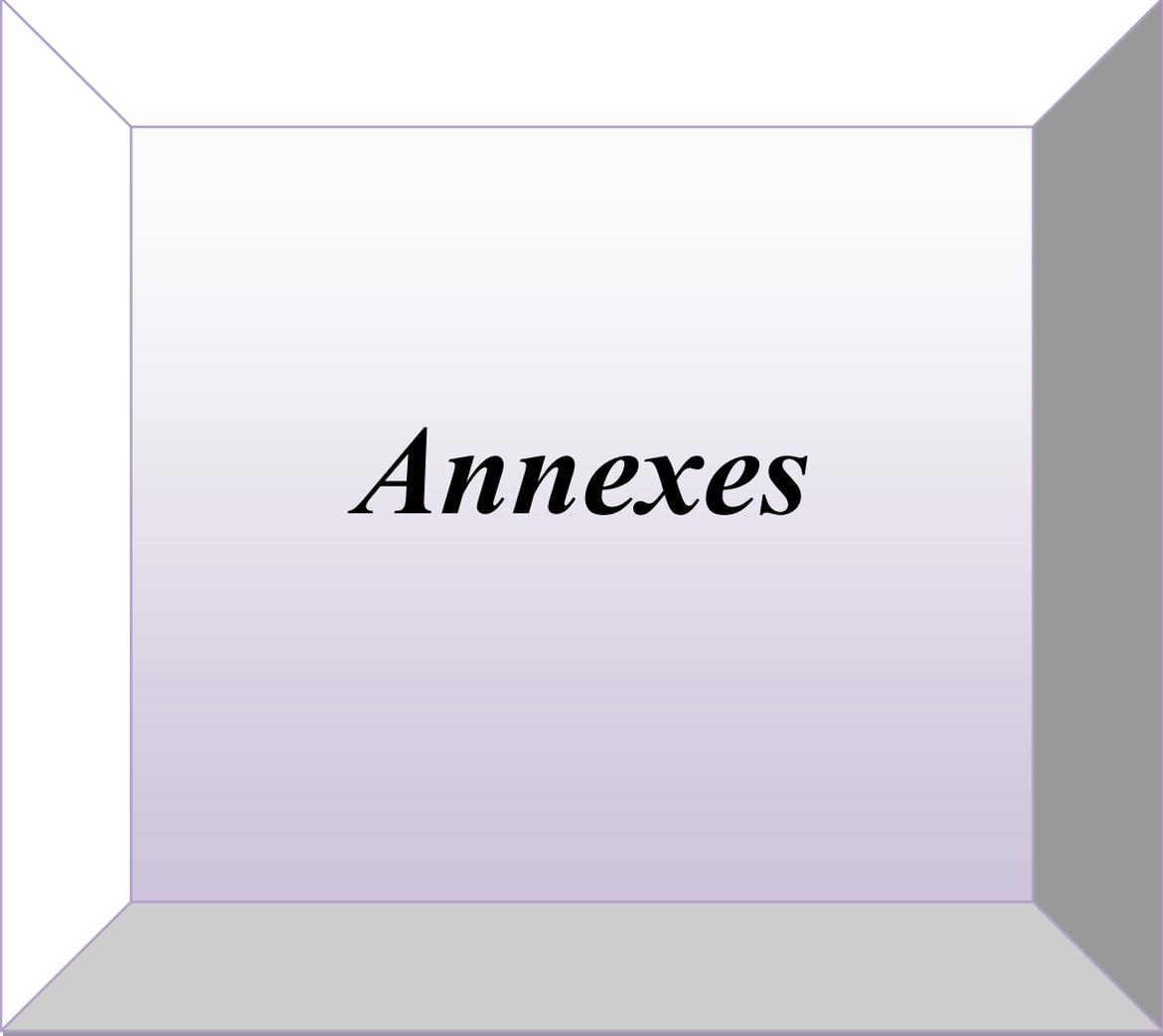
- [34] : « Cours Béton Armé : Composition du Béton » Dr.Ir.P. Boeraeve- Institut gramme-LIEGE- 2010
- [35] : Document en ligne/ site : <http://www.guidebeton.com/differents-types-beton>
- [36] : Document en ligne/ site : <http://www.guidebeton.com/differents-types-beton>
- [37] : Melle MEZIANE L, « Etude Expérimentale d'un Béton Fibré à Ultra Haute Performances (BFUP) à base de sable de dune » Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2018/2019
- [38] : N. MAKHLOUF, Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton arme de fibres en copeaux, Thèse de magister 2010. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [39] : Association béton Québec en collaboration avec les manufacturiers de fibres métalliques et de fibres synthétiques. « Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton». Janvier 2005. 38 p.
- [40]:Sukontasukkul P., (2004) "Toughness evaluation of steel and polypropylene fiber reinforced concrete beams under bending". Thammasat international journal of science and technology 9, 3 (Jul.-Sep) pp. 35-41.
- [41]: G. BERNIER. Formulation des bétons. Techniques de l'ingénieur, Paris, 2004, C2 210.
- [42] : Pascal Casanova. Bétons renforcées de fibres métalliques : Ecole nationale de ponts et chaussées, Paris, 1995.
- [43] : BENMALEK, M, L, Contribution à l'étude des bétons de sables dunaires pour éléments de structures", Thèse demagister, Université de Constantine, Oct1992, P472
- [44] : SABLOCRETE, « Bétons de sable : caractéristiques et pratique d'utilisation », Presses de l'école nationale des ponts et chaussées (1994), P237
- [45] : La maison de COIGNETwikimedia,org (site Internet google, fr),2015
- [46]:Wikipedia,org (site Internet google,fr),2015
- [47] : PHILIPPE FRANCISCO. Déformations différées des bétons fibrés à ultra hautes Performances soumis à un traitement thermique. Autre. Ecole normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2012.
- [48]:DERRADJI L, LAOUCHDI F, « élaboration et caractérisation d'un matériau mortier a base d'un liant ternaire renforce par des fibres métalliques » UAMOB 2016-2017.
- [49] : VENUAT. M; DU BETON MOUSSE AU BETON DE POLYSTYRENE ; 1983.
- [50] : BOUALI, KHALED, THESE DE DOCTORAT «ELABORATION ET CARACTERISATION THERMOMECHANIQUE DES MORTIERS A BASE D'AJOUTS DE DECHETS DE BRIQUES REFRACTAIRES ». (2015), 108 PAGES.

Référence Bibliographie

- [51]: WILLIAM.D, CALLISTER.JR « Science et génie des matériaux » modulu Editeur, 2001.
- [52]: R.DUPAIN, R.LANCHON, J-C.SAINT-ARROMAN «Granulat, sols, ciment et béton» Edition CASTEILLA-PARIS-2004
- [53]: Mounir Bellem « Valorisation des déchets plastiques pour l'amélioration des performances mécaniques des mortiers »mémoire de master, université de M'sila, juin 2013.
- [54]: SYLVER.P «science des matériaux», université pierre et marie curie 2005 ,2006.
- [55]: GCI712 « Durabilité ET réparation du béton », département Génie civil, Université de Sherbrooke-Canada, Avril 2009.
- [56] : HEMIL, SAMIR «EFFET COMBINE DES BILLES DU POLYSTYRENE ET LES FIBRES PLASTIQUE SUR LES MORTIERS AU CIMENT BLANC»THESE DE DOCTORAT. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA(2018) PAGES 1-80
- [57]: Mr. BERRAIH MIMOUN « Etude des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets de verre » mémoire pour l'obtention du diplôme de magister en Génie Civil, option géomatériaux (ENSET Oran 2009/2010).
- [58] :H. MITANI. VARIATIONS VOLUMIQUES DES MATRICES CIMENTAIRES AUX TRES JEUNE AGES : APPROCHE EXPERIMENTALE DES ASPECTS PHYSIQUES ET MICROSTRUCTURAUX. THESE DE DOCTORAT DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES, 2003, 182 PAGES.
- [59] : BRESSON A. INFLUENCE DE LA MINERALOGIE SUR LE COMPORTEMENT DES MORTIERS DE CIMENTAU JEUNE AGE. THESE GENIE CIVIL. LAVAL, QUEBEC : FACULTE DES SCIENCES ET DE GENIE UNIVERSITE LAVAL, 2006, 150PAGES.
- [60] :Riad, M. D. (2002). Propriétés physico – mécaniques des mortiers et des. Mortiers et des 3eme édition. Paris, Eyrolles 1975. Ciments élaborés à base de laitier granulé d'El Hadjar
- [61] : « Cimbéton ». Documentation technique édité par le centre d'information sur le ciment et ses applications. Paris, France 1994.
- [62] : NF EN 934-2, ADJUVANTS POUR BETONS, MORTIER ET COULIS - PARTIE 2 : ADJUVANTS POUR BETON - DEFINITIONS, EXIGENCES, CONFORMITE, MARQUAGE ET ETIQUETAGE, 2012, 21 PAGES.
- [63] : ZANE M, DJEMAA N « Elaboration et caractérisation d'un mortier léger par introduction de billes de polystyrène. » UAMOB 2018/2019
- [64] : AFNOR. « Bétons et constituants du béton : ciments et chaux ». Tome 2
- [65] : Par une réunion d'ingénieurs. « Matériaux de constructions ».
-

Référence Bibliographique

- [66] : KAMEL, S. (03 juillet 2007). Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier.
- [67] : Lamia, Y. (//2011.). Caractérisation d'un composite à la rupture à base des.
- [68] : DANI S, MISSAOUI A « Etude physico-chimique de mortier de plâtre à base sable Renforcé de fibres synthétique et végétale » UAMOB 2016/2017
- [69] : G.G.Giménez « Aportaciones a la química del esparto español ». Anales de la Universidad de Murcia. Vol 13, N° 1. Curso 1954-55 »
- [70] : MAICHE A, SAIDI W « ETUDE DE L'EFFET COMBINE DES AJOUTS SUR LES PROPRIETES RHEOLOGIQUE ET PHYSICOMECHANIQUE DES BETONS AUTOPLAÇANT FIBRES » BOUMERDES, Juin 2017
- [71]: SUKONTASUKKUL P, (2004), « toughness evaluation of steel and polypropylene fiber reinforced concrete beams under bending »,thammasat international journal of science and technology.
- [72]: Rossi P. (1998) Les bétons de fibres métalliques, Ponts et Chaussées, Paris.
- [73]: R.G. Raj et B.V.Kokta, «Compounding of cellulose fiberswithpolypropylene: effect of fibertreatment on dispersion in the polymer matrix », Journal of AppliedPolymer Science., Vol. 38, 1989, pp. 1987-1996.
- [74]:C. Klason, J. Kubata et H.E. Stromvall. « The Efficiency of Cellulosic Fillers in Common Thermoplastics. Part I. FillingWithoutProcessingAids or Coupling Agents ». International Journal of Polymeric Materials. Vol. 10, 1984, pp. 159-187.
- [75] :J. Soucy, « Potentiel d'utilisation des fibres de papier dans la conception decomposites bois polymères par une technologie d'extrusion ». Thèse de Maîtrise en Ingénierie, Université du Québec, Canada, 2007, 149 p.
- [76] : 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.



Annexes

Annexe A



المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر

GRUPE INDUSTRIEL DES CIMENTS D'ALGERIE
SOCIÉTÉ DES CIMENTS DE SOUR EL GHOZLANE

« S.C.S.E.G. »

S.P.A. au capital social de : 1.900.000.000 D A : شركة ذات رأسمالها الاجتماعي : 1.900.000.000 د.ج.



N° Identification Fiscale : 099 010 028 210 584 - N° Article d'Imposition : 10 38 52 58 011 - N° Registre de Commerce : 10/00-0282105898

Produit Commercialisé :
Ciment CEM II /A-M (P-L) 42.5 N

Fiche technique

Période D'expédition :
Avril -Mai 2019 -

Conformément à la norme NA 442 édition 2013

Caractéristique physico-mécaniques				Composition chimique			
Désignations	Unités	Exigence	Moyenne	Composé	Exigence	Moyenne (%)	
Poids spécifique	Gr/cm ³		3.09	SiO ₂		20.06	
Surface spécifique Blaine	Cm ² /gr		4000	Al ₂ O ₃		3.99	
Consistance normale	% H ₂ O		26.11	Fe ₂ O ₃		3.04	
Temps de prise	Début	Min.	≥ 60	151	CaO	61.57	
	Fin	Min.		322			
Expansion à chaud	mm	≤ 10	2.79	MgO		1.62	
Chaleur d'hydratation à (41h)	(j/g)	270	238.8	K ₂ O		0.54	
Refus sur tamis 45 µm	%		15.58	Na ₂ O		0.26	
Résistance à la flexion	02 jours	Mpa		4.56	SO ₃	≤ 3.50	2.06
	07 jours	Mpa		6.12	Cl ⁻	≤ 0.10	< 0.01
	28 jours	Mpa		6.92	P.A.F à 1000 ° C		7.16
Résistance à la compression	02 jours	Mpa	≥ 10.00	19.94	CaO _{libre}		1.56
	07 jours	Mpa		34.92			
	28 jours	Mpa	Li ≥ 42.5 Ls ≤ 62.5	43.53	---	---	---

Observation : c'est un ciment portland composé, dont les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques satisfont aux exigences du ciment CEM II / A-M (P-L) 42.5N Selon la norme NA 442/2013.

Société des Ciments Sour El Ghozlane
Siège : Col de Becouche BP 61, Sour El Ghozlane
(W) de Bouira, 10004 Algérie
E-Mail : bodg-scseg@scseg.dz

Le chef de Département

BUILDING TRUST



NOTICE PRODUIT

Sika® ViscoCrete®-625

Superplastifiant/Haut réducteur d'eau pour bétons prêts à l'emploi

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Sika® ViscoCrete®-625 est un Super plastifiant/Haut réducteur d'eau formulé à partir d'un mélange de polycarboxylates qui confère au béton des longs maintiens de rhéologie.

DOMAINES D'APPLICATION

- Sika® ViscoCrete®-625 permet la fabrication de :
- Bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de très longues distances,
 - Bétons à longs maintiens de rhéologie, avec reprise de fluidité dans le temps,
 - Bétonnage par temps chaud 30 à 35°C et plus,
 - Bétons d'ouvrages fortement ferrailés.

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	Fût de 200 kg Cubi de 1100 kg Vrac
Aspect / Couleur	Liquide marron
Durée de Conservation	12 mois dans son emballage d'origine intact
Conditions de Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Sika® ViscoCrete®-625 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Densité	1,08 ± 0,015
Valeur pH	5,0 ± 1,0
Extrait Sec	31,0 ± 1% (méthode halogène selon NF 085)
Teneur Totale en Ions Chlorure	≤ 0,1%

Notice produit
Sika® ViscoCrete®-625
Février 2021, Version 01.01
021301011000002971

1 / 2

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

Dosage	Plage de dosage : 0,5 à 2,5 % du poids du ciment ou du liant selon la fluidité et les performances recherchées.
Distribution	Sika® ViscoCrete®-625 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité.

RESTRICTIONS LOCALES

Veillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le

droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

Sika El Djazair SPA
08 route de Larbaa
16111 Les Eucalyptus
ALGERIE
Tél.: 0 21 50 16 92 à 95
Fax: 0 21 50 22 08
dza.sika.com



Annexe C



Annexe D

1.5 % de superplastifiants sika625 par rapport le poids de ciment

$$\text{Donc } \left\{ \begin{array}{l} 100 \% \rightarrow 450\text{g} \\ 1.5 \% \rightarrow X \end{array} \right.$$

$$X = \frac{1.5 \times 450}{100} = 6.75\text{g}$$

3% de la poudre de verre par rapport au poids de ciment

$$\left\{ \begin{array}{l} 100\% \rightarrow 450\text{g} \\ 3 \% \rightarrow X \end{array} \right.$$

Donc

$$X = \frac{450 \times 3}{100} = 13.5 \text{ g}$$

IV.3.1.2. L'incorporation des fibres

L'incorporation des fibres en fraction volumique s'effectué selon le calcul suivant :

$$\rho = \frac{M_{\text{fibre plastique}}}{V_{\text{fibre plastique}}} \longrightarrow V_{\text{fibre plastique}} = \frac{M_{\text{fibre plastique}}}{\rho_{\text{fibre plastique}}}$$

$$V_{\text{fibre plastique}} = X \cdot V_{\text{mortier}}$$

$$\frac{M_{\text{plastique}}}{\rho_{\text{plastique}}} = X \cdot V_{\text{mortier}} \dots \dots \dots M_{\text{plastique}} = \rho_{\text{plastique}} \cdot X \cdot V_{\text{mortier}}.$$

Le volume de mortier

$$V_{\text{mortier}} = 4 \times 4 \times 16 \times 3$$

$$V_{\text{mortier}} = 768\text{cm}^3$$

Pour 1% des fibres

$$V_{\text{fibre plastique}} = X \cdot V_{\text{mortier}}$$

$$V_{\text{fibre plastique}} = 1\% \times 768\text{cm}^3$$

$$V_{\text{fibre plastique}} = 7,68\text{cm}^3$$

La masse des fibres

$$\rho = \frac{M}{V} \leftrightarrow M = \rho \cdot V$$

$$M = 0.9 \times 7.68$$

$$M = 6.912\text{g}$$

Avec

ρ : la masse volumique

M : masse de l'éprouvette.

V : volume de l'éprouvette.

Le dosage des fibres 1, 2, 3, 4,5 % par rapport au volume total du mélange.