

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA**



Faculté des Sciences et des sciences appliquées  
Département Génie Civil

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**Melle : Saoudi Souhila**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

**Filière : Génie Civil**

**Option : Ingénierie des Matériaux de Construction**

**Thème :**

**Élaboration et caractérisation d'un béton réfractaire fibré  
(À base du déchet réfractaire)**

**Devant le jury composé de :**

Hami Brahim	MAA	UAMOB	Président
Kennouche Salim	MAA	UAMOB	Encadreur
Aribi Chouaibe	MAA	UAMOB	Examinateur
Messeboua Nourdine	Enseignant	UAMOB	Examinateur

**Année Universitaire 2015/2016**

# Remerciements

On tient tout d'abord à remercier le **Bon Dieu**, le **Tout Miséricordieux**, pour sa miséricorde, le succès et tous les biens qui ma a accordé.

Nos remerciements s'adressent à **S. Kennouche** d'avoir accepté de ma encadrer et pour sa patience et ses conseils tout au long de la réalisation de ce travail. Nous voudrions remercier, également, l'ensemble des membres de jury, d'avoir accepté, volontiers, d'examiner ce travail.

De chaleureux remerciements d'adressent également à :  
**Mme : Saoudi Ncira ; Mr:Aribi CHouaib ;Mr: Bouhedjar Lezhar ;Mr:Amrane Belaid ...et à tout l'ensemble des enseignants de UAMOB**

Desquelles nos demandes ont, toujours, eues un écho favorable. Merci de votre gentillesse et votre soutien indéfectible tout au long des moments difficiles de la vie ; un soutien pour lequel il nous est impossible de dépeindre avec des mots.

**Aux : ingénieures de labo :Said –Farid- Lamia- Ms Chedri**

Pour leur accueil et l'aide qu'ils nous ont apportée

**A :toutes personnes**

Qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de notre mémoire

Merci pour votre grande disponibilité et votre bonne humeur.

# Dédicaces

**Je dédie ce travail à Yemma ; Vava  
À ceux qui m'ont tout donné  
d'amour, tendresse, compréhension**

**∴ Mes enseignants et  
enseignantes**

**∴ A ma grande famille**

**∴ À mes amies**



## Sommaire

### Sommaire

RESUME.....	1
CHAPITRE I : LES BETONS.....	1
INTRODUCTION.....	1
I.1. LES CONSTITUENT DE BETON.....	1
I.1.1. Le ciment.....	1
I.1.2. L'eau .....	2
I.1.3. Les granulats .....	3
I.1.4 Les adjuvants.....	4
I.2. LES PROPRIETES DE BETONS FRAIS ET DURCIS.....	5
I.2.1. Les propriétés de béton frais .....	6
I.2.2. Les propriétés de béton durci .....	10
I.3. LES BETONS SPECIEUX .....	11
I.3.1. Béton à hautes performances (BHP) 1970_1980 .....	11
I.3.2. LE BETON ULTRA HAUT PERFORMANCE (BUHP).....	13
I.3.2.b. Caractéristiques de BUHP.....	14
I.3.3. Le béton auto plaçant BAP .....	15
I.3.4. Le béton de sable.....	16
I.3.4.a. Formulation de béton de sable NF P 18-500 de juin 1995 .....	17
CHAPITRE II : LE BETON REFRACTAIRE.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
II. INTRODUCTION.....	18
II.1. GENERALITE .....	18
II.2. DEFINITIONS SELON LES NORMES .....	18
II.3. LES DOMAINES D'UTILISATION DES MATERIAUX REFRACTAIRE .....	20
II.4. LA CLASSIFICATION DES MATERIAUX REFRACTAIRES .....	21
II.4.1. Par la nature chimique et minéralogique .....	21
II.4.2. Par leur masse spécifique et leur compacité .....	22
II.4.3. Par leur technologie de fabrication .....	22
II.4.4. Par la forme.....	23
II.5. LES BETONS REFRACTAIRES .....	23
II.5.1. Définition de béton réfractaire .....	24
II.5.3. Les composantes essentielles de béton réfractaire.....	27
II.6. . LES REFRACTAIRES FAÇONNES.....	33
II.6.1. Le procédé de fabrication des réfractaires façonnés .....	33

---

## Sommaire

II.6.2. Le recyclage des déchets réfractaires façonnés .....	34
II.6.2.1. Définition d'un déchet réfractaire.....	34
II.6.2.2. La classification des déchets réfractaires.....	35
II.7. COMPORTEMENT DE BETON REFRACTAIRE.....	38
II.7.1. THERMOMECHANIQUE.....	38
II.7.2. L'évaluation de module d'Young.....	40
CHAPITRE III : LES FIBRES DANS LE BETON .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
III.1. INTRODUCTION .....	42
III.2. LES FIBRES POUR BETON.....	42
III.2.1. LA CLASSIFICATION DES FIBRES.....	43
III.2.1.1. LES FIBRES ORGANIQUES.....	43
III.2.1.2. LES FIBRES VEGETALES OU ANIMAL.....	43
III.2.1.3. LES FIBRES SYNTHETIQUES.....	44
III.2.1.3.1. FIBRE D'ARAMIDE .....	44
III.2.1.3.2. FIBRE DE CARBONE.....	44
III.2.1.4. FIBRE INORGANIQUE .....	45
III.2.1.4.1. LA FIBRE DE VERRE .....	46
III.2.1.4.2. LES FIBRES METALLIQUES.....	47
III.2. DEFINITION DU BETON FIBRES .....	48
III.2.1. FORMULATION DE BETON FIBRES .....	48
III.3. CARACTERISTIQUE DE BETON FIBRES .....	49
III.3.1. RESISTANCE A LA FLEXION ET DUCTILITE.....	49
III.3.2. RESISTANCE A LA FATIGUE.....	49
III.3.3. RESISTANCE A L'ABRASION .....	49
III.3.4. DISPERSION ET HOMOGENEISATION DES FIBRES .....	50
III.3.4.1. EFFET DE L'INCORPORATION DES FIBRES SUR LES BETONS .....	50
III.3.4.1.1. LA RESISTANCE A LA COMPRESSION.....	50
III.3.4.1.2. LA RESISTANCE A LA TRACTION .....	50
III.3.4.1.3. LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION.....	50
III.3.4.1.4. RESISTANCE AU CISAILLEMENT .....	51
III.3.4.1.5. VIS A VIS DU RETRAIT .....	52
III.3.4.1.6. RESISTANCE AUX CHOCS THERMIQUES .....	52
III.3.4.1.7. RESISTANCE A LA CORROSION.....	52
III.3.4.1.8. L'OUVRABILITE.....	53

## Sommaire

III.4. AVANTAGES DU BETON FIBRE.....	53
III.4.1. ASPECT TECHNIQUE.....	53
III.4.2. ASPECT ECONOMIQUE.....	54
III.5. LES INCONVENIENTS DU BETON FIBRE.....	54
III.6. LES EXIGENCES DES FIBRES POUR AMELIORER LES PERFORMANCES MECANIQUES .....	54
III.6. COMPORTEMENT MECANIQUE DE BETONS REFRACTAIRE FIBRES.....	55
III.7. LE RENFORCEMENT PAR LA FIBRE.....	55
III.7.1. FIBRES REFRACTAIRES .....	56
III.7.1.1. LA FIBRE D'ACIER.....	56
III.7.1.2. LE RENFORCEMENT PAR LA FIBRE DE VERRE .....	58
III.7.1.3. LE RENFORCEMENT HYBRIDE.....	58
CHAPITRE IV : LA PARTIE EXPERIMENTALE.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
IV.INTRODUCTION.....	61
IV.1. CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES .....	61
IV.1.2. Le ciment.....	61
IV.1.3. LA MASSE VOLUMIQUE APPARENT .....	62
IV.1.4. LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE .....	63
IV.1.5. LA FUMEE DE SILICE.....	63
IV.1.6. L'ADJUVANT .....	64
IV.1.7. LA FIBRE DE VERRE .....	65
IV.1.8. LA FIBRE D'ACIER .....	65
IV.1.9. L'EAU .....	66
IV.1.10. LES GRANULATS.....	66
IV.1.10.1. Préparation des granulats .....	67
IV.1.10.2. ÉTUDE DE LA COMPACITE MAX DES GRANULATS.....	68
IV1.10.3. La courbe granulométrique .....	70
IV1.10.4. Le module de finesse.....	70
IV.1.10.5. La masse volumique apparente et absolue .....	71
IV.1.10.6. L'absorption et l'humidité des granulats recyclés.....	73
IV.2. ÉLABORATION D'UN BETON REFRACTAIRE .....	74
IV.2.1. LE PROCEDE D'ELABORATION .....	74
IV.2.2. LE PROCEDER DE CUISSON.....	74
IV.2.2.1. Le dosage en eau .....	75

## Sommaire

IV.2.2.2. Le dosage en granulats .....	76
IV.3. L'ECONOMIE D'ENTREPRISE .....	78
Deuxième Formulation : .....	87
CONCLUSION GENERALE.....	89
PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS .....	90
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	91
ANNEXES.....	<b><i>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</i></b>

## Liste des figures

### Liste des Figures

Figure I. 1 : Premier pont en béton de L. Vicat (1853).....	1
Figure I. 2 : Les composantes essentielles de béton .....	1
Figure I. 3 : La matière première utilisée pour la fabrication de ciment. ....	2
Figure I. 4: Étendue de la taille des grains des composants granulaires et de la matrice cimentaire.....	4
Figure I. 5: Cycle de malaxage [Ngoc-Dong, 2007] cité par (Sidi Mohammed 2009). ....	5
Figure I. 6 : Les coques en BUHP de la gare de Shawnessy. ....	15
Figure I. 7 : un béton auto plaçant lors de collage. ....	16
Figure I. 8 : Le premier ouvrage en béton de sable Le phare de Port-Saïd aux environs de 1869 construit par François Coignet. ....	17
Figure II. 1 : Un cône pyroscopique étalonné incliné en demi-cercle. [11]. ....	19
Figure II. 2: Schéma montrée le principe de la conductivité thermique d'un matériau. ....	20
Figure II. 3: Principaux domaines d'utilisation des produits réfractaires et consommation annuelle en Europe de l'ouest en 2002[8]. ....	21
Figure II. 4 : Des briques réfractaires      Figure II. 5: béton près à l'emploi dans un fût .....	23
Figure II. 6 : Méthode de préparation des bétons réfractaires. ....	23
Figure II. 7 : four en brique réfractaire monte de 70cm .....	33
Figure II. 8 : Étapes générales de fabrication d'un produit réfractaire. ....	34
Figure II. 9 : des principales évolutions microstructures et du comportement thermomécanique des bétons réfractaires en fonction de la température, lors de la .....	39
Figure II. 10 : Évolutions du module d'Young et comportement dilatométrique de la matrice cimentaire d'un béton réfractaire à base d'andalousite [8] .....	41
Figure III. 1: Courbes contrainte-flèche en flexion 4 points : des fibres acier à 1%(en bleu) et 2%(en rouge) traitées thermiquement à 110°C et testées mécaniquement à température ambiante. [21]	55
Figure III. 2 : Courbes de comportement en flexion 4 points du béton réfractaire renforcé de fibres métalliques (nuances HF05, HF10, HF15 et HF20) traité thermiquement à 110°C et testé à 20°C (vert), traité thermiquement à 250°C et testé à 20°C (bleu), traité thermiquement à 250°C et testé à 250°C (rouge).	57

## Liste des figures

Figure III. 3 : Courbes de comportement en flexion 4 points du béton réfractaire renforcé de fibres métalliques (nuances HF05, HF10, HF15 et HF20) après traitement thermique à 400°C et testé à 20°C (bleu) ; traité thermiquement à 400°C et testé à 400°C (rouge).	57
Figure III. 4 : Courbes de comportement en flexion 4 points à 20°C et à 400°C du béton réfractaire renforcé de fibres de verre : cas des nuances NF, AR05 et AR10 après traitement thermique à 400°C.	58
Figure III. 5 : Courbes de comportement en flexion 4 points des nuances NF (vert), HF10 (bleu), AR05 (orange) et AR05-HF10 (rouge) traitées thermiquement à 400°C et testées à 20°C (a) et à 400°C (b).	59
Figure IV. 1: Sac de ciment utilisé CAC 25 Kg de type E. ....	62
Figure IV. 2 : Précaution exigée dans le sac. ....	62
Figure IV. 3 : La fumée de silice. ....	64
Figure IV. 4 : Combinaison des effets pouzzolaniques et d'optimisation de l'empilement granulaire de la fumée de silice. ....	64
Figure IV. 5 : Le mat de fibre de verre. ....	65
Figure IV. 6 : La fibre d'acier. ....	66
Figure IV. 7 : Préparation des granulats. ....	68
Figure IV. 8 : Distribution granulométrique expérimental (rouge) et théorique (bleu). ....	70
Figure IV. 9 : Essai de masse volumique des granulats. ....	72
Figure IV. 10 : Essais d'absorption des granulats (l'alumine, MG, Silico Al). ....	73
Figure IV. 11 : La courbe de cuisson. ....	75
Figure IV. 12 : Masse volumique après séchage de béton à 110 °C. ....	80
Figure IV. 13: la représentation graphique de la masse volumique de béton après cuisson à 600°C. ....	81
Figure IV. 14 : Appareille de mesure d'ultra son. ....	82
Figure IV. 15 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (3 points). ....	83
Figure IV. 16 : Dispositif d'essai de compression. ....	83
Figure IV. 17 : la représentation graphique de la vitesse d'ultrason. ....	84
Figure IV. 18 : La représentation graphique d'essai de flexion 3 points. ....	85
Figure IV. 19 : la représentation graphique de résultat de rupture par essais de compression. ....	86
Figure IV. 20 : les deux éprouvette 4*4*4 après cuisson à 600°C et l'ors de caractérisation. ....	87

## Liste des tableaux

### Liste des tableaux :

Tableau I. 1: Les essais effectués sur un béton frais.....	7
Tableau I. 2 : Formulation de bétons à hautes performances typiques utilisés en structure [4] .....	12
Tableau II. 1: La classification de quel que granulats réfractaire selon sont nature chimique et minéralogique.            21	
Tableau II. 2: Quelques oxydes réfractaires et leur nature chimique .....	22
Tableau II. 3 : Le dosage en ciment cas de granulats de chamotte.....	32
Tableau II. 4 : quelque granulat réfractaire cordonné avec le type de ciment nécessaire pour avoir une limite de température [3].....	32
Tableau II. 5 : Comportement dilatométrique d'un béton réfractaire à base d'andalousite.....	40
Tableau III. 1:Composition massique % de Fibre de verre E.....	46
Tableau III. 2: Caractéristiques mécanique mesurées sur un composite unidimensionnel. ....	46
Tableau III. 3: Caractéristiques mécanique mesurées sur filaments vierges. ....	47
Tableau III. 4: Les caractéristiques des fibres métalliques .....	48
Tableau III. 5 : Effet du pourcentage de fibre sur le comportement mécanique. ....	56
Tableau IV. 1 : Composition minéralogique du ciment.....	62
Tableau IV. 2 : Les caractéristique phtisque est mécanique selon la fiche technique.....	62
Tableau IV. 3: Valeurs de la masse volumique apparente de ciment utilisé. ....	63
Tableau IV. 4 : Types de fumée de silice. ....	63
Tableau IV. 5 : Caractéristiques technique de l'adjuvant. ....	65
Tableau IV. 6: Les donnés sur les brique selon leur fiche technique RHI. ....	67
Tableau IV. 7: Absorption des granulats recyclés .....	74
Tableau IV. 8 : Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats.....	76
Tableau IV. 9 : Valeurs du coefficient de compacité pour les micros bétons. ....	76
Tableau IV. 10 : l'application de module d'empilement sur les granulats .....	77
Tableau IV. 11 : Caractéristiques des bétons élaborés. ....	78
Tableau IV. 12: le cout des constituant d'un 1m3 de béton .....	79
Tableau IV. 13 : l'étude de béton selon la masse volumique .....	79

## Liste des tableaux

Tableau IV. 14 : les résultats de caractérisation .....	84
Tableau IV. 15 : le dosage pour le béton N°02.....	87

## Résumé

### Résumé

Ce travail porte sur la valorisation des déchets réfractaires issues de l'industrie des matériaux de construction, à savoir les briques réfractaire de cimenterie et les rouleaux des faïenceries, qui sont de nos jours non exploiter, la valorisation visé est d'élaborer des bétons réfractaires à la base des granulats de déchets de briques réfractaires, en utilisant un liant classé comme réfractaire aussi, d'autre part on vise aussi l'introduction des fibres de verre et métalliques dans les bétons élaborer, qui seront comparée à un béton témoins, l'ajout des fibres est motivé par l'amélioration des résistance en flexion des bétons réfractaires, donc l'enjeu du travail est double, de valorisé des déchets et rechercher le renforcement des béton avec des fibre afin d'améliorer leurs caractéristiques techniques.

### Abstract

This work study the of waste refractory that the industry of construction materials, so as refractory bricks and ceramic, which are nowadays not exploit referred enhancement is to develop refractory concrete at the base of aggregate waste refractory bricks, using a binder also classified as refractory, secondly it also seeks the introduction of glass and metal fibers in concrete development, which will be compared to a control concrete, adding fiber is motivated by improving the bending strength of refractory concretes, so the labor challenge is twofold, of upgraded waste and search for the reinforcement of concrete with fiber to improve their technical characteristics.

### ملخص

يتناول هذا العمل تثمين النفايات الحرارية من صناعة مواد البناء مثل: الأسمنت الطوب الحراري وبكرات من خزف، والتي في الوقت الحاضر لا استغلال المشار تعزيز هو وضع خرسانة مقاومة للحرارة في قاعدة تجميع الطوب صهر النفايات، وذلك باستخدام الموثق أيضا على أنها الحرارية، وثانيا أنها تسعى أيضا إدخال الزجاج والألياف المعدنية في التنمية الملموسة، والتي سيتم مقارنة مع الخرسانة السيطرة، والدافع وراء مضييفا الألياف عن طريق تحسين قوة الانحناء من الخرسانة المقاومة للحرارة، وبالتالي فإن التحدي العمل ذو شقين، النفايات ترقية والبحث عن تسليح الخرسانة، مع الألياف لتحسين خصائصها التقنية.

## **Introduction générale**

### **Introduction générale**

La dégradation en service des revêtements réfractaires génère des pertes énormes sur le plan économique et son impact environnemental est important. Ces pertes sont dues aux arrêts fréquents de la production et aux coûts liés aux opérations de remplacement des produits usés, qui ne sont pas pris en charge de point de vue valorisation et réutilisation.

Le projet que nous proposons consiste à étudier l'élaboration d'un béton à base des déchets réfractaires renforcé avec des fibres (fibre de verre et métallique), afin de conférer aux bétons une amélioration des résistances mécaniques en flexion, cela avec l'introduction des pourcentages différents de fibres dans les éprouvettes normalisées, aussi le paramètre de compacité maximale sera pris en charge lors de l'élaboration des bétons réfractaires en se basant sur des modèles assurant une compacité maximale existant dans la littérature.

Les déchets réfractaires en Algérie sont de plus en plus en croissance, vue le plan de charge qu'est en croissance en terme de construction de cimenteries et d'entreprises de production des produits céramiques, qui consomment des quantités importantes des produit réfractaires de différentes compositions minéralogiques issues de matières réfractaires.

Les déchets réfractaires utilisés dans ce travail, sont issus des déchets de briques réfractaires de la cimenterie de Sour El-Ghouzlane sise à Bouira, qu'est classée une unité importante en terme de production dans la région centre du pays. Les déchets seront préparés par opération de concassage et broyage, jusqu'à l'obtention de la granulométrie requise par apport au modèle théorique existant, qui donne une compacité maximale aux bétons. Ces déchets subiront des caractérisations physiques telle que ; l'analyse granulométrique et masse volumique ainsi que l'absorption vis-à-vis l'eau.

Ce mémoire se divise en quatre chapitres :

Le premier chapitre est une revue bibliographique sur les bétons ordinaires, et une présentation des différents classements selon les critères retenus, ainsi une présentation des propriétés physico-mécaniques des bétons à l'état frais et durci seront discutées.

Le deuxième chapitre, comportera une présentera les bétons réfractaires, leurs procédés de fabrication, puis une revue bibliographique sur les travaux de recherche mener sur la

## **Introduction générale**

possibilité d'utiliser les déchets réfractaires comme granulats, poudre comme ajout dans les bétons.

En chapitre trois, nous présenterons l'ensemble des travaux menés, sur les fibres dans les bétons, leurs effets sur le comportement des bétons ordinaires et réfractaires.

Le chapitre quatre, nous présentons l'ensemble des techniques expérimentales utilisées dans ce travail, à savoir le contrôle des constituants de bétons élaborés, les formulations des bétons réfractaires et leurs traitements thermique, et en fin on présentera l'ensemble des résultats physiques et mécaniques obtenus avec leurs interprétations.

A la fin, on termine avec une conclusion générale suivie de perspectives.

*Chapitre I :*  
*Les bétons*

## Chapitre I : Les Bétons

### Introduction

Le béton est composé des matériaux solides hétérogène et anisotrope constitués par l'association de ciment comme un liant hydraulique.

L'eau joue le rôle d'un fluidifiant, les granulats renforcent la structure, et plus souvent des adjuvants et des additions, qui sont des constituants non miscible, actifs ou inerte.



Figure I. 1 : Premier pont en béton de L. Vicat (1853)

### I.1. Les constituants de béton

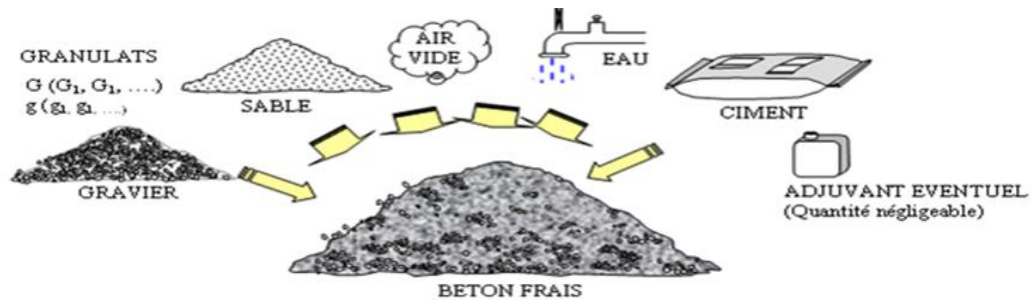


Figure I. 2 : Les composantes essentielles de béton

#### I.1.1. Le ciment

Liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Est une poudre minérale finement moulu qui mélangé avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit dans le temps, ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux.

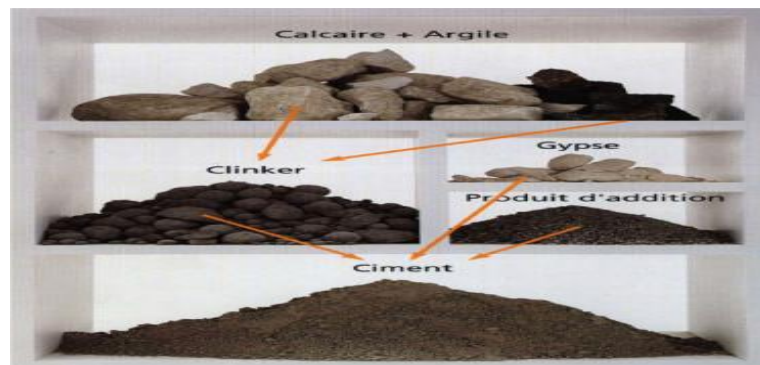
Le ciment est utilisé pour lier entre eux des matériaux inertes comme le sable et les gravillons pour la fabrication des mortiers et des bétons.

Il est composé de clinker (mélange calciné de 20% calcaire et 80% d'argile) associé à différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci (dans les travaux de Nguyen, 2007), cité par [1]. Tel que le laitier de haut

fourneau, cendres volantes, calcaires, pouzzolane naturelle, fumées de silice, et des schistes calcinés. Le ciment joue le rôle de liant et un remplissage des vides à l'aide 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 de l'empilement des agrégats (sable, graviers), ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités rhéologiques. 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 (les travaux d'Aïtcin, 2001) cité par [1]. D'un autre côté, les additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques chose confirmée dans les travaux de (Lapointe, 1997) cité par [1].

Plusieurs types de ciment sont à distinguer, suivant la proportion de ces éléments : ciment portland (CPA), ciment portland composé (CPJ); le ciment de haut fourneau (CHF-CLK); le ciment pouzzolanique (CPZ); ciment au laitier ou aux cendres (CLC), Le ciment alumineux (CA).



**Figure I. 3 :** La matière première utilisée pour la fabrication de ciment.

### I.1.2.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 facilitant ainsi son écoulement et son moulage, et une fonction chimique qui contribue au développement des réactions d'hydratation [1].

La normalisation Française publiée en août 1999, la norme XP P 18-303 qui remplace la norme homologuée NF P 18-303, de mai 1941. Sous le titre : l'eau de gâchage pour le béton,

La qualité de l'eau de gâchage peut influencer les délais de prise, le développement des résistances du béton et la protection des armatures contre la corrosion.

En général, l'aptitude à l'emploi de l'eau pour la production de béton dépend de son origine. Les types suivants peuvent être distingués :

- \*L'eau potable conforme à la Directive européenne DI 75/440/CEE convient d'une manière générale et ne nécessite aucun essai ;

- \*L'eau de lavage provenant des installations de recyclage des industries du béton convient si elle satisfait à l'exigence de l'Annexe A, XP P 18-303,

- \*Les eaux provenant de la nappe phréatique, les eaux de ruissellement et les eaux de rejet industrielles conviennent si elles satisfont aux exigences de l'Annexe A, XP P 18-303,

- \*L'eau de mer ou les eaux saumâtres peuvent être utilisées pour la production de béton non armé avec les précautions nécessaires, mais ne peuvent être utilisées pour la production de béton armé ou précontraint ; pour le béton contenant des armatures en acier, la teneur totale tolérée en chlorures est le facteur déterminant [2].

Il est impératif de respecter cette proportion d'eaux car trop d'eaux existe est chacun a sa composition minéralogique et chimique qui peut augmenter la porosité du béton et modifie donc ses propriétés mécaniques et sa durabilité.

### **I.1.3. Les granulats**

On appelle granulats les matériaux inertes, sable graviers ou cailloux, c'est l'ensemble des grains compris entre 0-125mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage, en termes de dureté en a les granulats courants, lourds, légers et les granulats très durs, c'est matériaux sont quelquefois appelés « agrégats » en effet le dictionnaire donne la définition suivante : « Matériau grenu d'origine minérale, calibré, destiné à être utilisé avec ou sans liant ».

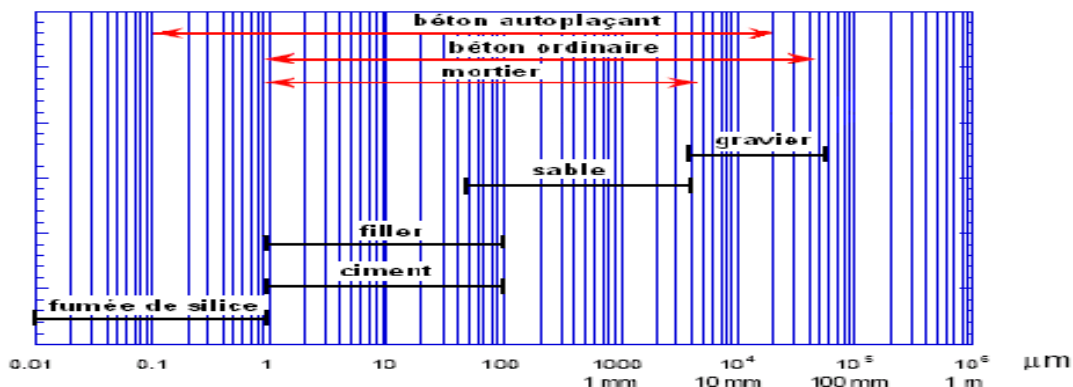
La spécification auxquelles doivent satisfaire les granulats sont précisées dans la nouvelle norme XP P18-540 d'octobre 1997, cette norme regroupe les caractéristiques que doivent présenter en général granulats destinés aussi bien à la confection de béton hydraulique, les granulats sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacun d'elles.

- \* La catégorie A correspond aux granulats destinés à la confection de béton tel que la résistance Caractéristique  $R_c$  est supérieure ou égale à 35 MPa, éventuellement certaines caractéristiques des catégories B ou C étant acceptées.

\* La catégorie B destinés à de bons bétons ainsi qu'à ceux pouvant être situés dans un environnement agressif (3-4<sub>b</sub> et 5<sub>c</sub>), à la condition que leur coefficient d'absorption respecte les spécifications aux granulats de catégorie A.

\* Les catégories C et D conviennent pour les bétons courants à la condition, dans le cas d'utilisation de granulats D, que seules deux de leurs caractéristiques soient présentes et que les autres correspondent à celles de catégories supérieures, faute de quoi ils ne doivent pas être utilisés dans la confection de bétons courants [3].

Les granulats sont essentiels puis que 'ils représentent 2 /3du volume de béton, ils sont classés selon une granulométrie constituée par l'échelonnement des dimensions des grains en fines, sable gravillons, cailloux



**Figure I. 4:** Étendue de la taille des grains des composants granulaires et de la matrice cimentaire.

### I.1.4 Les adjuvants

Produit chimique incorporé à faible dose (<5% du poids de ciment) [3]. Dans un béton ou un mortier lors du malaxage, afin de modifier certaines de ses propriétés ou de leur comportement.

La plupart des adjuvant présentée sous forme liquide les autres sons de forme poudre afin de réduire leur cout de transport dans ce cas il faut les diluer avant l'emploi, 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'adjuvant qui sont gérés par la norme NF EN 934-1 Février (2006) « Adjuvants pour béton, mortier et coulis ».

Les normes européennes retiennent la classification suivante

- \* Plastifiants réducteurs d'eau
- \* Superplastifiants hautement réducteur d'eau
- \* Rétenteurs d'eau
- \* Entraîneurs d'air
- \* Accélérateurs de prise
- \* Accélérateurs de durcissement
- \* Retardateurs de prise
- \* Hydrofuges.

Certaines adjuvants peuvent avoir plusieurs fonctions principales et secondaires. Un superplastifiant hautement réducteur d'eau.

Une quantité supérieure à celle des normes développée a un effet secondaire néfaste pour le béton.

Un adjuvant n'est pas un palliatif, il n'a ni pour mission ni pour effet de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre défectueuse. Ce n'est pas un produit capable de se substituer aux règles de la bonne technique.

### I.2. Les Propriétés de bétons frais et durcis

Comme la qualité de la matière première dans le dosage est importante, ainsi que la méthode de la formulation de béton, après le dosage, les constituants sont versés dans un malaxeur ou bien dans une bétonnière et mélangés. Les granulats sont d'abord introduits, suivis par les pulvérulents (ciment et l'addition) et en dernier l'eau et l'adjuvant.

L'objectif du malaxage suivant les normes est d'obtenir un mélange le plus homogène possible, la répartition homogène s'accompagne d'une structure optimale, les petits grains s'empilent dans les vides des plus gros grains et le ciment entre en contact avec l'eau la pâte enrobe les granulats. L'homogénéité du béton est un objectif primordial du malaxage [1].

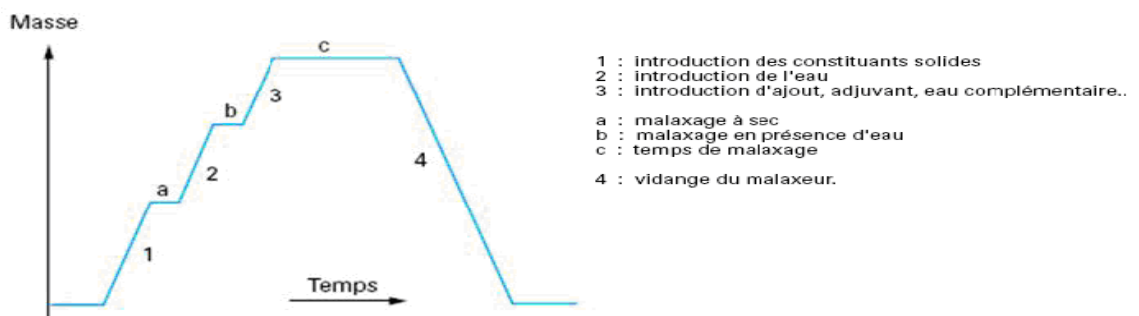


Figure I. 5: Cycle de malaxage [Ngoc-Dong, 2007] cité par [1].

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés à l'état frais et à l'état durci

### **I.2.1. Les propriétés de béton frais**

Deux façons de caractériser le béton à l'état frais sont abordées : l'ouvrabilité et les paramètres rhéologiques

#### **I.2.1.a. L'ouvrabilité**

Dreux et Festa (1998) écrivent que « l'ouvrabilité du béton peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage du ferrailage ».

L'ouvrabilité est également désignée sous les termes de maniabilité ou consistance du mélange, une bonne ouvrabilité est un gage de sécurité pour la structure en construction.

Elles sont principalement influencées par :

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

Le rôle de l'eau est prépondérant pour l'ouvrabilité du béton frais et sur les propriétés du béton durci.

L'eau donne au béton sa maniabilité, d'une part par son action lubrifiante sur les différents grains, d'autre part par la cohésion due à la pâte provoquée par l'association des grains fins (ciment et fines) avec elle.

L'eau permet l'hydratation du ciment et donc le durcissement du béton, toute variation de la quantité d'eau entraîne des modifications de la vitesse de durcissement et des performances mécaniques.

Le dosage en eau ne peut pas être augmenté au-delà d'une certaine valeur afin d'améliorer l'ouvrabilité sans entraîner des inconvénients. Les conséquences d'un excès d'eau sont :

- \* Risque de ressuage
- \* Augmentation du retrait
- \* Augmentation de la porosité
- \* Risque de la ségrégation des constituants du béton
- \* Diminution de la compacité et corrélativement des résistances
- \* Défectuosité du parement : bullage

Ils existent de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaine caractéristique de l'ouvrabilité. En bas quelques-uns qui sont plus couramment utilisés dans la pratique [1].

**Tableau I. 1:** Les essais effectués sur un béton frais.

Essai	Principe	Paramètre mesuré	Plages recommandées de mesures	Commentaires
Essai d'affaissement NF p 18-451 EN12350-2 P18-325(EN206) XP P18-305	Moulage d'un tronc de cône de dimensions normalisés et mesure de son affaissement après démoulage	Affaissement (s)	$10 \leq S \leq 160$ P18-325(EN206) S1 : ferme 10-40 mm S2 : plastique 50-90 S3 : Très plastique 100-150 S4 : fluide $\geq 160$	Mal adapté au béton ferme ou fluide $D_{max} < 40\text{mm}$ Respectabilité juste suffisante
Essai d'étalement EN12350-5	Démoulage d'un cône sur une table à chocs manuels et mesure de l'étalement	Diamètre de l'écoulement (f)	$340 \leq F \leq 630$ F1 $\leq 340$ F2 350-410 F3 420-480 F4 490-550 F5 560-620 F6 $\geq 630$	Mal adapté au béton ferme ou fluide $D_{max} < 40\text{mm}$ Respectabilité juste suffisante
Essai vébé EN12350-3 P 18-429	Mesure de temps mis par un cône de béton frais pour se remouler dans un moule cylindrique sous l'action d'une vibration	Durée(t)	$5s \leq t \leq 30s$	Mal adapté au béton ferme ou fluide $D_{max} < 40\text{mm}$
Essai d'écoulement (maniabilimètre) NF P18-452	Mesure de temps d'écoulement sous vibration	Durée (t)	$4s \leq t \leq 30s$	non adapté au béton fluide $D_{max} < 40\text{mm}$ Bonne Respectabilité
test C.E.S Dreux.G	Remplissage de béton dans un moule muni d'un quadrillage d'armature distant d'une plaque transparente .mesure de	Chocs(N)		Pe utilisé sauf au centre d'essai des structures(CSTB )

	nombre de chocs nécessaires à recouvrir la vitre			
Plasticimètre à rotations	Évaluation de la résistance au cisaillement d'un béton par la mesure d'un couple Mesure la plasticité	viscosité		Utilisé dans n'importe quel état (bétonnière brouette, couffrage) Un bon indicateur de dosage en eau
Wattmètre	Appréciation de la consistance par enregistrement de la puissance absorbée du malaxeur	Puissance (watt)		Sur certaines installations industrielles
BT rhéomètre LCPC (F.de larrard)	Cisaillements d'un échantillon de béton pour diverses vitesses de rotation, sous l'action d'une vibration ou non .contrôle de l'essai et exploitation des mesures via une centrale d'acquisition	Seuil de cisaillement et viscosité		Bien adapté au béton fluide $D_{max} < 40mm$ présente des valeurs caractéristiques du seuil de cisaillement qui permet le contrôle de l'affaissement au cône d'Abrams
Degré de compactabilité EN12350-4	Evaluation de degré de compactabilité exprimé par le rapport entre le volume de béton avant et après compactage	Taux(C) $C = h_1 / (h_1 - S)$ $h_1 = 400mm$	$C \geq 1,11$	Mal adapté aux bétons fluides $D_{max} < 40mm$

**La rhéologie de béton frais**

De Larrard et col (1993), citer par [1] a développé un rhéomètre à béton, le « BTRHEOM », pour l'analyse du béton frais, il s'agit d'étudier la relation entre la contrainte de cisaillement et la déformation dans un milieu homogène et continu. Selon de Larrard, le béton frais est un matériau intermédiaire entre un fluide et un empilement humide de particules.

Hu (1995), cité par [1] a montré que pour les bétons dont l'affaissement est inférieur à 10 cm, la caractérisation rhéologique n'a pas de sens, parce que lorsqu'ils sont cisailés le béton présente une dilatance importante et perd leur homogénéité, ces bétons contiennent alors un volume d'air piégé non négligeable (5-30%, béton très ferme).

Pour des affaissements supérieurs à 10 cm et si les conditions de stabilité (absence de ségrégation) sont respectées, le béton frais peut être assimilé à un fluide de type Herschel-Bulkley dont la loi fondamentale gouvernant le comportement rhéologique est décrite dans la référence de Larrard (2000) cité par [1], par :

$$\zeta = \tau_0 + a \cdot \dot{\gamma}^b \dots\dots\dots (1.1)$$

Où

$\zeta$  contrainte de cisaillement (Pa)

$\tau_0$  seuil de cisaillement (Pa)

$\dot{\gamma}$  vitesse de cisaillement en (s<sup>-1</sup>)

$b, a$ , deux constantes physiques du modèle

Les auteurs proposent dans la référence de Larrard (2000) de calculer dans un premier temps la valeur du seuil à l'aide de l'équation (1-1), puis, une fois celui-ci fixé, de déterminer la valeur de la viscosité plastique à l'aide de l'équation (1-2) :

$$\zeta = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \dots\dots\dots (1.2)$$

$\zeta$  Contrainte de cisaillement (Pa)

$\tau_0$  seuil de cisaillement (Pa)

$\mu$  viscosité plastique (Pa.s)

$\dot{\gamma}$  vitesse de cisaillement en (s<sup>-1</sup>)

Du point de vue physique, le seuil de cisaillement est défini comme la somme macroscopique de frottements internes des grains solides. Il dépend directement du nombre et de la nature des contacts entre les grains et donc de la compacité du squelette granulaire (pour cela elle est préférable d'utiliser des granulats ronds à cause de faible surface de contact entre eux) [1].

### **I.2.2. Les propriétés de béton durci**

Le béton est un solide hétérogène, ces particules interne est toujours en mouvement à l'échelle macroscopique, qui causent des réactions non visibles à l'intérieure du béton, qui sont soit chimique par la réaction de béton lui-même (l'hydratation de ciment (C-H et C-S-H) ou les attaques externes qui produit le développement de la microstructure ou micro fissures qu'est un phénomène physique.

La dégradation du béton dépend de :

- \* De la pâte liante,
- \* Des granulats,
- \* De l'adhérence pâte-granulats.

Ces propriétés à l'état durci influencent la résistance du béton soit à la compression, à la traction ou la flexion.

#### **I.2.2.a. La résistance du béton**

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations appliquées (physiques, mécaniques, chimiques...).

Le béton doit résister aux charges auxquelles il est soumis, ainsi son environnement, tout en conservant son aspect esthétique durant son cycle de vie.

La résistance d'un ouvrage dépend des paramètres suivants :

- \* La résistance des gros granulats,
- \* L'adhérence entre les granulats et la pâte de ciment,
- \* La forme des granulats.

#### **I.2.2.b. La durabilité du béton**

Aussi l'ouvrage doit être durable dans le temps, qu'est la capacité à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers), et à maintenir son niveau de fiabilité, avec des coûts de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible (sous réserve de la mise en œuvre d'une maintenance préventive programmée).

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont :

- \*La qualité de sa conception ;
- \*La qualité des matériaux et des produits utilisés ;

\*La qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et de la mise en œuvre des produits ;

\*Des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance [3].

### **I.3.Les bétons spéciaux**

Le béton ordinaire est connu par leurs limites techniques, ce qu'est permis le développement de nouveau bétons afin d'apporter des solutions aux problèmes posés par les ingénieurs en matériaux.

La dernière décennie a connu le développement de nouveau béton à savoir, les bétons auto-plaçant, auto-nivelant et les bétons de hautes performances.

#### **I.3.1.Béton à hautes performances (BHP) 1970\_1980**

L'additif au fascicule 65 A définit les « bétons à haut performance » BHP comme présentant une résistance caractéristique à la compression à 28 jours ( $f_c28$ ) supérieure à 50MPa et un rapport pondéral E/C inférieure à 0.4 [3].

Les bétons à hautes performances possèdent des caractéristiques physiques (résistance, durabilité, rhéologie, etc.) supérieures à celles des bétons ordinaires. BHP peuvent nécessiter des techniques spéciales de production, de manutention et de mise en place.

##### **I.3.1.a.Formulation de BHP**

- L'emploi de ciment de classe élevée (52,5 MPa ou 52.5R) à des dosages généralement compris entre 400 et 450 Kg/m<sup>3</sup> ;
- Granulats de très bonne qualité, et l'emploi des adjuvants spécifiques « superplastifiant – réducteur d'eau » ainsi que des fumés de silice pour une meilleure compacité ce qui suit par un rapport E/C tombé à des valeurs près de 0.25 ;
- La proportion de fumée de silice est de l'ordre de 5 à 10% du poids de ciment, dans certain document il est précisé que la quantité max de fumée de silice ne doit pas dépasser le rapport fumé de silice/ciment  $\leq 0,11$  ;
- Suivant au fascicule 65A, la durée de malaxage doit être prolongée à celle des bétons courants [3]
- Avoir une granulométrie continue, le Mf pour le sable entre 2.7-3, la dimension des gros granulats varie entre 10-14-20 cm ;
- Ces bétons possèdent un rapport eau/liants entre 0,20 et 0,45. Des superplastifiants sont généralement utilisés pour produire des bétons fluides et maniables [4]

**Tableau I. 2 :** Formulation de bétons à hautes performances typiques utilisés en structure [4]

Identification du mélange	1	2	3	4	5	6
Eau (kg/m <sup>3</sup> )	151	145	135	145	130	130
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	311	398	500	335	513	315
Cendres volantes (kg/m <sup>3</sup> )	31	45	–	–	–	40
Laitier (kg/m <sup>3</sup> )	47	–	–	125	–	–
Fumée de silice (kg/m <sup>3</sup> )	16	32	30	40	43	23
Rapport eau/liants	0.37	0.30	0.27	0.29	0.25	1.34
Réducteur d'eau (L/m <sup>3</sup> )	1.6	1.7	–	1.0	–	1.5
Retardateur (L/m <sup>3</sup> )	–	–	1.8	–	–	–
Teneur en air (%)	7 ± 1,5	5-8	–	–	–	5.5
Réducteur d'eau de haute efficacité ou superplastifiant (L/m <sup>3</sup> )	2,1	3	14	6.5	15.7	5.0
Gros granulat (kg/m <sup>3</sup> )	1068	1030	1100	1130	1080	1140
Sable (kg/m <sup>3</sup> )	676	705	700	695	685	710
Résistance en compression à 28 jours (MPa)	59	–	93	99	119	–
Résistance en compression à 91 jours (MPa)	–	60	107	104	145	N/A

1. Wacker Drive, route à deux étages, Chicago, 2001.
2. Pont de la Confédération, Détroit de Northumberland, île du Prince Édouard/Nouveau Brunswick, 1997.
3. Bâtiment La Laurentienne, Montréal, 1984.
4. Place BCE, Phase 2, Toronto, 1993.
5. Deux Union Square, Seattle, 1988.
6. Great Belt Link, East Bridge, Danemark, 1996.

### **I.3.1.b. Caractéristiques de BHP**

- \* La facilité de mis en place (maniabilité) ;
- \* Résistance en jeune âge (exp  $R_{C24h}$ : 23,9MPa\_  $R_{C28j}$ :40.7MPa,  $R_{F24H}$ :4,2 MPa\_  $R_{F28j}$ :5.7MPa ;
- \* Résistance en long terme (la durabilité) ;
- \* Béton à haute résistance (exp  $R_{C3j}$  43-72MPa,  $R_{C28j}$  79-117MPa,  $R_{C1085j}$  115-150MPa) ;

\* Grâce à sa résistance, sa grande compacité, sa faible perméabilité et son faible rapport eau/liants, le BHP résiste aux attaques des sulfates à la pénétration des chlorures ainsi qu'au cycle gel dégel et à l'abrasion ;

\* Les BHP possèdent une très bonne résistance à la carbonatation en raison de leur faible perméabilité. Il a été déterminé qu'après 17 années d'exposition, le béton de la tour du CN à Toronto s'est carbonaté sur une épaisseur moyenne de 6 mm (Bickley, Sarkar et Langlois 1992). ) ;

\* Les bétons à hautes performances possèdent des caractéristiques physiques (résistance, durabilité, rhéologie, etc.) supérieures à celles des bétons ordinaires ;

\* Haut module d'élasticité ;

\* Stabilité volumétrique ;

\* Consolidation sans ségrégation [4].

BHP ont surtout été utilisés pour la construction de tunnels, de ponts et d'édifices en hauteur, aussi été utilisés dans les réparations en béton projeté, dans les poteaux, dans les stationnements multi étagés et pour des applications agricoles. En raison de leurs propriétés mécaniques, leur durabilité et leur module d'élasticité élevé.

Note : l'objectif visé pour le BHP et la durabilité la résistance élevée est une conséquence secondaire.

### **I.3.2. Le béton ultra haut performance (BUHP)**

A côté de BHP, le BUHP sont apparus dans ces dernier année, Dont la composition comporte un fort dosage en liant La résistance à la compression du béton à ultra-hautes performances peut dépasser 150 N/mm<sup>2</sup> (MPa), soit trois à cinq fois celle d'un béton ordinaire. Par ailleurs, ce type de béton dispose d'une microstructure très dense et d'une faible porosité, ce qui lui permet de combiner des performances mécaniques extrêmes avec une durée de vie exceptionnelle [5,3].

#### **I.3.2.a. Formulation de BUHP**

\* Le temps de prise du béton est d'environ 15 à 16 heures, le démoulage pouvant être fait au bout de 24 heures et la stabilité dimensionnelle du produit étant atteinte à 3 jours ;

\* L'absence du gros élément dans leur composition ;

\* Un fort dosage en liant.

### I.3.2.b. Caractéristiques de BUHP

\* L'interprétation des résultats d'essais accélérés de carbonatation nous indique que, si la durée de vie attendue pour un béton C 30/37 (avec un enrobage des armatures de 40 mm) est de 50 ans, celle d'un BUHP est supérieure à 200 ans [5.3].

\* En raison des matières premières spécifiques et de la teneur élevée en ciment, le BUHP coûte jusqu'à trois fois plus cher qu'un béton C 30/37. Ce surcoût peut néanmoins être compensé par les excellentes performances fournies ;

\* Résistance à la compression comprise entre 150-230 MPa et pouvant atteindre avec des fibres métalliques et traitement thermique, un maximum de 300 MPa, avec des fibres organiques elle peut atteindre 200 MPa ;

\* Résistance à la traction entre 5-8 MPa ;

\* Résistance à la flexion pour des bétons comportant des fibres métalliques entre 20 à 40 MPa ;

\* Porosité à l'eau 2 à 10 fois inférieure à celle d'un béton classique et de 2 à 8 fois inférieure à celle BHP, ce que se traduit par une meilleure résistance à la corrosion et à l'attaque sulfatique, ainsi qu'à l'abrasion ;

\* Résistance au cycle gel dégel, le module d'Young résiduel après 300 cycles étant de 100 %, mais avec un béton classique avec entraîneur d'air diminué de 50% ;

\* Durabilité excellente en raison de la microstructure fermée du matériau [3].

A l'heure actuelle, les principales réalisations dont nous avons connaissance se trouvent à l'étranger. La France est l'un des leaders dans le domaine, surtout en ce qui concerne l'application de BUHP brevetés. La réalisation du nouveau dôme du stade Jean Bouin, à Paris, est un exemple de projet extraordinaire en cours. Quant à l'Allemagne, elle a encore quelques projets en préparation : la passerelle piétonne de Séoul d'une épaisseur de 30mm sur 120m de portée, les coques minces de la gare de Shawnessy à Caligari au Canada.

Le BUHP peut également être utilisé pour la réalisation de ponts très élancés. En raison de sa durabilité élevée, ce type de béton se prête parfaitement aux travaux de génie civil, pour lesquels la durée de vie et l'entretien sont des paramètres importants [3,5].



**Figure I. 6** : Les coques en BUHP de la gare de Shawnessy.

### **I.3.3. Le béton auto plaçant BAP**

Cette technologie, mise au point au Japon à la fin des années 1980 C'est un béton qui s'écoule et se compacte par seul effet gravitaire, capable de remplir entièrement le coffrage avec son ferrailage, tout en conservant son homogénéité.

Les BAP doivent présenter, une grande fluidité et pouvoir s'écouler avec un débit suffisant sans apport d'énergie externe (vibration) à travers des zones confinées (armatures) en présence d'obstacle ou se mettre en place dans des coffrages de grande hauteur.

Ils doivent s'opposer à la ségrégation « dynamique » (en phase de coulage) et à la ségrégation « statique » (une fois en place) afin de garantir l'homogénéité des caractéristiques et de ne pas présenter de ressuage ou de tassement, ils doivent aussi être pompée.

#### **I.3.3.a. Formulation du BAP**

Différente technique de composition se sont développées ces dernières années pour la formulation des BAP. Parmi ses techniques de formulation ont cité

- \*La méthode basée sur l'optimisation des mortiers
- \*La méthode basée sur l'optimisation des squelettes granulaires
- \*La méthode basée sur l'optimisation de la pate
- \*La méthode chinoise

Mais quel que soit la méthode adopté la composition de BAP basé sur :

- ∴ Un volume de la pâte élevée (30 à 40%) du volume total du BAP
- ∴ Un dosage en liant (c+ additions) variant de 385 à 635kg/m<sup>3</sup>
- ∴ Un rapport  $E/L \leq 0.48$  en poids du BAP et un dosage en eau limité

∴ Un faible volume de gravillon (28à 38%) du volume total du BAP, afin d'évité le blocage dans les zones confinées ( $G/S \leq 1$ )  $D_{max}$  entre 10-16 mm

∴.Éventuellement un agent entraîneur d'air pour assurer la protection contre les effets de gel dégel

∴.Des superplastifiants pour obtenir la fluidité souhaitée et quelque fois des agents de viscosité pour maîtriser la ségrégation et le ressuage et le dosage près à la saturation

∴.Une quantité élevée des fines (ciment, fillers calcaires, cendres volantes) près de  $500\text{Kg/m}^3$  ;

∴.La masse de ciment entre  $300$  à  $350\text{kg/m}^3$  (la norme p18 305) en complètent le dosage par l'addition se situe entre  $120$  et  $200\text{ kg /m}^3$  [3].

### I.3.3.b.Caractéristique du BAP

\* La mobilité en milieu confiné : l'écoulement sans vibration dans le coffrage de grande hauteur et dans les tuyaux de pompage ;

\* La mobilité en milieu non confiné : l'écoulement dans les dalles horizontale (armés ou non) ;

\* La stabilité en repos à l'état frais conditionnant la non ségrégation dans les phases précédant la prise et le durcissement ;

\* L'étalement au cône d'abrams à des valeurs cible de l'ordre de  $600$  à  $750$  classe SF2 (Slump-flow test EN12350\_8) ;

\* La vitesse d'étalement ( $t_{500}$ ) en seconde près de  $0.5\text{s}$ .



**Figure I. 7** : un béton auto plaçant lors de collage.

### I.3.4.Le béton de sable

Est un mélange à fin constitué par un mélange de sable, de ciment, d'addition et d'eau ; et éventuellement des adjuvants. Pour répondre aux besoins de certains usages, des ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, colorants.

### I.3.4.a. Formulation de béton de sable NF P 18-500 de juin 1995

- \* Le rapport G/S est inférieur à 0.7 ;
- \*  $D_{\max}$  de gros grain est inférieur ou égal à 4 mm mais on peut admettre des granulats avec une granulométrie continue de 0 à 8 mm ;
- \* La formule de Caquot est adoptée car elle donne la porosité minimale théorique de béton :  $(e+v)_{\min} = 0.8 (d/D)^{0.2}$ , e : volume d'eau, v : volume piégé, d/D l'étendu granulaire
- \* Pour assurer une résistance au béton le dosage en ciment :  $C = 550 / \sqrt[5]{D}$  ou  $C = 700 / \sqrt[5]{D}$  ;
- \* Lorsque la valeur de  $D \leq 6 \text{ mm}$  le dosage en ciment devient très élevé ( $> 400 \text{ kg/m}^3$ ) ;
- \* En comble les vides de sable par les fillers et on assure ensuite la rigidité du mélange par le ciment ;
- \* Le dosage en fines d'addition seront souvent importante : entre 70 et 220  $\text{kg/m}^3$  ;

### I.3.4.2. Caractéristique de béton de sable

- \* La différence entre un béton de sable et un béton classique réside dans la granulométrie
- \* La méthode de formulation basée sur deux approches, théorique (une base de formulation de BS) ; expérimentale (la réalisation de plusieurs gâchés successives).
- \* Le problème de formulation s'articule sur l'optimisation de la compacité du squelette granulaire (volume développé par les constituants solides / volume total)
- \* L'approche de GUINÉS 1984, l'étude menée sur un sable alluvionnaire 0/3, basée sur l'augmentation de la compacité par l'adjonction d'un filler, l'objectif recherché c'est la compacité maximale la résistance à la compression voisine de celle des briques parpaings (autour de 8 MPa).



**Figure I. 8** : Le premier ouvrage en béton de sable, Le phare de Port-Saïd aux environs de 1869 construit par François Coignet.

***Chapitre II :***  
***Le béton***  
***Réfractaire***

### II.Introduction

Les réfractaires sont des matériaux de structure, consommables, travaillant à hautes températures dans un environnement sévère, qu'il s'agisse de la corrosion par les métaux fondus en sidérurgie ou par une atmosphère agressive chlorée dans les incinérateurs. Sans ces matériaux de grande diffusion, notre vie quotidienne serait sans aucun doute beaucoup moins agréable. En effet, nous ne disposerions pas d'acier, de fonte, d'alliages métalliques, de verre, de céramiques, de ciment ou de cracking de pétrole... à un prix raisonnable.

L'amélioration de la performance des réfractaires a un impact important sur la productivité des industries utilisatrices (les pertes thermique), la sécurité du personnel et sur l'environnement (les réfractaires consommés sont difficilement recyclables), le coût direct de la consommation des réfractaires est très élevé. Par exemple, ils représentent plus de dix pour cent des coûts de transformation d'une aciérie

Alors le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement.

### II.1.Généralité

Le terme réfractaire est d'origine français recensé en 1539 par Robert Estienne, dans son dictionnaire latino-gallicum, étymologiquement il provient du latin d'égglise réfractaires, querelleur et signifie indocile. La racine latine est portée par le verbe réfrigère dont le premier sens est brisé, abatte une cloison, le second sens est déjà relatif à la déviation des rayons lumineux entrant dans l'eau ou dans une substance vitreuse [6,9].

Dans d'autre référence c'est la résistance, et de refuser d'obéir ou de se soumettre, dans la métallurgie se dit au 'acier ou un alliage résistant à haute température soit à la corrosion aux divers milieux, soit aux sollicitations mécaniques. Thermiquement dit aux matériaux qui résistent à la chaleur, qui ne font qu'à de très hautes températures.

### II.2.Définitions selon les Normes

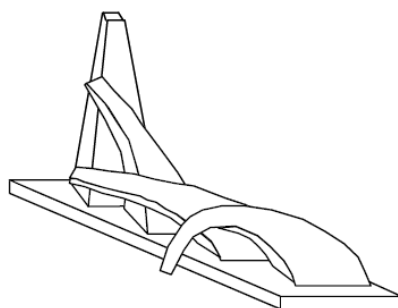
Selon La norme ISO-1927 de 1984 ne stipule que « les matériaux réfractaires sont des matières et produits autres que les métaux et alliages (mais n'excluant pas ceux contenant un constituant métallique), considéré comme réfractaire dès l'instant où sa résistance pyroscopique est équivalente à 1 500°C minimum ». En d'autres termes, le matériau doit conserver ses propriétés physiques et ne doit ni se ramollir, ni s'affaisser sous son propre poids avant la température de 1 500°C.

## Chapitre II : Le Béton Réfractaire

---

La norme B40-001 de novembre 1966 (AFNOR) définit aussi les réfractaires, comme une substance ou un mélange de substance soit naturel ou artificiel est considéré comme réfractaire lorsque sa résistance pyroscopique définie et déterminée suivant la norme correspondante est supérieure à la température de 1500°C, par ailleurs la norme industrielle Japonaise n'accorde pas de restrictions à la nature chimique des matériaux réfractaires, seulement la réfractarité ou la résistance pyroscopique doit dépasser 1580°C [11].

La détermination de la résistance pyroscopique ou la réfractarité se fait par des essais normalisés (ISO ou AFNOR) en portant à température croissante des éprouvettes du matériau considéré et de comparer leur comportement avec des cônes ou montres pyroscopiques étalons [Harb 92]. La résistance pyroscopique du matériau correspond à la température où le cône est incliné en demi-cercle sur sa base comme l'indique la figure II.1 [11].

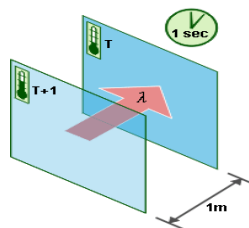


**Figure II. 1 :** Un cône pyroscopique étalonné incliné en demi-cercle. [11].

En plus de la résistance pyroscopique élevée, les réfractaires doivent avoir :

- Une bonne résistance aux chocs thermiques : (choc induit par des changements brutaux et rapide de température qui cause l'apparition de contraintes thermiques dans le réfractaire et par conséquent la propagation de ses microfissures), exemple : verser de l'acier fondu sur le béton.
- Une faible conductivité thermique :

La conductivité thermique ( $\lambda$ ) est une caractéristique propre à chaque matériau ; elle indique la quantité de chaleur qui se propage en 1 seconde, à travers 1 m<sup>2</sup> d'un matériau, épais d'un 1 m, comme l'illustre la figure (2.2), lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1 K (1 K = 1 °C). Plus la conductivité thermique est faible, plus le produit est isolant, qu'est mesurée en (W/mK).



**Figure II. 2:** Schéma montrée le principe de la conductivité thermique d'un matériau.

- Une bonne résistance à la corrosion (aciéries, four de verrerie ...) et à l'érosion à hautes températures [7, 6]. Les réfractaires sont général préparés par des oxydes, ce qui leurs confèrent une grande stabilité envers l'oxydation et par conséquent une forte inertie chimique [11].

### II.3. Les domaines d'utilisation des matériaux réfractaire

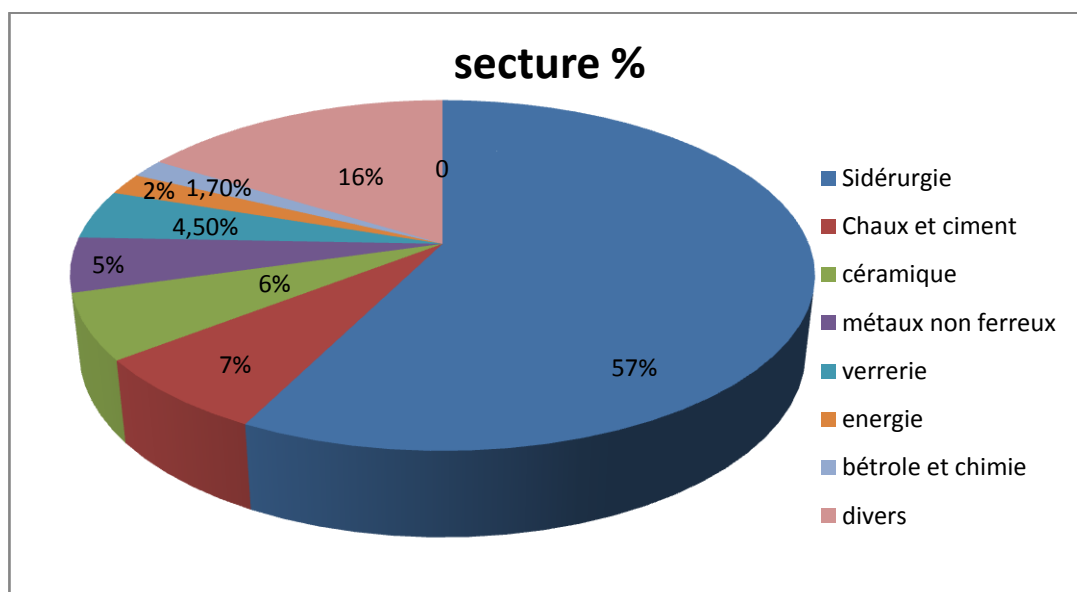
Un matériau réfractaire est un produit qui conserve ses caractéristiques physico-chimiques sous hautes températures, la fusion du matériau n'apparaissant qu'au-delà des conditions d'emploi.

Sont essentiellement utilisés dans les « industries du feu » : fonderie, fabrication des métaux non-ferreux, du ciment, du verre et des céramiques. Ils sont également présents dans des domaines comme la pétrochimie, la chimie, l'industrie de l'incinération des déchets et la production d'énergie [8], l'importance stratégique de ces matériaux est considérable, ils répondent à une réelle demande de quatre secteurs économiques importants, Ils ont utilisé dans plusieurs domaines entre autres :

- 1) Les secteurs traditionnels des hautes températures, tels que la métallurgie, la sidérurgie, l'industrie du verre, de la céramique et des matières premières qui visent en permanence une amélioration de leurs procédés d'élaboration et de leur rendement énergétique.
- 2) L'environnement et plus particulièrement le domaine de traitements et la valorisation énergétique des déchets (incinération).
- 3) La pétrochimie et le secteur émergent des biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération par la voie thermochimique.
- 4) L'énergie : les nouvelles filières de production d'énergie, de chaleur et d'électricité, telles que la production d'hydrogène ou les nouvelles générations des centrales nucléaires (EPR, génération IV) nécessitent la conception de revêtements réfractaires adaptés [9].
- 5) Pour les navettes spatiales : exemple la protection thermique des navettes, qui doivent résister à des températures supérieures à +1650°C, lorsqu'elles seront en orbite, ainsi que

## Chapitre II : Le Béton Réfractaire

les matériaux utiliser doit résister au grand froid de l'espace avec variation de température -121°Jusqu'a +167°C.



**Figure II. 3:** Principaux domaines d'utilisation des produits réfractaires et consommation annuelle en Europe de l'ouest en 2002[8].

### II.4.La classification des matériaux réfractaires

Quatre grands modes permettent une présentation rapide d'un produit réfractaire sont

- Nature chimique et minéralogique
- La masse spécifique et la compacité
- La technologie de fabrication
- La forme

#### II.4.1.Par la nature chimique et minéralogique

Il existe essentiellement trois grandes familles de réfractaires comme indiqué dans le tableau II.1suivant

**Tableau II. 1:** La classification de quel que granulats réfractaires selon sont nature chimique et minéralogique.

Les réfractaires	Agrégats naturels	Agrégats synthétique
<b>Les réfractaires acides</b> silice – aluminent $Al_2O_3$ - $SiO_2$	Bauxite-andalousite- argiles–pyrophyllites- silice vitreuse	Fritté-mullite fritté et électro fondue
<b>Les réfractaires basiques</b> $MgO$ - $CaO$ - $Cr_2O_3$ - $SiO_2$	Olivine-chromite	Magnésie électro fondue- dolomie frittée
<b>Les réfractaires spéciaux</b>	Graphite-sable de zircon	Carbure de silicium- zircon

## Chapitre II : Le Béton Réfractaire

En rencontre généralement ces réfractaire basique « la magnésie [MgO ou MgCO<sub>3</sub>], la dolomite [CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>], la chromite [RO-R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>] avec R : Mg<sup>+2</sup>; Fe<sup>+2</sup>, R<sub>2</sub>: Fe<sup>+3</sup>; Al<sup>+3</sup>; Cr<sup>+3</sup>,

Sous forme naturelle qui subit une décarbonatation à 900°C puis une calcination supérieure à 1700°C qui permet d'obtenir des matériaux frittés de densité élevée et de révéler leur réfractarité. La qualité du produit dépend du degré de frittage et de la teneur en impuretés (FeO<sub>3</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), en annonçant que la chromite peut utiliser du fait de la transformation sous certaine condition du Cr<sup>+3</sup> ou Cr<sup>+6</sup> concérigène [13].

**Tableau II. 2:** Quelques oxydes réfractaires et leur nature chimique

Nature	Oxydes
Acides	SiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .
Amphotères (neutres)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> .
Basiques	MgO, CaO.

**Remarque :**

La chromite est un réfractaire strictement neutre, mais souvent mis dans le groupe des réfractaires basiques puisqu'on la trouve presque toujours en combinaison avec la magnésie

### II.4.2. Par leur masse spécifique et leur compacité

On distingue les produits denses et les produits légers (donc thermiquement isolants).

- Les produits légers isolants : Sont de densité égale ou inférieure à 1000 Kg/m<sup>3</sup>, possèdent une porosité totale supérieure à 45% en volume. Utilisées pour isoler les briques et bétons denses dans les fours de fusion, et comme isolant de première couche des garnissages de fours de traitement thermique ou d'étuves et divers équipements de chauffe [12].
- Les produits denses : les briques de densité égale ou supérieure à 2000 Kg/m<sup>3</sup>. Elles sont utilisées pour le garnissage des fours de fusion ou les fours exposés à des risques mécaniques ou chimiques importants [12].

### II.4.3. Par leur technologie de fabrication

On distingue deux modes principaux de fabrication :

- la fusion des matières premières permettant de produire des blocs ou pièces réfractaires électro fondus.
- la transformation d'un produit pulvérulent constitué de particules non cohésives en un matériau consolidé. La cohésion du matériau réfractaire s'effectue par frittage ou par réaction chimique (à l'aide d'un liant organique, minéral ou hydraulique).

### II.4.4. Par la forme

Il existe les produits façonnés, les produits non-façonnés, les produits semi rigides.



Figure II. 4 : Des briques réfractaires

Figure II. 5: béton prêt à l'emploi dans un fût

- ✚ **Les produits façonnés** : se présentent sous la forme définitive dans laquelle ils seront mis en œuvre, il s'agit de briques ou de pièces de forme, de dimension et format divers.
- ✚ **Les produits non façonnés** : sont constitués de bétons, pisés, ciments, coulis et pâtes plastiques. Il s'agit en général de mélanges pulvérulents prêts ou non à l'emploi, livrés en sacs ou en fûts et qui nécessitent donc une mise en forme avant emploi.
- ✚ **Les produits semi-rigides** : forment une catégorie de produits façonnés à part, pouvant être « déformés » au cours de leur mise en œuvre : il s'agit en général de matériaux à base de fibres céramiques livrés sous forme de nappes, de plaques, de panneaux ou de cordons [9].

### II.5. Les bétons réfractaires

Dans le domaine des réfractaire, le terme monolithique englobe tous les matériaux qui ne sont pas mis en forme avant leur application et qui constituent une entité à eux seuls, par abus de langage, on confond souvent monolithique et béton [7].

Aujourd'hui, de plus en plus d'applications industrielles nécessitent des matériaux non façonnés (monolithique) et élaborés par d'autres méthodes. On observe alors un changement fondamental dans le domaine des réfractaires qui est le remplacement progressif de ces matériaux façonnés par des matériaux monolithiques

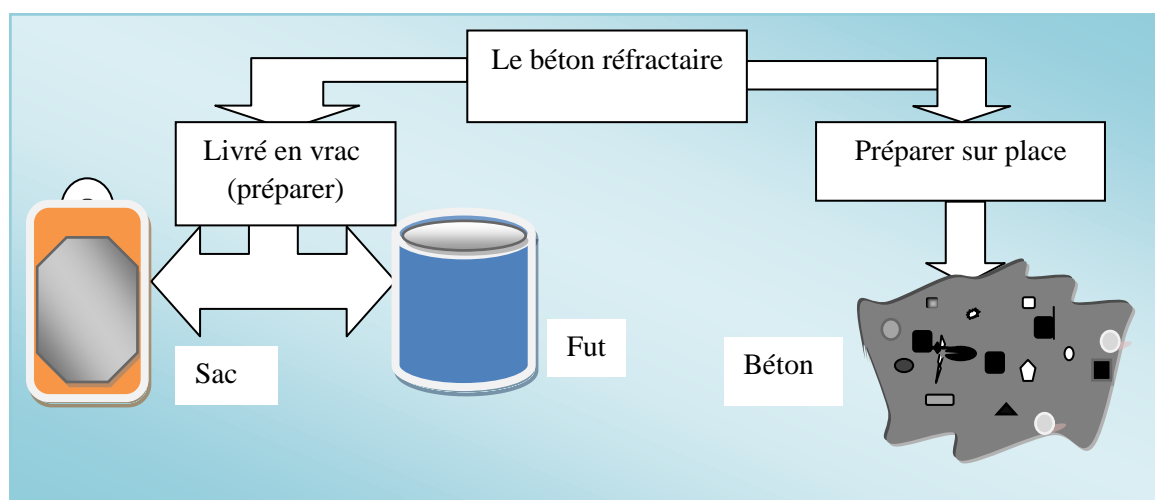


Figure II. 6 : Méthode de préparation des bétons réfractaires.

La classification des matériaux réfractaires non façonnés fait appel à :

- La classification, d'une part, en fonction de la nature chimique et minéralogique des constituants essentiels du mélange, d'autre part, en fonction de la nature du liant.
- La classification selon le type d'emploi et le mode de mise en œuvre :
  - ✚ Les matériaux non façonnés préparés : sont livrés en vrac contenant un ou plusieurs constituant réfractaire, peuvent être mise en œuvre directement sous forme d'un liquide (moulés) dans des futs ou dans des sac mise en place après l'addition d'un liquide.
  - ✚ Les matériaux non façonnés non préparé : préparer sur place, se compose de trois matériaux principaux ; des agrégats, une phase liante et la porosité.

Nous parlerons par la suite principalement des matériaux réfractaires non façonnés et n'est pas préparé, plus particulièrement des bétons réfractaires car ce sont les matériaux qui nous intéressent dans cette étude.

### II.5.1. Définition de béton réfractaire

Est un béton pouvant résister à des températures très élevées. Sa formulation fait appel à des ciments et des granulats réfractaires. Les granulats sont en général constitués par un ou plusieurs minéraux, essentiellement des oxydes, qui confèrent son caractère principal (caractère réfractaire et propriétés complémentaires) au produit fini. La matrice cimentaire est un agent de liaison qui permet d'assurer en permanence la cohésion de l'ensemble des constituants [8].

Les bétons réfractaires denses peuvent être divisés en trois catégories dont la Différence essentielle est la teneur massique en ciment :

- Bétons classiques : teneur en ciment entre 15 et 25 %
- Bétons basse teneur en ciment : 4 et 10 %
- Bétons à ultra basse teneur en ciment : < à 2 %

La nature du liant permet de distinguer deux principales familles de bétons réfractaires :

- Les bétons à liants chimiques : c'est le cas des bétons constitués d'un liant à base de phosphore, utilisés pour de bonnes résistances mécaniques à haute température surtout dans le cas de produits d'alumine pure, ou des bétons constitués d'un liant à base de chrome.
- Les bétons à liants hydrauliques : soit à base de ciment alumineux, de type ciment fondu (teneur en  $Al_2O_3$  comprise entre 40 % massique et 42 % massique), soit à base de ciment réfractaire alumineux (teneur en  $Al_2O_3$  supérieure à 60 % massique) qui, après cuisson, se comportent comme un matériau réfractaire façonné cuit [8].

Les bétons peuvent être considérés comme des matériaux composites composés d'une matrice cimentaire et d'agrégats de tailles différentes pouvant aller jusqu'à plusieurs mm la taille maximale est de 7 mm [7]. Dans le cas des bétons de génie civil, la résistance mécanique est assurée par les liaisons hydrates du ciment. Pour les réfractaires la liaison hydrate ne sert qu'à la mise en forme avant cuisson, la résistance mécanique finale étant assurée par les liaisons céramiques créées après cuisson à haute température  $> 900^{\circ}\text{C}$  [7].

Cette liaisons céramique « iono-covalentes » très fortes qui favorisent une réfractarité élevée, leurs confèrent une grande dureté, une absence de ductilité avec une faible ténacité (aux basses températures).

### II.5.2.1. Différente caractéristique physique

#### III.5.2.1.. La conversion

Lors de la recristallisation de la phase CA que se forme une liaison chimique forte qui permet d'assurer la liaison entre les granulats et donc la cohésion entre la matrice et les granulats. L'évolution structurales de la phase CA lorsqu'elle est soumise à une élévation de température. Sont connus sous le nom de phénomènes de conversion.

C'est un phénomène relativement lent et irréversible qui se produit lors de la première chauffe et qui n'opère complètement que si le chauffage est progressif La description de ce phénomène peut être décomposée en plusieurs étapes :

##### L'hydratation

La phase anhydre CA, sous forme de poudre, est hydratée par ajout d'eau. Elle se dissout pour former des aluminates de calcium hydratés et des hydrates d'aluminium. Ces derniers se trouvent sous forme de gel d'alumine amorphe ou bien de gibbsite cristalline. Lors de l'hydratation du CA, trois sortes d'hydrates peuvent se former. Cependant, seul l'hydrate  $\text{C}_3\text{AH}_6$  est stable à température ambiante. Les deux autres,  $\text{CAH}_{10}$  et  $\text{C}_2\text{AH}_8$ , sont métastables et tendent à se transformer en  $\text{C}_3\text{AH}_6$ . La cinétique de transformation est intimement liée à la température. En effet, lors d'un étuvage à  $110^{\circ}\text{C}$  pendant 24 heures, les phases hydratées présentes sont  $\text{C}_3\text{AH}_6$  et  $\text{AH}_3$ .

##### La déshydratation

Au-delà de  $110^{\circ}\text{C}$ , l'eau combinée avec les aluminates de calcium va s'évaporer. Ensuite entre  $200^{\circ}\text{C}$  et  $400^{\circ}\text{C}$ , l'eau de constitution commence à disparaître, conduisant à la formation du  $\text{C}_{12}\text{A}_7$ , de l'alumine amorphe et de la chaux hydratée.

##### La recristallisation

A partir de  $440^{\circ}\text{C}$ , la chaux hydratée va se transformer en chaux libre et réagir avec l'alumine libre pour former de nouveau du  $\text{C}_{12}\text{A}_7$ . Vers  $900^{\circ}\text{C}$ , les particules de  $\text{C}_{12}\text{A}_7$  vont se

combiner avec l'alumine restante pour donner le mono aluminat de calcium (CA). Celui ci va réagir à son tour avec l'alumine aux alentours de 1 000°C pour former du CA<sub>2</sub>. Pour des températures proches de 1 400°C, le CA<sub>2</sub> va réagir avec l'alumine libre pour former du CA<sub>6</sub> [8].

### II.5.2.2.La perméabilité

Après séchage à l'aire ambiante, la présence des hydrates conduit à une perméabilité très faible ; après déshydratation la perméabilité augmente ceci conduit à l'obtention de maçonneries relativement étanches aux gaz par contre, la faible rend l'évacuation de l'eau difficile, particulièrement dans le cas où la teneur en eau de gâchage est faible

La perméabilité aux gaz est la capacité d'un matériau à se faire traverser par un gaz sous l'effet d'une différence pression, elle est calculée à l'aide d'une équation donnée par le volume de gaz s'écoulant à travers le matériau dans un intervalle de temps donné, l'essai se fait selon la norme NF EN993-4

La perméabilité des bétons réfractaire denses est en générale beaucoup plus faible que celle des produits façonnés de même classe [les travaux d'Aliprandin] cité par [13].

### II.5.2.3.La conductivité thermique

La conductivité thermique est l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Elle dépend, pour le béton, de nombreux paramètres : la porosité, la température, le degré d'hydratation, la teneur en eau, le type des granulats.

De manière générale pour les bétons, la conductivité thermique diminue lorsque la température augmente cette diminution liée à la transformation opérant lorsque la température augmente, on note que lorsque le béton réfractaire contient encore de l'eau de cristallisation, la conductivité thermique est plus élevée, cette caractéristique déterminée suivant la norme NF EN 993-15.

La conductivité thermique d'un béton réfractaire est 20à30% moins élevée que celle des briques de même qualité [les travaux d'Aliprandin] cité par [13].

### II.5.2.4.La chaleur spécifique

Est une caractéristique qui dépend de la composition chimique et l'état d'agrégation du matériau. Elle dépend, en outre, de la température et croit, en générale, avec l'augmentation de celle-ci.

La chaleur spécifique est plus élevée quand le béton n'a pas évacué son eau. [Les travaux d'Aliprandin] cité par [13].

### II.5.3. Les composantes essentielles de béton réfractaire

#### II.5.3.1. Le ciment alumineux fondu CA

##### II.5.3.1.1. Historique

L'invention des ciments alumineux, au début du XXe siècle, s'explique par la volonté d'améliorer la durabilité des ouvrages exposés aux sols chargés en sulfates. En note que le ciment portland à une faible résistance aux milieux agressif à cause de sa basicité « le rapport pondéral oxydes acides/oxydes basiques, ou  $[(\text{SiO}_2) + (\text{Al}_2\text{O}_3) + (\text{Fe}_2\text{O}_3)]/[(\text{CaO}) + (\text{MgO})]$ . Ce rapport est nettement inférieur à 1 dans les ciments Portland ». En 1847, Vicat émet l'idée qu'un ciment dans lequel le rapport « oxydes acides »/« oxydes basiques » serait supérieur à 1, résisterait à l'action des sulfates. Au début du XXe siècle, Bied « directeur du laboratoire de la Société Pavin de Lafarge », reprend cette idée et aboutit en 1908 à un premier ciment alumineux obtenu par fusion d'un mélange de bauxite et de calcaire, commercialisé sous le nom Ciment Fondu [14].

##### II.5.3.1.2. Les domaines d'applications de CA

Aujourd'hui, les principales applications des ciments d'aluminates de calcium (CAC) sont les bétons réfractaires (fours, cheminées). En parallèle, les bétons à base de ciment d'aluminates de calcium continuent à être utilisés dans une large gamme d'applications spéciales où leur rapidité de durcissement et de séchage ainsi que leur durabilité sont jugées supérieures à celles du béton de ciment Portland. À titre d'exemple, on mentionnera travaux nécessitant l'obtention, dans un délai très court, de résistances mécaniques élevées, les sols péri-réfractaires ou sols résistant aux chocs, à la corrosion, au trafic élevé, la protection des réseaux d'égouts (canalisations, travaux d'assainissement), ou encore le renforcement des zones soumises à des abrasions intenses dans les ouvrages hydrauliques ou les mines, ouvrages en milieux agricoles [14, 15].

##### II.5.3.1.3. La fabrication de ce ciment

Ce ciment fait l'objet de la norme NF EN 14 647 « Ciment d'aluminates de calcium - Composition, spécifications et critères de conformité ».

Il résulte de la mouture après cuisson jusqu'à la fusion d'un mélange composé principalement d'alumine, de chaux, d'oxydes de fer et de silice. Du fait de sa chimie et de sa minéralogie particulière, expliquant entre autres l'absence de portlandite.

Le premier ciment alumineux contenait environ 40 % d'alumine, était produit par fusion complète des matières premières. Pour améliorer le caractère réfractaire, on augmente la

## Chapitre II : Le Béton Réfractaire

teneur en alumine mais au-delà d'environ 55 % d'alumine il devient nécessaire d'utiliser une cuisson par frittage dans un four rotatif, où la fusion n'est plus que partielle. La température requise pour la fusion partielle augmente avec la teneur en alumine, jusqu'à 1600 °C pour un ciment à 70 % d'alumine.

Le procédé de fusion se fait généralement dans un four réverbère. La bauxite et le calcaire sont alimentés sous forme de blocs dans la section verticale du four et descendent graduellement vers le « laboratoire » où la fusion complète, autour de 1400 °C, permet un très bon mélange des espèces minérales. Ce « bain » homogène est extrait et refroidi pour obtenir le clinker, qui sera ensuite broyé pour obtenir le ciment. La minéralogie du ciment découle directement de la composition chimique globale des matières premières. La fusion peut aussi se faire dans un four électrique à arc mais le rendement thermique est moindre.

Il est cependant important de noter que la terminologie ne présume pas du rôle du pourcentage d'alumine sur les propriétés. C'est plutôt la minéralogie et la finesse qui sont les caractéristiques déterminantes pour l'hydratation et la durabilité du ciment.

Le tableau suivant illustre la vaste plage de compositions chimique et minéralogique couverte par les différents ciments d'aluminates de calcium commercialisés.

**Tableau 2. 1 :** la composition chimique de ciments d'aluminates de calcium :

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
40 %	38 %	03 %	16 %	< 0,5 %
50%	38%	03%	02 %	< 0,5 %
70 %	29 %	0,30 %	0,2 %	< 0,5 %
80 %	19 %	<0,3 %	<0,2 %	< 0,5 %

Pour la confection des bétons utilisés dans le monde de la construction, on utilise essentiellement du ciment alumineux à 40 % d'alumine.

### II.5.3.1.4. Spécification

Les caractéristiques de Ciment Fondu® fabriqué en France sont conformes avec les exigences définies dans la norme : NF P15-315 : "Liants hydrauliques - Ciment alumineux fondu".

Les caractéristiques de Ciment Fondu® fabriqué en Angleterre sont conformes avec les exigences définies dans la norme : BS 915-2 :1972 "Specification for high alumina cement"

### II.5.3.1.5. Caractéristique et propriété du béton assuré par ce ciment

Ciment Fondu® est un ciment à base d'aluminates de calcium, à la différence du ciment Portland qui est à base de silicates de calcium

## Chapitre II : Le Béton Réfractaire

- \* Ciment à durcissement rapide ce qui permet aux bétons et mortiers atteignent une résistance mécanique élevée au jeune âge et la mise en service rapide des bétons entre 6 et 24 h après leur mise en place.
- \* Excellente résistance aux attaques acides, à la différence du ciment Portland, ne libère pas de chaux libre durant son hydratation. Cela implique que les bétons à faible porosité (bas ratio Eau/Ciment) ont une excellente résistance aux attaques acides,  $\text{pH} > 4$
- \* Ciment Fondu est aussi très bien adapté pour la résistance à la chaleur (haut température) et pour les bétons réfractaires.
- \* Particulièrement bien adapté aux ouvrages soumis à l'abrasion. [14, 3]
- \* Les bétons et mortiers de ce ciment formulés pour atteindre de hautes résistances et une faible porosité présentent une meilleure résistance à l'abrasion et à l'usure. Des performances encore Supérieures peuvent être atteintes en utilisant des granulats adaptés.
- \* Résistances mécaniques en MPa :

**Tableau 2. 2 :** Les valeurs de la résistance en compression et en flexion du mortier selon la NF [14,3]

L'échéance	Flexion Valeurs limites garanties NF (MPa)	Compression Valeurs limites garanties NF (MPa)
6h	4	30
24h	5	50
28j	6.5	60

- Composition du mortier selon la norme NF P15-315 et BS 915 : Ratio ciment/agrégat = 1/2,7 ; E/C= 0,4.
- Conditions des essais selon la norme EN 196-1 : Éprouvettes 40x40x160 mm ; Température 20°C ; Conservation des éprouvettes à  $> 90$  % d'humidité relative jusqu'à 24h (Norme NF) ou 6h (Norme BS), ensuite immersion dans l'eau.
- Noter que les résistances mécaniques déterminées en mortier ne sont pas représentatives des résistances mécaniques en béton.
- \* Temps de prise sur mortier NF :

Temps de prise sur mortier NF	Valeurs usuelles
Début de prise (min)	130 - 200
Fin de prise (min)	140-220

- Composition du mortier selon la norme NF P15-315 : Ratio ciment/agrégat = 1/2,7 ; E/C= 0,4.
- Préparation du mortier selon la norme EN 196-1.

- Technique d'essais selon la norme NF P15-431 : Appareillage Vicat selon EN 196-3 mais avec une masse mobile de 1000 g ; Température 20°C ; Eprouvette immergée dans l'eau ou >90 % d'humidité relative.
- Fin de prise selon NF P15-330 : L'aiguille Vicat ne pénètre plus dans le mortier
- \* La Phase minéralogique principale : CA
- \* Densité apparente : 1100 kg/m<sup>3</sup>
- \* Masse volumique : 3,2 - 3,3 g/cm<sup>3</sup>
- \* Chaleur d'hydratation 6 h : 340 kJ/kg  
24 h : 445 kJ/kg  
5 j : 445 kJ/kg
- \* Surface spécifique Blaine 2850 - 3450(cm<sup>2</sup>/g) selon la norme EN 196-6
- \* Étalement à 15 min > 30(%) Mortier selon norme NF P15-315 (sauf E/C) : Ratio ciment/agrégat = 1/2,7 ; E/C= 0,45.

Réalisé avec 25 chocs après 15 min de repos dans un moule tronconique, d1=100 mm.  
Étalement (%) = d2 (mm) - d1 (mm).

L'hydratation ne conduit pas à la libération de portlandite.

### II.5.3.1.6. Les précautions d'emploi

- ✚ Éviter impérativement l'emploi de granulats contenant des alcalins libérables, cas des granulats de laitier, de certains granits, des roches comportant des éléments Schisteux, micacés.
- ✚ Éviter l'emploi de sable comportant des éléments très fines <0.2mm en raison de l'éventuelle possibilité de présence d'alcalins dans ces fines
- ✚ Dosé à 400 kg au mètre cube selon les recommandations de l'AFNOR dans son fascicule P 15-316 les dosages courant étant général de l'ordre de 430-450Kg/m<sup>3</sup>, et Limiter impérativement le rapport E/C à 0.4 au maximum
- ✚ Utiliser impérativement de l'eau propre pour le gâchage, éviter absolument les eaux de recyclage qui peuvent contenir des éléments susceptibles de perturber l'hydratation du ciment
- ✚ Éviter la dessiccation superficielle, dès le début de prise et ceci pendant une durée d'au moins 24 heures et mieux 48 heures, soit par arrosage, soit par pulvérisation d'eau ou encore application d'un produit de cure. [14, 3]
- ✚ Il est possible de mettre en œuvre ce béton par projection [16].

### II.5.3.2. Les granulats réfractaires

La tenue à la température des bétons ou des mortiers dépend du type de granulats utilisés, Il est ainsi possible de réaliser des bétons résistant jusqu'à 2000 °C en utilisant des granulats d'alumine tabulaires et un ciment à 80% d'alumine, Ceux-ci peuvent être, soit d'origine naturelle, soit d'origine synthétique.

#### II.5.3.2.1. L'alumine tabulaire

Est une alumine calcinée avec une proportion de  $Al_2O_3$  proche de 100 %. Elle est formée de fines plaquettes relativement larges. Elle est caractérisée par une forte inertie chimique et une haute réfractarité. Elle présente les caractéristiques suivantes : pureté chimique élevée, dureté extrême, bonne conductibilité thermique et résistance aux chocs thermique.

#### II.5.3.2.2. La bauxite

Est une roche alumineuse d'altération continentale. De structure granulaire ou massive. Elle contient dans des proportions variables des hydrates d'alumine telle la gibbsite  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$  et la boemite  $Al_2O_3 \cdot H_2O$ , de la kaolinite, de la silice et des oxydes de fer. Elle a pour formule globale approximative  $Al_2O_3 \cdot H_2O$  et donne lieu à des réfractaires titrant à 70-90 % d' $Al_2O_3$ , ayant 1400°-1500°C jusqu'à une stabilisation complète pour ne pas donner lieu pendant la cuisson des réfractaires, à un gonflement important. L'inconvénient de ces réfractaires est d'avoir un faible affaissement sous charge à température élevée à cause des impuretés. En particulier de fer [travaux d'Aliprandi 1989] citée par [13].

#### II.5.3.2.3. L'andalousite

Silicate d'alumine anhydre de formule  $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ , l'andalousite est un minérale réfractaire disposant d'une excellente résistance aux chocs thermiques l'andalousite est ainsi utilisée dans les industries métallurgique (fer, Aluminium), cimentières, céramiques et verrières. ou elle est le plus souvent mise en œuvre sous forme de briques réfractaires, ce silicate d'alumine a deux autres polymorphes qui sont la silimanite et me disthène, tous trois souvent regroupés sous le terme générique de minéraux de la famille de la silimanite. Compte tenu de leurs propriétés spécifiques, ils ne sont pas une expansion qui peut atteindre 15% lors de la montée en température alors que pour l'andalousite elle ne dépasse pas 4-8% [travaux de jouenne 1990 ; ALIBRANDI 1989] citée par [13]. L'andalousite :  $[Al_2O(SiO_4)]$ , est un minérale fragile Sous forme cristallin prismatiques allongés à section pseudo-quadratique ou losangique de dureté entre 6 à 7. Variable ; blanc à gris jaune, rose dans les pegmatites.

## Chapitre II : Le Béton Réfractaire

### II.5.3.2.4. Chamotte

Argile cuite et concassée en grains de différentes tailles ou sable utilisés pour la préparation de béton résistant aux hautes températures qui proviennent des roches réfractaires, sont de sous-produits industriels obtenus à partir de la cuisson jus que 1250°C d'une argile riche en alumine exemple laitier granulés des hauts fourneaux [travaux de Jouenne 1990 ; ALIBRANDI 1989] citée par [13].

Le tableau se dessous montre le dosage au cas de granulats de chamotte :

**Tableau II. 3** : Le dosage en ciment cas de granulats de chamotte.

Type	Dosage
Mortier fin (chamotte 0 - 2 mm)	600 kg/m <sup>3</sup>
Mortier (chamotte 0-5 mm)	500 kg/m <sup>3</sup>
Béton (0 - 10 mm)	400 kg/m <sup>3</sup>

Nous indiquons dans le tableau ci-après (tableau II.3) ; quelque type des granulats et le pourcentage moyen d'alumine qui doit comporter le ciment pour assurer la tenue de la face du béton qui exposée a des températures entre 500-2000°C.

En générale ces granulats rare et indisponible ainsi que leur prix élevé, pour cela l'aidai aborder dans cette étude est d'utiliser les réfractaire façonnée comme des granulats

**Tableau II. 4** : quelque granulat réfractaire cordonné avec le type de ciment nécessaire pour avoir une limite de température [3].

Température en °C	Type de ciment	Type des granulats
500	Alumineux fondu	Sable silicieux
800	Alumineux fondu	Basalt, trapp, granit ou laitier de haut fourneau
1000	Alumineux fondu	brique rouge concassées
1150	Alumineux fondu	Alag, briques concassées à 35% d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1250	Alumineux fondu	chamotte à 42/44% d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1300	Alumineux fondu	briques concassées à 42/44% d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , chamotte à 42/44% d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1350	Alumineux fondu Ciment à 50% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Silimanite, gibbsite calcinée briques concassées à 42/44% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , chamotte à 42/44 % de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1400	Alumineux fondu Ciment à 50% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Corindon brun chamotte à 42/44% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1450	Ciment à 50% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Ciment à 70% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Silimanite, gibbsite calcinée briques concassées à 42/44% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , chamotte à 42/44% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1525	Ciment à 70% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	chamotte à 42/44% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1550	Ciment à 50% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Ciment à 70% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Corindon brun Silimanite, gibbsite calcinée
1800	Ciment à 70% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Corindon blanc, alumine tabulaire
2000	Ciment à 80% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumine tabulaire

### II.6.. Les réfractaires façonnés

Avant le début du XX<sup>ème</sup> siècle, Ils représentent le type le plus utilisé. Ils se présentent sous la forme de briques cuites, tuiles et pièces de forme, blocs, ...etc [7].

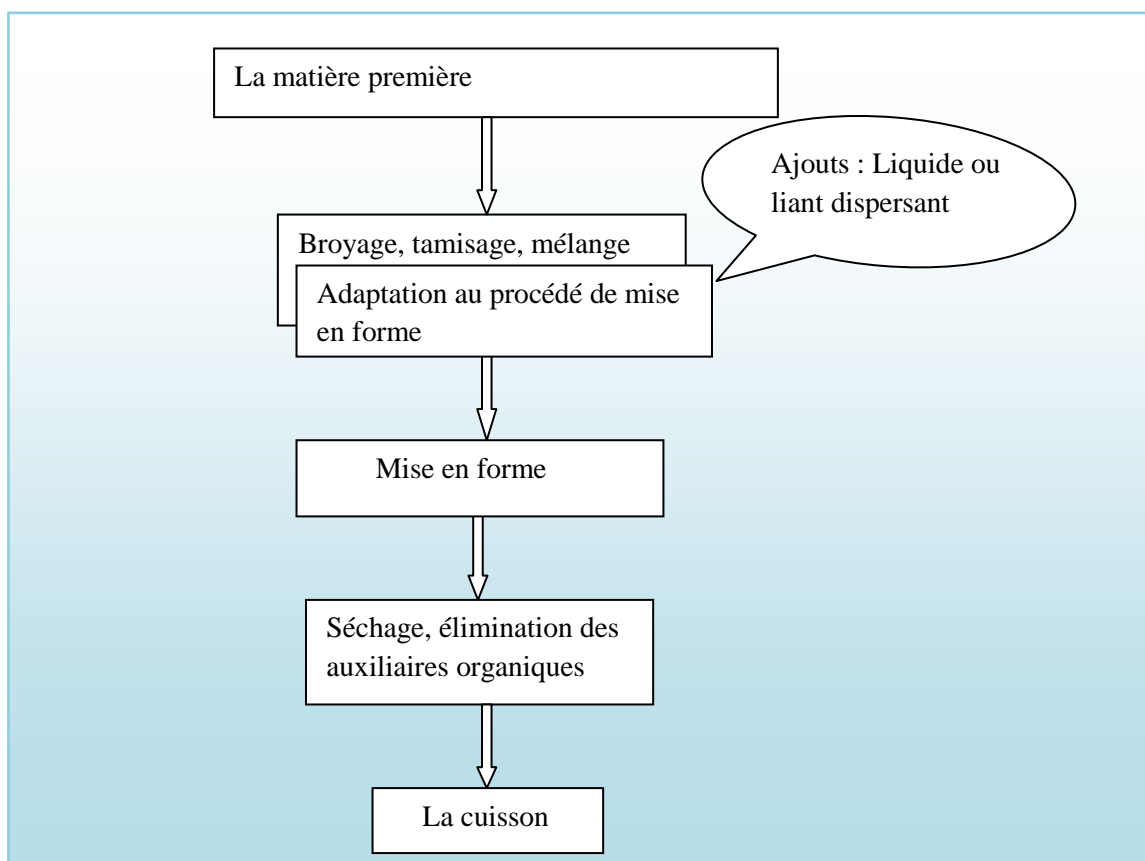
Leur consolidation a lieu par frittage, réaction chimique (liant hydraulique ou chimique) ou par solidification (matériaux électro-fondus), sont utilisés dans les revêtements de poche de coulée, dans les parois de fours ou dans des produits de haute technicité et de formes complexes comme les tiroirs de coulée.



**FigureII. 7 :** four en brique réfractaire monte de 70cm.

#### II.6.1.Le procédé de fabrication des réfractaires façonnés

Le façonnage des réfractaires s'effectue principalement selon les procédés de la céramurgie des poudres (élaboration des poudres céramiques par voie solide et voie chimique, techniques de mise en forme et de frittage en phase solide et en phase liquide). Ces procédés ont pour but de transformer les matières premières crues (sous forme de poudres et d'agrégats) en des pièces finies de caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques particulières.



**Figure II. 8 :** Étapes générales de fabrication d'un produit réfractaire.

### II.6.2. Le recyclage des déchets réfractaires façonnés

#### II.6.2.1. Définition d'un déchet réfractaire

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité Industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité. Le déchet réfractaire est par définition « tout résidu d'un processus de production des briques ou des céramiques et de leur consommation, dont la propriété de l'obligation de se débarrasser ou l'éliminer après fin d'utilisation ».

La plupart des déchets constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie, les déchets perdre certain de propriété : mécanique (la résistance, les fissure, la rupture ...etc), chimique (les réactions chimiques, la transformation des molécules au d'autre à sous le traitement thermique), physique (le retrait, le gonflement...), tous ces phénomènes cousent la dégradation de brique par le temps.

Enfin, le mélange au hasard des déchets réfractaire peut conduire à la formation de nouveaux produits [12].

### II.6.2.2. La classification des déchets réfractaires

Avant de recycler et de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps. Il s'agit donc de « mesurer pour connaître et connaître pour agir » [12].

Les déchets réfractaires, les tuiles, les céramiques et les briques nommés comme des déchets inertes « qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante ; ne se décomposent pas, ne brûlent pas, et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine » [12].

### II.6.2.3. Recyclage des déchets

Le recyclage : est un procédé de traitement des déchets qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit. En particulier depuis les années 70 (plus de 40 ans), le recyclage est une activité importante de l'économie et l'écologie des conditions de vie dans les pays développés, le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite les trois R :

- réduire : la réduction du volume de déchets, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets.
- recycler : qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage et la préservation des ressources naturelles
- réutiliser : qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage [12].

### II.6.2.4. Déchets réfractaires en Algérie

L'Algérie est en train de connaître un développement économique et démographique sans précédent. Le taux élevé d'accroissement de la population a ainsi engendré une urbanisation accélérée, ce qui introduit une utilisation importante de ciment et du produit de la céramique, afin de fabriquer ces derniers on utilise des briques réfractaires et des rouleaux. Cela ne s'est pas fait sans conséquences sur l'environnement. À l'objectif d'estimer la quantité des déchets réfractaires abandonnés par les cimenteries et les faïenceries en Algérie une estimation plus ou moins de quantité de déchet.

## Chapitre II : Le Béton Réfractaire

➤ La consommation des rouleaux céramique en niveau du la faïencerie de Rouïba :

- Le four N° 01 :

$$\Phi_{\text{int}} : 40\text{mm}, \Phi_{\text{ext}} : 50\text{mm}, M_v = 3.2\text{g/cm}^3$$

Elles consomment enivrent 79rouleaux /mois

$$V = (\Pi r_{\text{ext}}^2 - \Pi r_{\text{int}}^2) * L = 2433892.5 \text{ mm}^3 = 2433.8925\text{cm}^3.$$

$$\text{La masse : } M = V * M_v = 7788.456\text{g} = 7.788456\text{Kg}$$

Dans un mois une quantité égale à 615.2888Kg, alors est égal à 7383.45 Kg environ

- Le four N° 02 :

$$\Phi_{\text{int}} : 32\text{mm}, \Phi_{\text{ext}} : 42\text{mm}, M_v = 3.2\text{g/cm}^3$$

Elles consomment enivrent 79rouleaux /mois

$$V = (\Pi r_{\text{ext}}^2 - \Pi r_{\text{int}}^2) * L = 1620711\text{mm}^3 = 1620.711\text{cm}^3.$$

$$\text{La masse : } M = V * M_v = 5186.2752\text{g} = 5.1862752\text{Kg}$$

Dans un mois, une quantité égale à 409.715Kg, alors est égal à 4916.588Kg environ /année

La quantité totale des rouleaux dans cette faïencerie est environ 12300Kg/année

Alors que dans une 100 faïencerie la quantité des déchets est environ 1230.000tone/année

➤ La consommation des briques réfractaire en niveau du la cimenterie de Sour El Ghezlan

Le secteur responsable de quantité des déchets nous informe que la quantité égale : à 1500Tone /année.

Alors que dans une 13cimenterie la quantité des déchets est environ 19500tone/année

Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire.

### II.6.2.5. La directive algérienne sur la gestion des déchets inertes

Face à la gravité des problèmes environnementaux, le gouvernement Algérien a décidé en 2001 de consacrer une enveloppe financière importante, afin de recycler ces déchets [12].

La Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.

#### **Article 37 :**

« La collecte, le tri, le transport et la mise en décharge des déchets inertes sont à la charge de leurs générateurs. Le dépôt, le rejet et l'abandon des déchets inertes sont interdits sur tout site non désigné à cet effet et notamment sur la voie publique ».

La gestion de déchets en Algérie souffre de plusieurs contraintes, d'ordre administratif (application de la réglementation, loi 2001) et technique (manque de moyen technique).

### II.6.2.7. Technique de recyclage

Certains Technique sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Il existe trois grandes catégories de recyclage : chimique, mécanique et organique.

Dans le cas de ces déchets, seul le recyclage mécanique « la transformation des déchets à l'aide d'une machine ou manuelle, par exemple le concassage et le broyage » est abordable.

### II.6.2.8. La chaîne du recyclage

#### a) Collecte de déchets

L'opération de recyclage commence par la collecte des déchets « ramassage ou regroupement des déchets en vue de transferts vers un lieu des traitements ».

À la suite de la collecte, le triés dit aussi La collecte sélective : est de séparé les déchets en fonction de la composition ou la zone de traitement, Le principe de la collecte sélective est le suivant « celui qui crée le déchet le trie lui-même » soit manuel ou a l'aide d'une machine.

#### b) Transformation

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique, concassage, broyage, tamisage et classer par diamètre.

Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi soit sous forme des granulats ou sous forme d'une poudre.

#### c) Commercialisation et consommation

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs béton, brique ou carreaux, qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés. Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés [12].

### II.6.2.9. Impact du recyclage

#### a) Source d'approvisionnement alternative

Le recyclage des déchets offre une source d'approvisionnement en matières premières alternatives aux autres sources. Ainsi que le cout élevé des granulats naturelle et la non disponibilité ou marché.

#### b) Création d'activités

Le recyclage est une activité économique à part entière. Elle est le moyen de création de richesses pour les entreprises de ce secteur.

### c) Coût de main-d'œuvre

Le recyclage suppose de trier, ceci exige une main-d'œuvre abondante, même lorsqu'un tri sélectif est effectué aux débuts. En effet, il arrive qu'un second tri soit nécessaire dans un centre d'affinage pour éliminer les erreurs de tri et les impuretés qui pourraient compromettre le recyclage.

### d) Impacts du recyclage sur l'environnement

Les bénéfices environnementaux du recyclage sont considérables : il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de protéger la nature et d'économiser les matières premières.

Le recyclage permet de réduire l'extraction de matières premières :

- Le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits Chimiques et 14 kwh d'électricité ;
- L'aluminium est recyclable à 100%; 1 kg d'al donne 1 kg d'aluminium (après avoir été Fondu) [12].

### II.6.2.10. Les propriétés des granulats réfractaires recyclés

Pour certains types de produits, la qualité de la matière première est altérée par l'opération de Récupération de celle-ci dans les produits recyclés « de moins bonne qualité ce qui ne permet qu'une dizaine de recyclages successifs ».

Néanmoins, la chimie intervient de plus en plus dans la fabrication de matériaux issus du recyclage. Les produits qui en résultent ont des caractéristiques de durabilité et de résistance qui peuvent même être supérieures à celles de certains matériaux naturels.

## II.7. Comportement de béton réfractaire

### II.7.1. Thermomécanique

Depuis la fin des années 1990, l'analyse du comportement des bétons réfractaires a fait et continue de faire l'objet de plusieurs études. Une synthèse est proposée ayant pour objectif de regrouper et de positionner les principales évolutions des microstructures et du comportement thermomécanique de ces matériaux en fonction de la température, Cette synthèse s'appuie sur une échelle de températures qui s'étend de la température ambiante jusqu'à 1 500°C (l'étendue d'utilisation de ces matériaux) selon la norme AFNOR.

Dans cette gamme de températures, trois domaines de comportement peuvent être distingués :

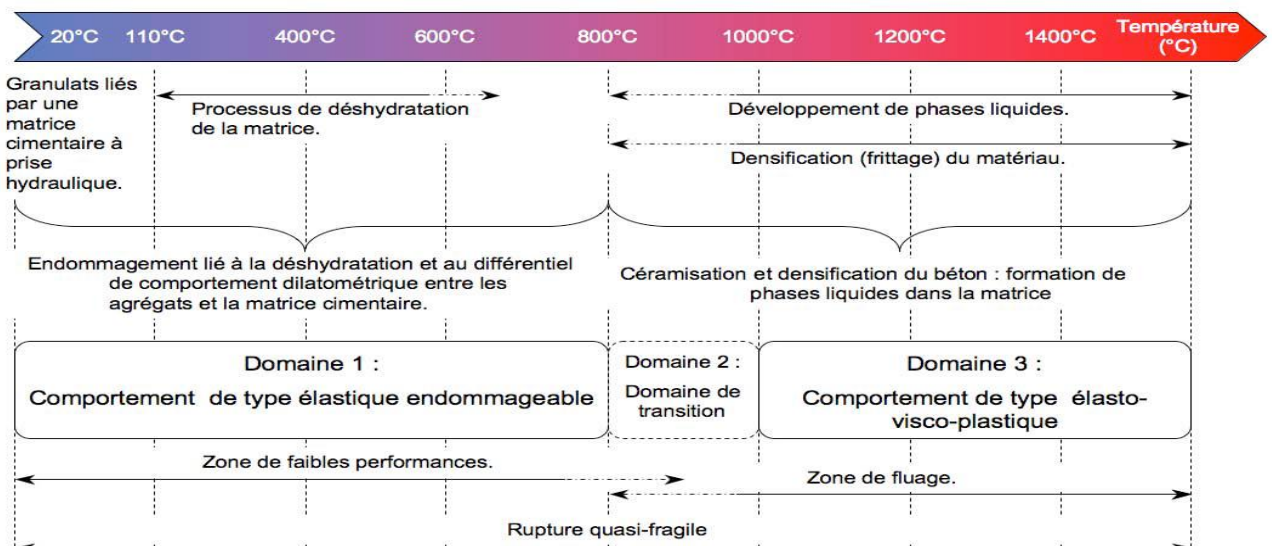
- **Le premier domaine** : entre la T° Ambiante et environ 800°C le comportement dit élastique endommageable, le béton fraîchement mis en œuvre, subit les processus de

## Chapitre II : Le Béton Réfractaire

déshydratation qui conduisent à un endommagement a cause de différentiel de comportement dilatométrique entre les granulats et la matrice cimentaire. Par conséquence, les performances mécaniques des bétons dans ce domaine de température sont faibles. Ainsi, les valeurs de contrainte à la rupture et du module d'Young chutent fortement entre l'état étuvé et les hautes températures du domaine.

➤ **Le deuxième domaine** : se situe entre 800°C et 1 000°C, le matériau a un comportement qui évolue progressivement d'un comportement élastique endommageable vers un comportement élasto-visco-plastique dite domaine transitoire, lorsque la température croît. En effet, c'est dans cet intervalle de températures que commencent à apparaître les phases liquides qui modifient le plus fortement le comportement mécanique.

➤ **Le troisième domaine** : au-delà de 1000°C, le comportement dit élasto Visco-plastique, Le béton tend à se densifier sous des effets combinés de formation de phases liquides, de diffusion à l'état solide et à l'état liquide, voire de cristallisation. L'essentiel des mécanismes actifs concerne la matrice cimentaire. Ces températures sont suffisamment hautes pour permettre le frittage du matériau. Les résultats des essais mécaniques réalisés à hautes températures indiquent que la présence des phases liquides modifie le comportement du béton réfractaire. Ainsi, une composante de visco-plasticité s'additionne au comportement ce qui améliore la capacité de déformation du matériau. Le béton devient alors sensible au fluage. La tolérance à la déformation et à l'endommagement dans ce domaine de température est plus importante.



**Figure II. 9** : des principales évolutions microstructures et du comportement thermomécanique des bétons réfractaires en fonction de la température, lors de la première chauffe : définition de trois domaines de température [8].

## Chapitre II : Le Béton Réfractaire

### II.7.2.L'évaluation de module d'Young

L'évolution du module d'Young associé avec l'étude de comportement dilatométrique d'un béton réfractaire à base d'andalousite, peuvent être décomposées en sept étapes, quatre durant la montée en température et trois au cours du refroidissement [8].

**Tableau II. 5 :** Comportement dilatométrique d'un béton réfractaire à base d'andalousite.

L'échauffement	durant l'étape 1	Entre T° ambiante et 350°C, Une chute de module est associée à un retrait dilatométrique et est liée à la déshydratation des hydrates stables.
	durant l'étape 2	Entre [350-820] le module subit globalement une décroissance continue qui est liée à un relâchement des liaisons interatomiques et à un endommagement thermique.
	durant l'étape 3	de 820°C jusqu'à 1150°C, le module d'Young commence à croître et un retrait dilatométrique intervient. Ces phénomènes sont notamment associés à un début de frittage imputable au passage à l'état liquide de phases à bas point de fusion.
	durant l'étape 4	[1150-1550] Le frittage du matériau s'interrompt, par l'expansion associée à la mullitisation. Cette formation de mullite provient d'une part de l'interaction des particules fines d'alumine avec la silice constituant la matrice et, d'autre part, de la mullitisation des granulats d'andalousite. Une chute importante du module, induite par les phases liquides de très faible viscosité, est observée. Ces phases diminuent considérablement la rigidité du matériau. À partir de 1 450°C, l'atténuation des ondes ultrasonores est trop importante. L'exploitation du signal est alors impossible.
Refroidissement	durant l'étape 5	[1550-1150] le module d'Young subit une très forte augmentation et le matériau prend un retrait progressif. Suite au processus de frittage et à la guérison des défauts (microfissures, décohésions) par la phase liquide à haute température, la rigidité du matériau croît.
	durant l'étape 6	[1150-425] L'augmentation régulière du module est celle d'un matériau stable qui ne subit pas de transformation.
	durant l'étape 7	De [425-T° ambiante] Une nouvelle décroissance de module d'Young est observée. Elle est attribuée aux désaccords dilatométriques entre les constituants de la matrice considérée qui créent des contraintes internes dans cette matrice et provoquent un endommagement sur la fin du refroidissement.

La figure II.10 suivante représente la variation du module de Young et la dilatation thermique en fonction du cycle de chauffage et refroidissement d'un béton réfractaire à base d'andalousite.

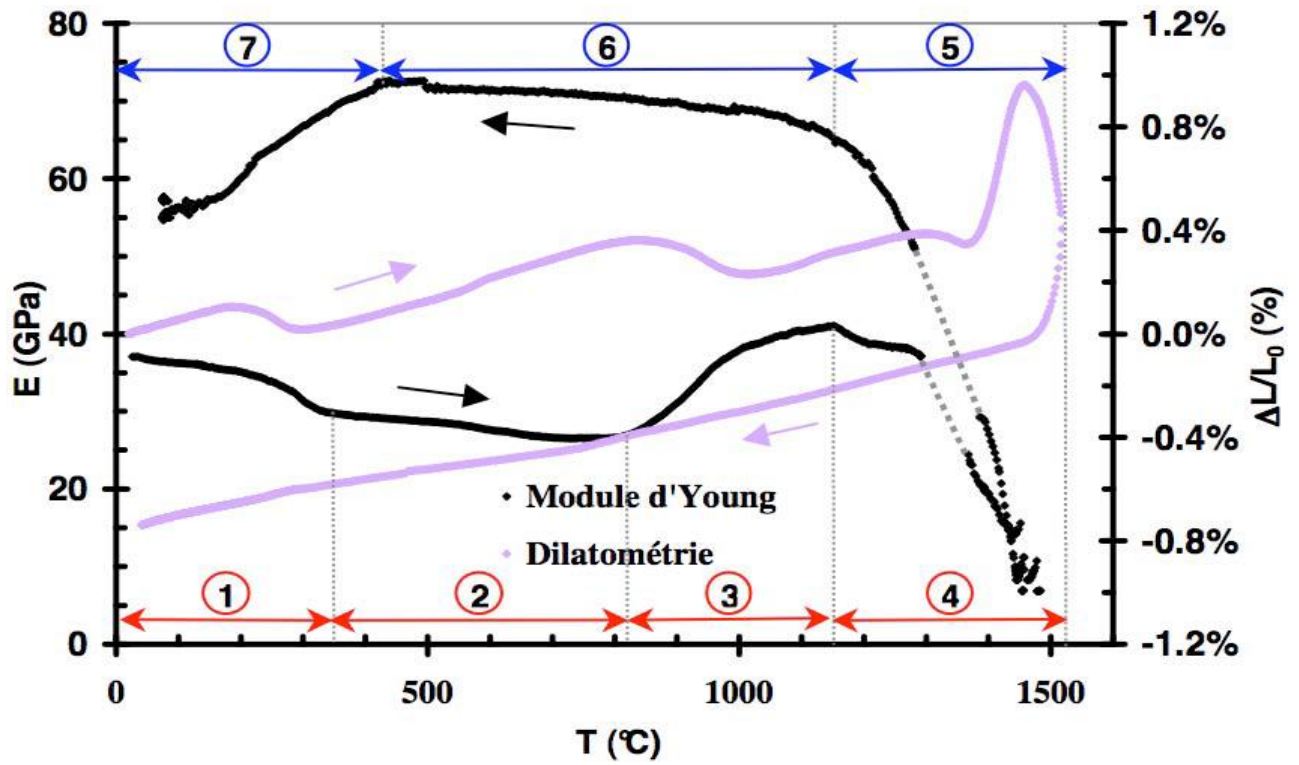


Figure II. 10 : Évolutions du module d'Young et comportement dilatométrique de la matrice cimentaire d'un béton réfractaire à base d'andalousite [8]

***Chapitre III :***

***Les Fibres Dans***

***le Béton***

### **III.1 Introduction**

Le béton est connu comme un matériau moderne, caractérisé par sa facilité de mise en œuvre, son excellente résistance en compression (sa rigidité), sa bonne tenue au feu et sa durabilité, aussi par sa faible conductivité thermique. Par ailleurs les bétons sont connus par leur faible résistance en traction. L'introduction des éléments résistants à la traction, est parmi les solutions traditionnelles connues sous le nom des bétons armés ;qui contient une quantité suffisante d'armature (précontrainte ou non) et conçu pour assurer que les deux matériaux travaillent ensemble pour résister aux charges), mais dans certain ouvrage les armatures ne sont pas suffisantes, pour cela une autre solution est apparue, qui consiste l'introduction des fibres ( Matériau sous forme de filaments ayant un diamètre de 0,05 mm à 4 mm et une longueur de 10 à 150 mm constitués soit d'acier, de verre, de carbone ou de matériaux naturels ou synthétiques(plastique). Cela conduit à la formation des matériaux composites, constitués de fibres noyées dans la matrice. Les fibres ou le renfort, assurent la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). La matrice a pour fonction essentielle de conserver la disposition géométrique du renfort. Elle lie les fibres (renfort), répartit les efforts et assure une protection chimique.

### **III.2. Les fibres pour béton**

Les fibres de renforcement pour le béton ou le mortier est un renfort pour les mélanges de produits, ce qui réduit : la formation des fissures et leur propagation et la perméabilité. L'ajout de fibres assure la pérennité des ouvrages, augmente la résistance résiduelle du béton et la résistance au feu (par limitation des ouvertures des fissures), ainsi elle contribue à l'amélioration du module élastique, exemple la fibre de carbone.

Les fibres de renforcement peuvent avoir des compositions différentes. Ces fibres ont un additif (les alcalis et l'acide ciment) qui les protèges dès la dégradation aux UV. Les fibres de construction sont utilisées dans une multitude de solutions : pour un béton résistant à haut impact, les structures préfabriquées, la réparation, bétons projetés dans les tunnels, trottoirs, parking et chapes béton.

En générale les fibres sont en acier, copeaux d'acier, fonte ductile « leur intérêt particulier étant la bonne adhérence et n'est pas être corrodable », en polypropylène, en verre, dont la composition chimique ne peut pas être attaquées par les alcalins du ciment, en carbone ou en kevlar dont la qualité technique sont excellentes mis dont le cout est très coûteux.

### **III.2.1. La classification des fibres**

Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle), leur forme (droite, lisses, crantées, ondulées, bi-ondulées, crochet, munies de cônes aux extrémités ondulée, aiguille...etc.), leur dimension (macro ou microfibrilles), et aussi par leur propriété mécanique : résistances mécaniques (résistance à la traction).

Les dosages Courants en fibres sont de l'ordre de 0,5 à 2 % en volume de béton. On générale en classé en deux types, organique et non organique.

#### **III.2.1.1. Les fibres organiques**

Les **fibres organiques** sont à base de carbone et d'**hydrogène**, la présence de ces fibres permet de modifier le comportement au feu du béton, pour le comportement en tension (flexion et traction directe), la présence de fibre améliore la ductilité notamment en traction, réduction des effets de corrosion, diminution du poids des structures en béton fibré, aussi on peut également citer une atténuation des signaux radioélectriques. On peut citer :

#### **III.2.1.2. Les fibres végétales ou animal**

Ces fibres ne sont pas utilisables pour le renforcement de béton a cause de ses faibles caractéristiques mécaniques, par contre elles sont recommandées pour renforcer les sols, les fibres provenant de poils, fibre de liber, extraits des troncs de certaines graminées, la fibre de bois, les fibres de cellulose qui résiste à l'acide organique mais irrésistible aux acides minéraux.

**Cellulose :** La **cellulose** est un polysaccharide, une macromolécule à très longue chaîne stéréo-régulière. Elle est constituée à plus de 95% de glucose mais il n'est pas exclu que certains sucres tels que le galactose, le mannose ou la xylose soient incorporés en petite quantité dans les chaînes [20]. Le degré de polymérisation varie suivant l'origine de la cellulose. Les chaînes de cellulose peuvent donc s'associer et ainsi constituer des microfibrilles de taille variable dans lesquelles certaines régions sont hautement ordonnées (zones cristallines) et d'autres moins (zones amorphes). La réunion de ces fibrilles constitue des fibres, forme sous laquelle se présente la cellulose. Les **fibres de cellulose** sont utilisées sous forme de fibres brutes pour la fabrication de pâte à papier. Elles sont également employées après transformation dans l'industrie chimique pour la fabrication de **matières plastiques** (acétate de cellulose, celluloïd, cellophane, rhodoïd...) ainsi que dans la fabrication de **fibres textiles** artificielles (acétate de cellulose, viscose, rayonne). Les fibres de cellulose

transformées sont, par ailleurs, utilisées comme précurseurs pour la production de **fibres de carbone**.

### **III.2.1.3. Les fibres synthétiques**

Le nylon, polypropylène, l'acryle, polyster a l'ancienneté ses fibre dérivé de la cellulose naturelle, aujourd'hui la plupart de ces fibres dériver de pétrole et de polymères 1938 le nylon, dont les fibres acrylique, l'aramide, l'oléfine, polystyrène ; cette fibre destine à la fabrication des matériaux d'isolation, tissu pare bale, les fuselages et ailes d'avion.

Ces fibres réduisent de la fissuration au jeune âge (retraits plastiques), caractérisée par leur souplesse, ce qui améliore leur ouvrabilité, et résistent peu aux températures élevées (140-170°C maximum). [19]

#### **III.2.1.3.1. Fibre d'aramide**

Est une abréviation de « aromatique polyamide », développées en 1960. Ces fibres dites organiques synthétiques de couleur jaune, composées de chaîne polymères aromatiques (-NH-C=O-). Ces matériaux existent sous la forme de filaments continus, de fibres coupées (de 40 à 80 mm), de fibres courtes (de 2 à 15 mm) ou de pulpe (jusqu'à 3 mm). Le diamètre des fibres d'aramide se situe entre 12 et 15 microns.

Les para-aramides (Kevlar) peuvent cependant se scinder, notamment lors d'opérations d'usinage, en fibrilles fines de diamètre inférieur à (01) un micron.

Ces fibres sont utilisées pour leurs performances mécaniques, comme matériau de renforcement sous forme de filaments continus, dans l'industrie textile sous forme de fibres discontinues et dans la fabrication de matériaux de friction et d'étanchéité sous forme de pulpe.

Par ailleurs ces fibres, vue leur petit diamètre, elles sont facilement respirables, qui peuvent provoquer des cancers, donc il est recommandé de prendre des précautions lors de leur utilisation.

#### **III.2.1.3.2. Fibre de carbone**

Les premières fibres de carbone appariaient en 1880, comme filament dans une lampe à incandescence, elles ont été réinventées vers 1955 par traitements thermiques de fibres ou de

tissus de rayonne afin d'obtenir des textures carbonées pour des applications thermiques. Durant les années 1970 Union Carbide travaillait sur l'obtention de fibres de carbone à haute résistance et à haut module à partir de brais de mésophase, en France développaient des fibres de carbone pour applications thermiques à partir de brais isotropes.

Aujourd'hui, les fibres de carbone de renforcement se sont développées principalement à partir de polyacrylonitrile. Le brai de mésophase reste un précurseur utilisé dans le cas de module très élevé.

Les premières fibres de carbone étaient fabriquées à partir de tresses, de tissus ou d'un mat de fibres de rayonne, l'ensemble étant fixé sur un cadre rigide et chauffé, dans une première étape, à 1000-1500 °C pour transformer la cellulose en carbone sous atmosphère inerte, puis éventuellement à 2000-2500 °C pour obtenir une meilleure résistance à l'oxydation à température élevée. Aucune tension particulière n'était appliquée pendant le traitement thermique ; c'est pourquoi les propriétés mécaniques des fibres de carbone obtenues n'étaient pas aussi élevées que celles obtenues aujourd'hui à partir d'un précurseur sous tension contrôlée pendant le traitement thermique vers 1 500 °C.

L'utilisation des fibres de carbone s'est développée dans les matériaux composites utilisés comme matériaux à « hautes performances » Ces composites à propriétés anisotropes nécessitent un calcul poussé des structures à réaliser afin de placer les fibres de carbone de renfort selon les sollicitations appliquées aux pièces envisagées. Ces matériaux peuvent remplacer les métaux les plus légers tels que le titane et l'aluminium ou ses alliages

Les premières utilisations des composites à renfort de carbone dans l'aéronautique ont commencé dès 1968 à la fois en Europe, avec les pales de l'hélicoptère Gazelle de l'Aérospatiale et les trappes d'accès des avions de chasse. [18].

#### **III.1.2.4. Fibre inorganique**

Ces fibres ont une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé, dans cette catégorie en désigne :

Les fibres minérales : La fusion puis le fibrage de divers minéraux permet de produire des fibres. Il existe deux types de fibres minérales : celles qui sont directement issues de roches (exemples : amiante, wollastonite, sépiolite) et celles qui sont artificiellement produites à partir de minéraux (on parle alors de fibres minérales synthétiques (exemples : fibre de verre ou laine de verre produites à partir de la silice, laine de roche, fibre céramique réfractaire, fibre d'alumine) [19].

**III.1.2.4.1. La Fibre de verre**

Le verre appartient au groupe des matériaux inorganiques non métalliques, il n'a donc pas une structure macromoléculaire linéaire, mais plutôt une structure cristalline qui lui donne une grande rigidité ; Grâce à leurs qualités mécaniques et leur rigidité, des renforts très efficaces, mais elles sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment (protection ou imprégnation nécessaire). Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore) après une fusion (1500°C) et Fibrage de 1 à 2 mm (1250°C), Étirage : diamètre de 3 à 20 mm, ensimage, bobinage, enfin Tissage ; En préfabrication, les domaines d'application sont très vastes.

Les fibres de verre permettent la réalisation d'éléments de faible épaisseur « Panneaux de façade mince à faible épaisseur, Panneaux de façade mince à faible épaisseur, Panneaux sandwich pour l'isolation, Éléments décoratifs. Produits d'assainissements : tuyaux, caniveaux ».

Elles présentent une excellente résistance au feu (jusqu'à 800 °C). Cette caractéristique et son coefficient de dilatation du même ordre que celui de la pâte de ciment confèrent aux bétons de fibres de verre une bonne résistance à des températures élevées.

Sur chantier, les mortiers de fibres de verre sont introduits comme ajout dans pour les enduits extérieurs monocouches, ainsi que pour certains procédés d'isolation thermique.

**Tableau III. 1:** Composition massique % de Fibre de verre E.

	Fibre de verre E%
Silice « $SiO_2$ »	53-56
Aluminate « $Al_2O_3$ »	12-16
Magnésite « MgO »	21-24
Oxyde de bore « $B_2O_3$ »	5-9 %
Fluor « F »	0-1%

**Tableau III. 2:** Caractéristiques mécanique mesurées sur un composite unidimensionnel.

Caractéristiques	Fibre de verre E
Contrainte à la rupture en MPa	2400-2600
Taux d'allongement à la rupture en traction %	3

**Tableau III. 3:** Caractéristiques mécanique mesurées sur filaments vierges.

	Fibre de verre E
Contrainte à la rupture en MPa	3200-3400
Module d'élasticité en traction GPa	72-73
Taux d'allongement à la rupture en traction %	4,6-4,8

### **III.1.2.4.2. Les fibres métalliques**

Cette nomination regroupe les fibres, d'acier, la fonte amorphe, inox, qui présentent une très bonne compatibilité avec le béton. Ces fibres ayant des différentes forme « fibres ondulées - crantées - torsadées-droites -fils, rubans -fibres à extrémités aplaties, à crochets, à têtes coniques, etc. ». En générale leur rôle est d'avoir un comportement mécanique élevé « une bonne résistance à la traction et la flexion ». Ces fibres sont largement utilisées : Dans les dallages et les sols industriels, la fabrication des tunnels, des coques, réaliser des bétons projetés, la réparation de revêtements de tunnels et galeries, le confortement de parois de soutènement en béton, les matériaux préfabriqués.

Ces 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 A 820)[20].

Elles contribuent à la réduction de la largeur des fissures dans la matrice béton (limitation de l'ouverture des fissures et répartition de la microfissuration). A l'objet d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre, les diamètres de la fibre d'acier varient généralement entre 0.1-0.7mm avec des longueurs de 10-70 mm.

Les fibres métalliques sont classées en deux catégories :

- Les fibres fonctionnant par adhérence : de forme généralement plate avec une surface spécifique importante, peu ductiles, qui assure un apport à la limitation de l'ouverture des fissures.
- La fibre fonctionnant par amorçage de forme cylindrique en acier tréfile ayant un comportement ductile, laquelle l'ancrage est assuré par les crochets aux extrémités de la fibre ou par la forme ondulée de la fibre. Ces fibres confèrent une bonne ductilité au béton car elles ont une capacité de reprise d'effort importante lors que les fissures sont assez ouvertes [19] .

Le tableau III.4 suivant représente les caractéristiques physico-mécaniques.

**Tableau III. 4:** Les caractéristiques des fibres métalliques

	Fibres métalliques
Masse volumique (en g/cm <sup>3</sup> )	7,85
moyen (en $\mu\text{m}$ )	50-1000
Résistance à la traction (en MPa )	1000-2500
Module d'élasticité (en GPa)	150-200
Allongement à la rupture en %	3-4

### **III.2. Définition du béton fibres**

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres lors de la formulation. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène. Les fibres, selon leur nature ont un comportement contrainte-déformation très différent. Elles peuvent, sous certaines conditions et pour certaines applications ou procédés, remplacer les armatures traditionnelles passives. Les fibres présentent des caractéristiques géométriques et mécaniques intéressantes selon leur nature. Chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques.

Les qualités demandées aux fibres étaient non seulement la résistance mécanique mais surtout un module élastique aussi élevé que possible. En effet, les fibres subissent en service un allongement ou raccourcissement comparable à celui de la structure à laquelle elles adhèrent. A déformation égale, leur efficacité est d'autant plus grande que leur module est plus élevé. [17]

Les améliorations apportées par la présence de fibres dans le béton sont essentiellement, une moindre fragilité due à l'augmentation de la déformabilité, le béton ne se rompant plus brusquement sous l'effet de l'ouverture d'une fissure, mais ses microfissures causées par la présence de la fibre qui ainsi retardent la rupture, une meilleure résistance aux chocs, à l'usure et à l'abrasion, ainsi une tenue au gel sensiblement supérieure [18].

#### **III.2.1. Formulation de béton fibres**

La vibration est la seule méthode adéquate pour permettre la mise en place du béton fibré autour des armatures. Pour les murs minces ou les poutres (100 mm ou 4 pouces et moins), la présence de treillis métalliques complique la mise en place du béton fibré. Pour ces cas, un béton avec des granulats de grosseur nominale maximale de 10 mm est recommandé. [18].

Le temps de prise du béton est considérablement influencé par de nombreux paramètres et la présence de fibres demande une attention particulière, il est recommandé d'effectuer un essai de sciage d'environ cinq mètres de longueur pour les dalles. Cette procédure permet de déterminer si le béton a atteint une maturité adéquate. Si le béton éclate, il est recommandé de patienter avant de continuer et de vérifier l'état de l'équipement.

Un béton dont la composition est bien adaptée aux contenus en fibres peut être pompé même si la consistance semble peu maniable. Il est recommandé d'utiliser des superplastifiants et/ou des réducteurs d'eau de moyenne portée au lieu d'ajouter directement de l'eau dans le béton.

### **III.3. Caractéristique de béton fibres**

#### **III.3.1. 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.

#### **III.3.2. Résistance à la fatigue**

Les fibres rendent également le béton plus résistant sur le long terme en limitant la fissuration du matériau.

#### **III.3.3. 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.

- Liaison étroite (une bonne adhérence) entre les fibres et le béton pour assurer l'ancrage.
- 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 ;
- Ne pas risquer d'être attaquées par le milieu basique de ciment ;
- Ne pas avoir d'incidence excessive sur le coût du béton.

### **III.3.4. Dispersion et homogénéisation des fibres**

La dispersion et l'homogénéisation des fibres dans la matrice sont primordiales pour obtenir un béton fibré ayant les propriétés physiques désirées, plusieurs paramètres qui influencent la dispersion et l'homogénéisation :

- Le type de fibres et la quantité spécifiée ;
- L'étape à laquelle les fibres sont introduites dans le béton ;
- La vitesse d'introduction des fibres dans le béton ;
- La consistance du béton ;
- La mise en place.

#### **III.3.4.1. Effet de l'incorporation des fibres sur les bétons**

##### **III.3.4.1.1. La résistance à la compression**

La présence des fibres influe sur la résistance du béton à la compression, l'ajout de fibres métalliques augmente la résistance d'environ 20% [ZHa91] selon Serna Ross[ros.84] citée par [19.20] , la résistance ultime et le module d'élasticité du béton fibres peu différent à celle de la matrice de béton. Néanmoins, la présence des fibres dans le béton augmente la déformation à la rupture et confère ainsi une plus grande ductilité au béton fibres.

##### **III.3.4.1.2. La résistance à la traction**

L'objectif de renforcement est d'augmenter la résistance à la traction selon [ZHa91] un accroissement de 16 % et une certaine ductilité du comportement post-rupture [SHA.78] et [ros.98a] citée par [19]. Les fibres interviennent à deux échelles :

- À l'échelle du matériau : retardent les microfissures, cette action provoque une augmentation de la résistance à la traction qui dépend de la teneur de la fibre et de leur orientation
- À l'échelle de la structure : les fibres permettent d'atténuer la fragilité du béton et lui procurent ainsi une plus grande ductilité

##### **III.3.4.1.3. La résistance à la traction par flexion**

Le comportement de béton en flexion est conditionné par la fissuration de la zone tendue, c'est pour ça la présence des fibres peut jouer le rôle d'un stabilisateur après rupture de la matrice de béton. Le béton sans fibre se dégrade rapidement après fissuration, pour swamy et

al [SWA.75b] citée par[19], la résistance à la traction par flexion des bétons de fibres est 2 à 6 fois plus grande que celle des bétons sans fibres, alors que pour ZHAN[ZHA.91] elle n'augmente que de 4 à 50%. MAMILLAN et al [MAM.87] citée par[19]. Ont constaté que seules les fibres à crochets (Dramix ) avec un pourcentage de 1% peuvent augmenter de façon significative la résistance ultime à la traction par flexion .

Résistance au « fléchissement » du béton. Lorsqu'une poutre de béton est supportée à chaque extrémité et que la charge est appliquée au milieu de la poutre, la partie inférieure est soumise à une tension tandis que la partie supérieure est soumise à une compression.

Étant donné qu'il est très difficile de mesurer la résistance à la traction directe du béton, les essais de résistance au fléchissement ou à la flexion sont utilisés pour évaluer cette propriété.

Le principal mode de rupture d'un béton fibré est en flexion, ce qui rend cette méthode d'évaluation très utile.

La résistance à la flexion est calculée à partir de la charge maximale supportée par la poutre lors de l'essai, pour un spécimen rectangulaire, la résistance à la flexion est égale à :  $P l / bh^2$

(**P** = charge, **l** = portée, **b** = largeur et **h** = hauteur de la poutre).

#### **Résistance à la fatigue :**

Généralement, signifie l'endurance d'un béton à la flexion. La résistance à la fatigue représente le nombre de cycles de charges et de relaxation qu'une structure de béton peut supporter avant d'atteindre la rupture. La limite de la résistance à la fatigue est habituellement déterminée par un essai non normalisé. La méthode consiste à appliquer une charge variant de 10 % à 50 % jusqu'à une valeur de 95 % de sa résistance ultime à la flexion (MOR).

La présence des fibres augmente la résistance à la fatigue et amélioré le comportement du béton sous sollicitation cycliques. Ceci a été montré par DEHOUSSE et al [DEH.74] et RAMAKRISHAN et OBERLING [RAM.87] qui mis en évidence par des essais de fatigue (résistance et nombre de cycle à rupture) de façon considérable citée par [19].

#### **III.3.4.1.4. Résistance au cisaillement**

Selon ELACHEM [ELH.90], JINDAL [JIN.81] et VALADE [VAL.87], la présence de fibres dans le béton augmente sa résistance au cisaillement. Ils sont montrés aussi que la résistance

au cisaillement augmente avec l'accroissement jusqu'à 1% de la teneur en fibres, citée par [19].

#### **III.3.4.1.5. Vis à vis du retrait**

La présence des fibres permet de freiner les mouvements du squelette dus à l'évaporation de l'eau ou l'évaluation de la microporosité. Le retrait du béton de fibres est alors moins important que celui du même béton sans fibres. Les essais de retrait réalisés par ELACHEM [ELH.90], SWAMY et BAHIA [SWA.85] et VALADE ELACHEM [VAL.87], sur un béton renforcé par des fibres montrent que la présence de ces dernières entraîne la diminution du retrait. De plus, la réduction du retrait augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres. En ce qui concerne le retrait, ELACHEM [ELH.90], remarque que la présence des fibres permet d'augmenter de 28% la contrainte de rupture due au retrait par rapport au béton témoin (sans fibres) citée par [19].

#### **III.3.4.1.6. Résistance aux chocs thermiques**

T. CUYKENS [CUY.77], l'adjonction des fibres d'acier étiré à des bétons réfractaires soumis à des températures élevées et surtout à des chocs thermiques peut prolonger sensiblement la durée de vie de ces bétons. Actuellement des pourcentages allant de 0,5 à 1,5 % des fibres d'acier inoxydable. Ces fibres ne perdent leurs propriétés qu'à des températures très élevées. LANKARD et SHEETS 1970 dans le premier article sur les bétons réfractaires confirme que l'ajout de 1 à 2% de la fibre d'acier donne une amélioration significative à sa résistance, sa ténacité et sa durabilité [18].

#### **III.3.4.1.7. Résistance à la corrosion**

Les fibres synthétiques n'apportent aucune corrosion. Lorsque demandé par le propriétaire, les fibres synthétiques qui émergent de la surface durcie peuvent être brûlées avec une torche. Les fibres métalliques d'un béton sont vulnérables à la corrosion lorsqu'elles sont exposées à la surface. Les parties des fibres qui sont noyées dans la matrice ainsi que toutes les fibres contenues dans la masse du béton sont protégées de la corrosion. Lorsque demandé par le propriétaire, les fibres métalliques exposées peuvent être enlevées.

### **III.3.4.1.8. L'ouvrabilité**

La maniabilité du béton fibré influencée par la taille de la fibre et une dose spéciale, peut être évaluée par des essais d'affaissement, de débit (ASTMC 995) ou de consistomètre Vébi (BS 1881). Le test d'affaissement est celui le plus connu et Utilisé sans être nécessairement le plus valide. Par contre, lorsque les caractéristiques du béton frais ont bien été établies, l'essai d'affaissement peut devenir une bonne référence pour la consistance du béton frais (ACI 544.2R-3).

La méthode de « Durée de l'écoulement à travers le cône d'affaissement inversé » (consistomètre Vebe, BS 1881), a spécialement été développée pour du béton fibré (ASTM C 995). Cet essai permet de mesurer la mobilité ou la fluidité du béton soumis à des vibrations internes. [18]

### **III.4. Avantages du béton fibré**

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

#### **III.4.1. 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 dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé. Les principaux avantages techniques sont :

- \* Un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton. Causées la diminution des risques de fissurations et une résistance aux impacts élevée.
- \* Une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post fissuration, ce que reproduit un béton plus durable.
- \* Une énergie d'absorption élevée.
- \* Une résistance à la fatigue élevée.
- \* Une augmentation de la résistance en cisaillement.
- \* Facile à mettre en œuvre
- \* Béton plus léger que le béton ordinaire
- \* Remplacement total ou partiel des armatures traditionnelles passives (fibres métalliques)
- \* Résistance au feu, à l'abrasion, aux chocs, à la traction et à la flexion

### **III.4.2. Aspect économique**

- \* 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.
- \* Être faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage
- \* Ne pas avoir d'agglomération de fibres lors du malaxage ou du bétonnage. [17] abc association béton Québec » « Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton » [3].

### **III.5. Les inconvénients du béton fibré**

De point de vue économique le béton fibré est plus cher que le béton ordinaire et l'incorporation de fibres diminue l'ouvrabilité du béton, l'ajout de superplastifiants est alors recommandé, en plus Il est interdit d'utiliser des fibres structurales en zone de risque sismique modéré et plus.

### **III.6. Les exigences des fibres pour améliorer les performances mécaniques**

- \* Être déformables sans être fragiles
- \* Être relativement longues et fines et présenter une grande surface spécifique
- \* Posséder un module d'élasticité plus élevé que celui de la matrice cimentaire
- \* Offrir une bonne capacité de déformation
- \* Présenter une bonne adhérence avec la pâte de ciment [18]

### **Le rôle des fibres et le domaine d'application :**

- \* Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles. Selon les fibres utilisées (forme et nature) et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives à :
- \* 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

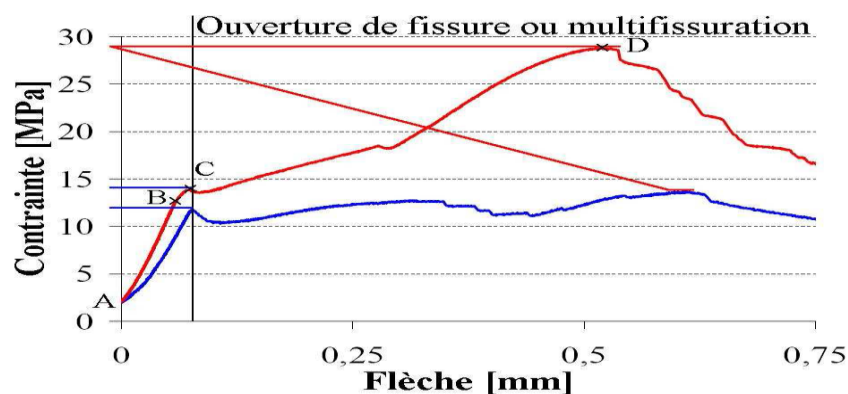
- \* La réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures
- \* La tenue au feu
- \* La résistance à l'abrasion [19,20].

#### III.6. Comportement mécanique de bétons réfractaire fibrés

Peut généralement être divisé en deux domaines :

**Domaine AB**, avant macrofissuration, le comportement du béton est majoritairement linéaire élastique même si un endommagement diffus est déjà existant au sein du matériau. Au-delà du point B, le comportement devient non linéaire du fait de l'augmentation progressive du niveau d'endommagement diffus.

**Au point C**, l'amorçage d'une ou plusieurs macro-fissures. Pour les matériaux non renforcés, une telle macrofissuration se propage rapidement et conduit à une rupture de type fragile ou quasi-fragile. Pour les bétons fibrés, un transfert de charge peut opérer vers les fibres et conduire à un adoucissement plus ou moins marqué voire à un comportement de type écrouissage. Dans certains cas, les niveaux de contrainte peuvent continuer de croître significativement au-delà du seuil d'amorçage et jusqu'à un niveau de contrainte maximal correspondant à la rupture du matériau [21].



**Figure III. 1:** Courbes contrainte-flèche en flexion 4 points : des fibres acier à 1% (en bleu) et 2% (en rouge) traitées thermiquement à 110°C et testées mécaniquement à température ambiante. [21]

La flèche en rouge : contrainte maximale post pic.

La flèche en bleu : contrainte au pic.

#### III.7. Le renforcement par la fibre

Sur l'échelle de température considérée dans cette étude, quel que soit le domaine de température considéré, les bétons réfractaires sont caractérisés par une faible résistance mécanique à la traction et ont des comportements le plus souvent non linéaires et conservent

un comportement à la rupture de type fragile ou quasi-fragile. Le renforcement par des fibres a pour objectif majeur d'améliorer ce comportement en traction afin de retarder, de limiter ou d'éviter la rupture quasi-fragile. Les fibres sont en particulier introduites dans le béton afin de modifier leurs comportements non linéaires [21]. Les effets de fibre dépendent principalement de la matière de la fibre, de forme, de la géométrie et de la fraction volumique, on note que dans le béton réfractaire aussi la température d'essais et celle de traitement thermique influencent sur le comportement thermomécanique.

### **III.7.1. Fibres réfractaires**

N.Donval en 2011; fait l'étude d'amélioration du béton réfractaire à base de carbure de silicium et a basse teneur en ciment, par trois type de renforcement « fibre d'acier, la fibre de verre et un mélange de ces deux type de fibre » et à divers fraction, soumet a la flexion quatre points.

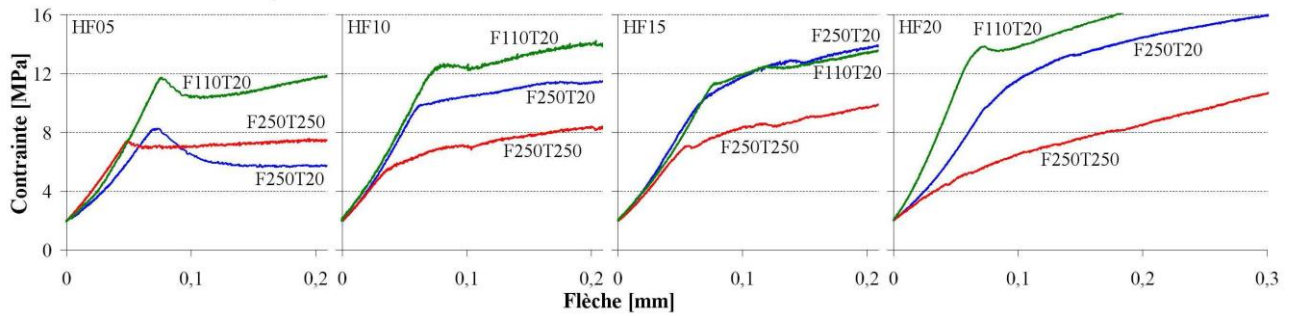
#### **III.7.1.1. La fibre d'acier**

L'analyse des courbes de comportement en flexion du béton réfractaire renforcé avec des fibres métalliques, a permis de noter :

L'augmentation de la fraction volumique de fibres entraîne une augmentation de la contrainte maximale post-pic, d'après les résultats la meilleure fraction égale à 2 % par rapport à 1,5 % et 1 % ainsi que 0,5 %, elle atteint les résultats suivant à traitement thermique 110°C caractérisés à 20°C :

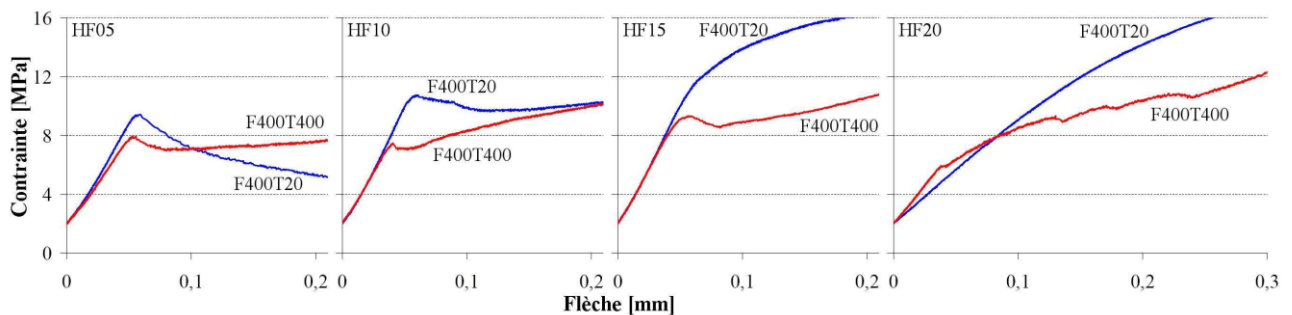
**Tableau III. 5 :** Effet du pourcentage de fibre sur le comportement mécanique.

	0,5%	1%	1,5%	2%
La $\sigma$ flexion (Mpa)	12	12-16 $\approx$ 14	12-16 $\approx$ 14	16
La flèche (mm)	0,2	0,2	0,2	0,2



**Figure III. 2 :** Courbes de comportement en flexion 4 points du béton réfractaire renforcé de fibres métalliques (nuances HF05, HF10, HF15 et HF20) traité thermiquement à 110°C et testé à 20°C (vert), traité thermiquement à 250°C et testé à 20°C (bleu), traité thermiquement à 250°C et testé à 250°C (rouge).

Le traitement thermique réduit à la fois le niveau de contrainte au pic et celui de la contrainte maximale post-pic, voir les figure III.2. Traité thermiquement à 110°C, 250°C et 400°C testé à 20°C. Il augmente également le caractère non-linéaire du comportement, comme indique dans la figure suivant :



**Figure III. 3 :** Courbes de comportement en flexion 4 points du béton réfractaire renforcé de fibres métalliques (nuances HF05, HF10, HF15 et HF20) après traitement thermique à 400°C et testé à 20°C (bleu) ; traité thermiquement à 400°C et testé à 400°C (rouge).

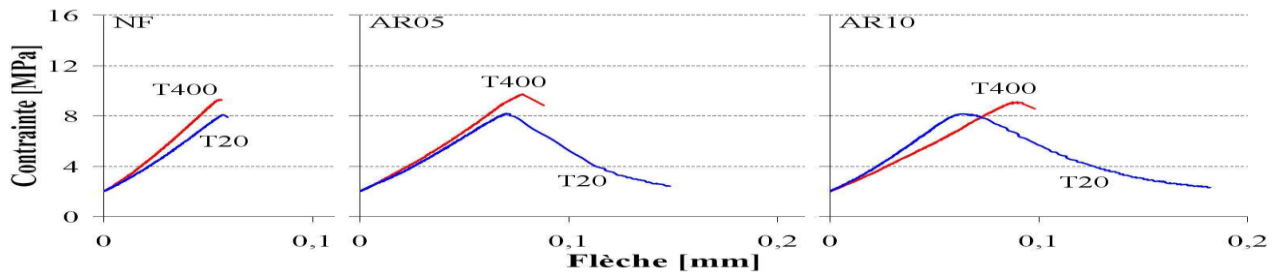
Le comportement mécanique à 20°C du béton réfractaire renforcé évolue à la fois avec la fraction volumique de fibres et avec le niveau de la température de traitement thermique. Après traitement thermique à 400°C, les nuances HF20 et HF15 sont caractérisées par un comportement fortement non-linéaire en particulier du fait du déroulement de processus d'endommagement par multi fissuration. En effet, de multiples fissures sont observées sur les échantillons en fin d'essai.

Pour les essais réalisés à haute température et en comparaison aux comportements enregistrés après traitement thermique lors des essais à température ambiante, la contrainte au pic croît et le domaine non-linéaire pré-pic est réduit. [21]

### III.7.1.2. Le renforcement par la fibre de verre

Dans ce cas le béton caractérisé par une rupture quasi-fragile et par un comportement adoucissant après fissuration (Figure III.4).

Le caractère adoucissant augmente lorsque la fraction volumique de fibres augmente.

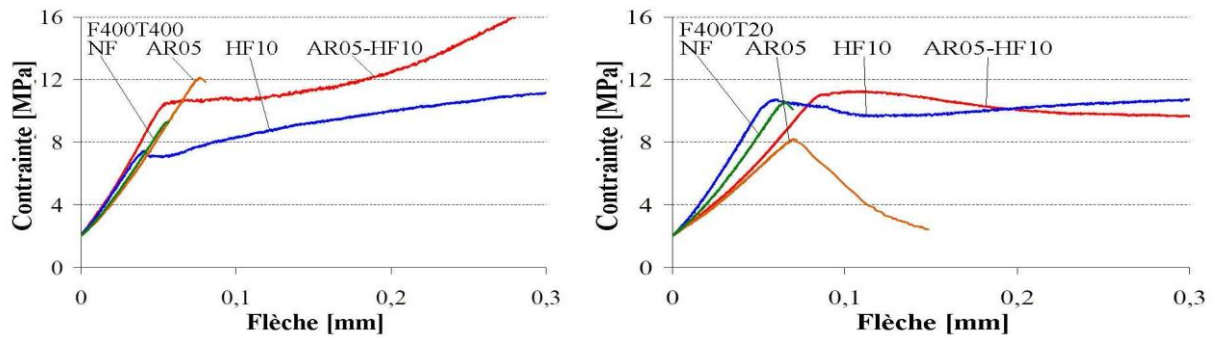


**Figure III. 4 :** Courbes de comportement en flexion 4 points à 20°C et à 400°C du béton réfractaire renforcé de fibres de verre : cas des nuances NF, AR05 et AR10 après traitement thermique à 400°C.

Lorsque le matériau est caractérisé à sa température de traitement thermique, il est constaté une diminution de l'effet des fibres dans le domaine post-pic. Si l'étendue du domaine non-linéaire du comportement du béton renforcé de fibres de verre diminue lorsque le matériau est testé à sa température de traitement thermique, elle augmente lorsque la fraction volumique de fibres augmente. [21]

### III.7.1.3. Le renforcement hybride

La figure III.5 permet de visualiser le comportement mécanique de différents types de béton fibré après traitement thermique à 400°C pour des essais réalisés à 20°C ou à la température de traitement thermique. Les résultats permettent de constater que le renforcement hybride permet de combiner les deux types de renforcement apportés par chaque famille de fibre. Ainsi lors des essais réalisés à la température de traitement thermique, après fissuration, il n'est pas observé de diminution des niveaux de contrainte pour la nuance AR05-HF10, en comparaison au cas de la nuance HF10. Si le niveau de contrainte au pic de la nuance AR05-HF10 est proche de celui de la nuance HF10, la contrainte maximale post-pic est 1,65 supérieure dans le cas du renforcement hybride.



**Figure III. 5 :** Courbes de comportement en flexion 4 points des nuances NF (vert), HF10 (bleu), AR05 (orange) et AR05-HF10 (rouge) traitées thermiquement à 400°C et testées à 20°C (a) et à 400°C (b).

***Chapitre IV :***  
***La Partie***  
***Expérimentale***

## **IV. Introduction**

On présentera dans ce chapitre, l'ensemble des matériaux utilisés pour l'élaboration du béton réfractaire fibré à base des déchets des briques réfractaire, ainsi que leur caractéristique et leur mise en œuvre.

Dans ce chapitre, nous décrivons les techniques expérimentales relatives à la caractérisation physiques et mécaniques contexte de la gestion des déchets réfractaire ; ainsi le recyclage et la réutilisation de ces déchets dans le béton.

L'objectif est de valoriser les déchets réfractaires et les réutiliser comme granulats, cette idée nous permet d'obtenir un béton moins cher ainsi que de penser à l'environnement, d'autre part, analyser les résultats obtenus de l'incorporation des fibres à différente teneur, cette dernière assure au béton la rigidité comme caractéristique mécanique.

Nous avons au total quatre familles de béton :

- Les essais primaires ;
- Le béton réfractaire sans fibre (béton témoin) BR ;
- Les bétons avec les fibres d'acier BRFA ;
- Les bétons avec les fibres de verre BRFV.

Le dosage en fibre est de 1 % et 1,5 %, avec l'utilisation d'adjuvant réducteur d'eau avec un dosage de 1% selon les précautions de la fiche technique moins de 1,5%, l'utilisation de fumée de silice comme à aditif à l'objectif d'augmenté la résistance, le ciment utilisé est de ciment réfractaire impose des conditions d'utilisation, tous ces précautions nous Guider à formuler un béton réfractaire ainsi que des résultats des articles de recherche.

La confection des éprouvettes est réalisée au sein du laboratoire d'université de Bouira, « labo génie civil », le traitement thermique aux niveaux de laboratoire de recherche science naturelle et de la vie (SNV).

### **IV.1. Caractérisation des matières premières**

#### **IV.1.2. Le ciment**

Conforme à la norme « NF EN 14 647 »

Le ciment utiliser figure IV.1 est un produit issu d'importation, est commercialisé sous le nom Electroland fabriqué par moulins industrielle.

Les tableaux IV.1 et IV.2 suivant résumant les caractéristiques de ce ciment :

**Tableau IV. 1 :** Composition minéralogique du ciment.

Les composants	Le %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41,5
CaO	38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,5
FeO	4.5
SiO <sub>2</sub>	3

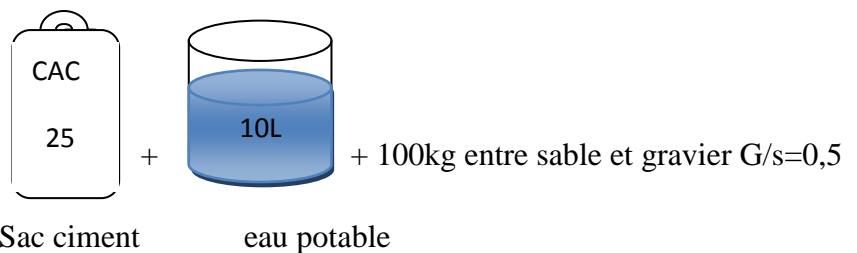
**Tableau IV. 2 :** Les caractéristique phtisique est mécanique selon la fiche technique.

	Propriétés	Valeurs
Caractéristique physique	surface spécifique de Blain (SSB)	3300 cm <sup>2</sup> /g,
	Début de prise	200 min
	Fin de prise	220 min
	La masse volumique	3,2 (g/cm <sup>3</sup> )
Caractéristique mécanique	La compression à 6h	55 MPa
	La compression à 24h	70 MPa



**Figure IV. 1:** Sac de ciment utilisé CAC 25 Kg de type E.

La mise en œuvre du béton réfractaire à base de ce ciment doit tenir compte des informations contenu dans l'annexe A de la norme précédente.



**Figure IV. 2 :** Précaution exigée dans le sac.

#### IV.1.3. La masse volumique Apparent

On prend un récipient gradué, avec une prise de volume égale à 31.31Cm<sup>3</sup>, puis remplir le récipient de ciment à l'aide d'un entonnoir, et de raser le fond, on fait peser la tare avec le ciment ainsi que déjà on est taré la masse de la tare seul, enfin on aura la masse de ciment et son volume avec le volume des vide qui occupe, puis la masse volumique st calculée par la relation :

$$\rho = m/v$$

**IV.1.4. La masse volumique absolue**

C'est le même principe utilisé précédemment, la seule différence on utilise le toluène ou lieu de l'eau, afin d'éviter la réaction d'avec de ciment, par là le toluène va occuper tout le volume des vides sans réagir avec ciment. Les résultats des expériences sont représentés dans le tableau IV.3 suivant :

**Tableau IV. 3:** Valeurs de la masse volumique apparente de ciment utilisé.

L'échantillon	01		02		03		La moyenne
La masse volumique apparente :	27.27/31.31	0.87	28.66/31.31	0.92	29.97/31.31	0.96	0.92g/ cm <sup>3</sup>
La masse volumique absolue :	5,8/1,8	3,22	6,91/2,1	3,29	9,65/3	3,21	3,24g/cm <sup>3</sup>

**IV.1.5. La fumée de silice**

Afin de formuler des bétons de haute résistance, une quantité de fumée de silice est introduite dans le mélange. La fumée de silice produit amorphe est un sous-produit de l'industrie du silicium récupéré dans les fumées émises par les fours, elle se présente sous forme d'une poudre plus ou moins grisâtre et extrêmement fine ce qui la rend très volatile sa surface spécifique est estimée entre 200 à 250000 cm<sup>3</sup> /g. Le tableau IV.4 suivant montre les deux classes de fumée de silice en fonction de leurs compositions minéralogiques.

**Tableau IV. 4 :** Types de fumée de silice.

Composition	La classe	
	A	B
SiO <sub>2</sub>	> 85	70-85
CaO	<1.2	Voisin de 20
ρ <sub>absolue</sub>	2,1 à 2,3	2,1 à 2,4

La fumée de silice est composée essentiellement par le dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>). Peut être utilisée par introduction directe dans le mélangeur mais compte tenu de sa volatilité la majorité des utilisateurs l'a densifiée et lui rajoute à un adjuvant superplastifiant.

Il est précisé dans certains que la quantité maximale de fumées de silice doit respecter l'exigence : Fumées de silice/ciment ≤ 0,11.

De même il est recommandé, en présence de fumée de silice dans le béton, d'utiliser un adjuvant réducteur d'eau ou hautement réducteur d'eau afin de faciliter leur dispersion.

Sa haute réactivité augmente l'homogénéité du mélange et réduit la porosité et la perméabilité du béton.



Figure IV. 3 : La fumée de silice.

Le schéma suivant illustre le rôle de fumée de silice dans le béton

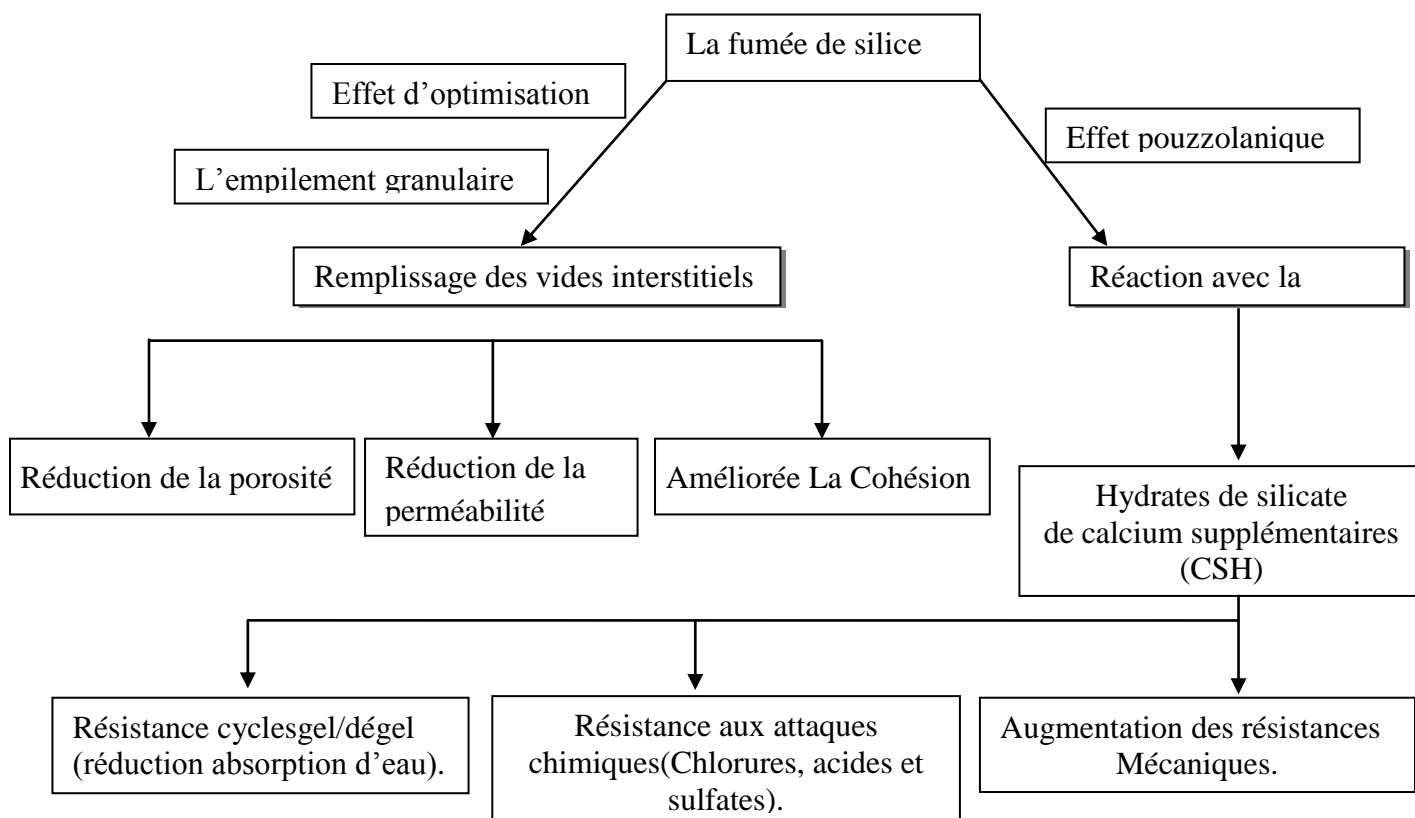


Figure IV. 4 : Combinaison des effets Pouzzolaniques et d'optimisation de l'empilement granulaire de la fumée de silice.

#### IV.1.6. L'adjuvant

L'adjuvant utilisé dans ce travail a acquis l'entreprise Lafarge (zone industrielle Alger), conforme à la norme NF EN 934-2. Le Sika Viscocrete Tempo12 est un superplastifiant réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique. Sa mise en œuvre est effectuée au même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage. En note que la plage d'utilisation recommandée entre 0,2 à 3% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Ainsi que la plage d'utilisation usuelle dans l'intervalle 0,4 à

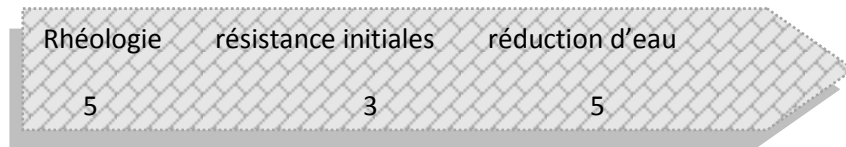
1,5 % du poids du liant ou du ciment, les caractéristiques de l'adjuvant sont résumées dans le tableau

**Tableau IV. 5 :** Caractéristiques technique de l'adjuvant.

Couleur	Liquide brun claire
densité	1,06 ± 0,01
PH	6±1
Teneur en Na <sub>2</sub> O	≤1%
Teneur en ion Cr	≤1%

Cet adjuvant confère au béton les propriétés suivantes :

- Longue rhéologie > 2h.
- Robustesse à la ségrégation.
- Assurer Les trois R :



#### IV.1.7. La fibre de verre

La fibre de verre type E destinée pour les composites de grande diffusion et les applications courantes.

Nous avons utilisé Medisolqui se présente sous forme de feuillets conçus de fils de verre de type E « mat de verre 8/50m » sectionnés à 1 cm±2mm de longueur.



**Figure IV. 5 :** Le mat de fibre de verre.

#### IV.1.8. La fibre d'acier

La fibre d'acier est commercialisée par l'entrepris Arcelor,Wirex 0.3/0.4 x 12.5, Fibres droites ayant une longueur maximum de 1, 2mm (figure IV.6).



**Figure IV. 6 :** La fibre d'acier.

#### **IV.1.9. L'eau**

La qualité de l'eau de gâchage peut avoir une influence sur le temps de prise, le développement des résistances et sur la durabilité du béton, l'eau utilisée pour le gâchage de béton est issue directement de robinet (le pôle universitaire Bouira). Elle est supposée potable (l'eau potable conforme à la Directive européenne DI 75/440/CEE convient d'une manière générale et ne nécessite aucun essai), l'eau utilisée pour le béton doit être conforme aux prescriptions de 4.2, 4.3.1, 4.3.2 et 4.3.3 est l'eau potable distribuée est réputée conforme aux prescriptions du présent document.

#### **IV.1.10. Les granulats**

Les granulats occupent généralement de 60 à 75 % du volume du béton (70 à 85 % de sa masse) et influent fortement ses propriétés, son dosage et son coût, tant à l'état plastique qu'à l'état durci. Les granulats utilisés dans cette étude sont des briques d'un four tunnels de l'usine de cramique de Guelma, cimenterie de Sour EL Ghozlane.

- Des briques réfractaires de magnésie spinelle type MSp80, la matière première principale est la magnésie frittée,
- Des briques riches en alumine type HA75 la bauxite est la matière première,
- Des briques de silico alumine classée comme produit de chamotte Type FC40 riche en argile.

Ces briques sont récupérées après leur fin d'utilisation dans les fours. Nous avons concassé manuellement à l'aide d'un marteau afin d'avoir les gammes voulues.

Le tableau suivant résume les caractéristiques techniques des briques réfractaires utilisé.

**Tableau IV. 6:** Les données sur les briques selon leur fiche technique RHI.

Brique		D'alumine type HA75	Magnésie spinelles type MSP80	Silico alumine Type FC40	L'unité et la norme
La composition chimique	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	82	8	42	%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.8	4.5	1.9	%
	SiO <sub>2</sub>	12.5	0.8	52	%
	TiO <sub>2</sub>	3			%
	MgO		81.2		%
	CaO		1.9		%
	MnO		3.6		%
Les caractéristiques physiques	Densité	2.8	3.01	2,20	[g/cm <sup>3</sup> ] EN 993
	Porosité ouverte	19	17	18,0	[vol%] EN 993
	Résistance à la compr. à froid	80	75	45,0	[N/mm <sup>2</sup> ] EN 993-5
	Affaissement sous charge T0,5	1500	1680	1280	[°C] ISO 1893

#### IV.1.10.1. Préparation des granulats

- ∴ La préparation de la matière première : tout matériaux arrive a sa fin de vie après une durée de service. la même chose pour les matériaux réfractaire façonné ses produit et classé comme des déchets inerte, Déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante ; ne se décompose pas, ne brûle pas, et ne produit aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradable et ne détériore pas d'autres matières avec lesquelles il entre en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine
- ∴ Le concassage par la réduction des dimensions de la matière première manuellement à l'aide d'un marteau ou a l'aide d'un broyeur (figure IV.7).
- ∴ Le criblage c'est le tamisage et la distribution dimensionnelle des grains de la matière obtenue par essais granulométrie, exprimée en pourcentage de masse, passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis
- ∴ Le stockage avant utilisation



Figure IV. 7 : Préparation des granulats.

#### IV.1.10.2. Étude de la compacité max des granulats

D'après Féret a énoncé en 1892 que le choix des agrégats influence sur la résistance de béton, beaucoup des chercheurs ont essayé de retrouver la courbe d'évaluation idéale. Plusieurs méthodes basées sur des modèles d'empilement granulaire ont été proposées pour obtenir des matériaux à forte compacité. Utilisés couramment dans le milieu réfractaire, les modèles proposés par Furnas (1920) et Andreasen (1931) permettent d'obtenir une compacité maximale d'un mélange de poudres. Le modèle de Furnas (équation 1) est basé sur un empilement de grains mono diamètres.

$$\text{Furnas : volume cumulé (\%)} = 100 * \left[ \frac{r^{\log D} - r^{\log D_s}}{r^{\log D_l} - r^{\log D_s}} \right] \dots \dots \dots (1).$$

Où r est le rapport entre les volumes de deux classes granulométriques successives, D<sub>s</sub> et D<sub>l</sub> sont respectivement les dimensions de la plus petite et de la plus grande particule.

Le modèle proposé par Andreasen (1931) est plus simple et se rapproche plus de la réalité, puisqu'il prend en compte un empilement continu de particules (Ensemble continu de particules de tailles variant entre la plus petite D<sub>S</sub> (D<sub>smallest</sub>) et la plus grande D<sub>l</sub> (D<sub>largest</sub>). Cette distribution ne contient aucun "gap" de classe granulométrique, toutes les tailles de particules sont représentées dans le mélange de poudre). Les bétons élaborés à partir du modèle d'Andreasen (équation 2) demandent plus de particules ultrafines de diamètres inférieurs au micromètre. Il conduit à une compaction optimale pour un coefficient n compris entre 0,33 et 0,5. Une augmentation de ce coefficient est assimilée à une pondération plus importante des grosses particules.

$$\text{Andreasen : Volume cumulé (\%)} = 100 * (D^n | D_l^n) \dots \dots \dots (2).$$

Où n est un coefficient caractéristique de la distribution granulométrique compris entre 0,33 ≤ n ≤ 0,5. Plus récemment, les travaux de simulation numérique d'empilement granulaire

réalisés par Funk et Dinger, s'appuyant sur les modèles précédents, ont conduit à une relation prenant en compte le coefficient n d'Andreasen et le diamètre du plus petit grain  $D_s$  de Furnas (équation 3). Ces auteurs n'ont observé que le maximum de compacité du système était atteint pour un coefficient égal à 0,37. Si l'on compare cette approche à celle d'Andreasen, on s'aperçoit que pour un même coefficient, la compacité maximale du système est atteinte pour une quantité de particules ultrafines moins importante que dans le cas d'Andreasen. Cette observation est en accord avec les résultats expérimentaux obtenus par certains auteurs qui ont élaboré leurs matériaux avec un coefficient inférieur à 0,3 en utilisant de la fumée de silice.

En pratique, ces différents modèles théoriques doivent être complétés par des approches expérimentales, en partie basées sur le contrôle de la distribution granulométrique des poudres et sur les propriétés rhéologiques obtenues lors du coulage. En effet, le comportement rhéologique du mélange dépend du coefficient d'Andreasen : un coefficient  $< 0,21$  demandera une énergie et un temps de malaxage élevés, contrairement à un mélange élaboré à partir d'un coefficient  $> 0,31$ . Ainsi, un coefficient intermédiaire  $0,21 < q < 0,31$  est généralement choisi pour l'élaboration des bétons réfractaires. Une distribution basée sur l'empilement d'Andreasen avec un coefficient de 0,26 permet de produire un béton qui pourra être mis en œuvre par plusieurs techniques, vibration, tassement, ou auto-coulable, en changeant simplement la quantité d'eau de gâchage (bétons multifonctionnels) [23].

$$\text{Funk et Dinger : Volume cumulé (\%)} \quad 100 = 100 * \left( \frac{D^q - D_s^q}{D_1^q - D_s^q} \right) \dots\dots(3)$$

$$0,21 \leq q \leq 0,31$$

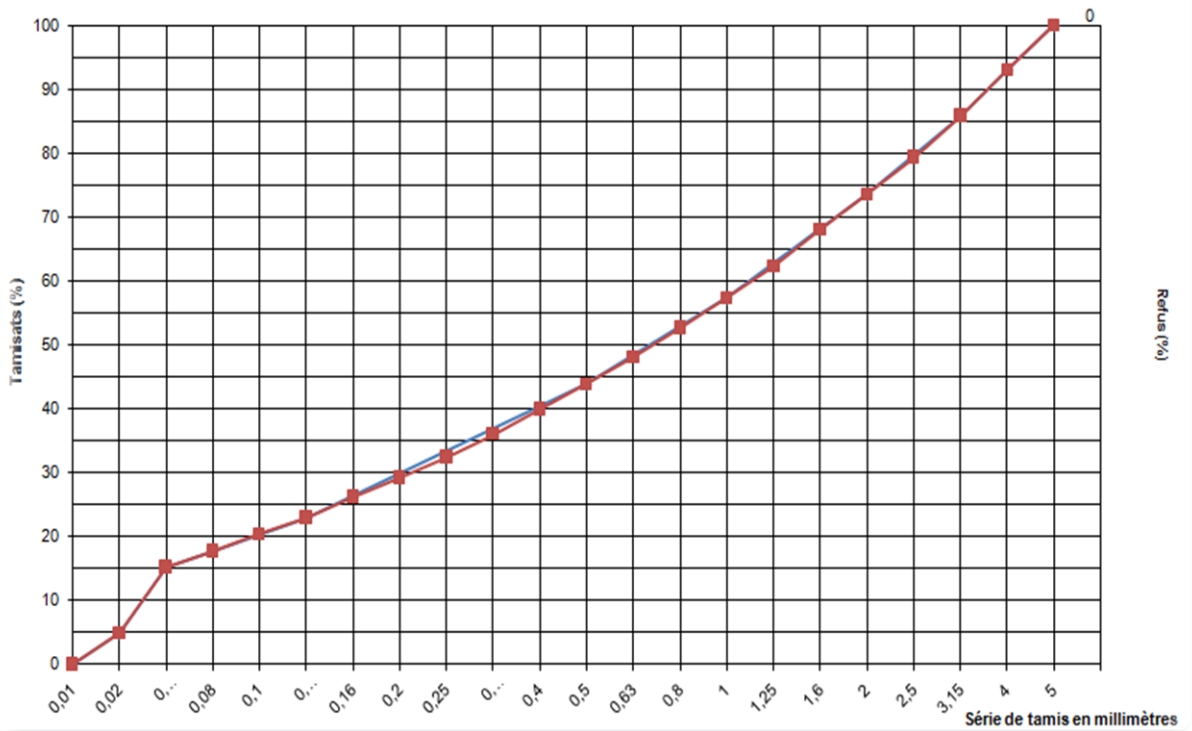
Dans cette étude la courbe granulométrique est basé sur le module d'empilement de Funk et Dinger avec  $q=0,26$  et  $D_1=5\text{mm}$  et  $D_s=0,01\text{mm}$  (le fond de tamis)

**Tableau IV. 1:** Distribution granulométrique (model d'empilement de funk avec  $q=0.26$ ).

D tamis	$q=0,26/\text{tamisat+}$	le refus cml %	refus %
0,01	0	100	0
0,02	4,897904	95,1	4,9
0,063	15,2216323	84,78	10,32
0,08	17,7864149	82,21	2,57
0,125	23,0262943	76,97	5,24
0,5	43,7817154	56,22	20,75
1	57,3255758	42,67	13,55
2	73,5440602	26,46	16,21
3,15	85,8731207	14,13	12,33
4	92,96535	7,03	7,1
5	100	0	7,03

**IV1.10.3. La courbe granulométrique**

L'application de module d'empilement de Funk avec  $q=0,26$  est nécessaire. L'analyse granulométrique des granulats se fait par tamisage suivant la norme NF P 18-560. La figure IV.8, illustre la distribution de la taille des particules des granulats recyclés. Pour déterminer la granulométrie de ces granulats, on utilise des tamis normalisés à mailles carrées. À l'absence d'une tamiseuse qualifiée, le tamisage se refaire manuel pour bien trier les granulats.



**Figure IV. 8 :** Distribution granulométrique expérimental (rouge) et théorique (bleu).

**IV1.10.4. Le module de finesse**

C'est le centième de la somme de refus (exprimé en % de poids) aux tamis de 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5

$$Mf = \frac{\sum \text{refuscumulés}(0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5)}{100}$$

L'application :

$$\frac{\sum \text{refuscumulés}(73.8 + 63.98 + 51.97 + 37.77 + 20.58 + 0)}{100} = 2.48$$

Pour le béton (norme)  $1,8 \geq Mf \geq 3.2$

Un sable conforme à la norme, son module de finesse appartient à la fourchette : MF = 2,2 à 2,8 convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques des ségrégations limité

**Tableau IV. 1:** Détermination du module de finesse selon la norme [EN 12620].

D des tamis	0,01	0,02	0,063	0,08	0,1	0,125	0,16	0,2	0,25	0,315	0,4	0,5	0,63	0,8	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5
q=0,26 le tamisat	0.00	4.90	15.22	17.79	20.33	23.03	26.20	29.24	32.47	36.02	39.92	43.78	48.03	52.70	57.33	62.23	68.00	73.54	79.42	85.87	92.97	100
le refus cml%	100	95.1	84.78	82.21	79.67	76.97	73.8	70.76	67.53	63.98	60.08	56.22	51.97	47.3	42.67	37.77	32.00	26.46	20.58	14.13	7.03	0

Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les séries suivantes : 0.125 - 0.25 - 0.5 - 1 - 2- 4 mm.

$$Mf = \sum \frac{\text{refus cumulés}(0.125-0.25-0.5-1-2-4)}{100}$$

$$\sum \frac{\text{refus cumulés}(76.97+56.22+42.67+26.46+7.03)}{100} = 1.85$$

C'est une caractéristique intéressante dans les bétons. Un bon sable doit avoir un module de finesse d'environ 2.2à 2.8. Au-dessous, le sable à une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau.au dessus, le sable manque de finesse et le béton y perd en ouvrabilité.

**IV.1.10.5. La masse volumique apparente et absolue**

$$\rho = m/v$$

- **masse volumique absolue** : C'est la masse de l'unité de volume absolu du corps, c'est un dire de la matière qui constitué le corps, sans tenir compte du volume des vides.

$$M_{\text{volumique absolue}} = m_{\text{sable}} / \text{volume absolu du sable. } V = V_s + V_v \rightarrow V_s = V_2 - V_1$$

**Principe de l'essai :**

Remplir l'éprouvette avec un volume (V1=140ml) d'eau.

Peser un échantillon sec m<sub>s</sub> .et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.

Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le niveau volume (V2).

Le tableau suivant résume la masse volumique absolue mesurée des différents granulats.

**Tableau IV. 2:** La masse volumique absolue des granulats recyclés.

L'essai/ L'échantillon	01		02		03		04		La moyenne
Silice-alumine	119/40	2,97	121/44	2,75	126/40	1,53	126/46	2,74	2,9
Spinelle de magnésie	155/46	3,36	153/44	3,47	152/44	1,83	151/43	3,51	3,45
Alumine	134/47	2,85	139/46	3,02	139/45	1,67	138/46	3,00	2,98

**- Masse volumique apparente :**

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est un dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

$$M_{\text{volumique apparente}} = m_{\text{sable}} / \text{volume apparent du sable.}$$

**Principe de l'essai :**

On remplit a l'aide d'un entonnoir un récipient (figure IV.9) dont on connaît le volume qui égale à 83 mm, avec prise des précautions d'éviter les phénomènes parasites provoqués par le tassement, à l'aide d'une règle droite ont rasé le surplus, puis on pèse l'échantillon en prenant soin de déduire la masse du récipient la masse de l'échantillon est divisée par le volume du récipient pour avoir la masse volumique apparente du matériau.

Les unités significatives des masses volumiques son le **kg/m<sup>3</sup>** ou la **t/m<sup>3</sup>**



**Figure IV. 9 :** Essai de masse volumique des granulats.

On donne les résultats de mesure obtenus dans le tableau suivant

**Tableau IV. 3:** La masse volumique apparente des granulats recyclés.

L'essai/ L'échantillon	01		02		03		04		La moyenne
Silice-alumine	123/83	1,48	126/83	1,52	127/83	1,53	121/83	1,46	1,50
Spinelle de magnésie	155/83	1,87	153/83	1,84	152/83	1,83	151/83	1,82	1,84
Alumine	138/83	1,66	139/83	1,67	139/83	1,67	134/83	1,61	1,65

\* On remarque que la masse volumique apparente et absolue de spinelle de magnésie est la plus importante ensuite les briques d'Alumine

#### **IV.1.10.6. L'absorption et l'humidité des granulats recyclés**

Déterminé conformément à l'EN 1097-6. Les granulats de béton recyclé sont généralement plus absorbants et moins denses que les granulats ordinaires.

Dans ce travail la détermination de la quantité d'eau contenue dans les granulats, est effectuée par la méthode de la plaque chauffante. Dont on pèse un échantillon de granulats bien saturés et on le fait sécher dans une étuve ventilée, sur une plaque chauffante, ou dans un four à micro-ondes. On peut calculer la teneur en eau du matériau en se basant sur la masse avant et après séchage et en utilisant la formule suivante :  $P = 100 (M-D)/D$ .

Avec :

$M$  = Masse de l'échantillon humide bien saturé

$D$  = Masse de l'échantillon sec

$P$  = l'absorption de l'échantillon, pourcent % (tableau IV.7).



**Figure IV. 10 :** Essais d'absorption des granulats (l'alumine, MG, Silico Al).

**Tableau IV. 7: Absorption des granulats recyclés**

L'échantillon /l'essai	L'humidité	L'absorption
Brique d'AL	3,76 %	28,80 %
Brique d'MG	0,76 %	13,82 %
Silice alumine	1,51 %	20,99 %

Du tableau ci-dessous on constate que les briques de magnésie ont le plus faible taux d'absorption, contrairement à la brique d'Alumine.

## **IV.2.Élaboration d'un béton réfractaire**

### **IV.2.1. Le procédé d'élaboration**

Ce béton a été élaboré au laboratoire pédagogique Génie Civil au niveau de l'université de Bouira en plusieurs étapes, d'abord le mélange manuel à sec pendant une minute (les gros granulats, les fins et le ciment), puis on rajoute les fibres dans le cas de renforcement, puis on ajoute 2/3 de quantité d'eau recommandée pour bien humidifier le béton, ensuite le mélanger pendant 02 minutes afin d'assurer une bonne homogénéisation.

En ajoutant l'adjuvant dans le reste d'eau et la fumée de silice, le mélange pendant 04 minutes.

Le béton ensuite coulé dans des éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  sur la table vibrante plus un compactage à la main pour éviter la formation des bulles d'air, les moules sont conservés dans un bac d'eau pendant 24 heures pour assurer une bonne prise de ciment (assurer la conversion des hydrates du ciment); ensuite on les sèche pendant 48 heures à  $110^\circ\text{C}$  avant cuisson.

### **IV.2.2. Le procédé de cuisson**

La réfractarité est assurée par la cuisson, et la vitesse de montée de la température.

Une montée trop rapide de température ne permettrait pas une bonne évacuation d'eau contenue dans le béton et peut éventuellement provoquer l'explosion de matériau due à une évaporation trop brutale de l'eau qui engendrerait une forte pression dans les pores.

Le procédé de cuisson est schématisé dans la figure IV.11 suivante :

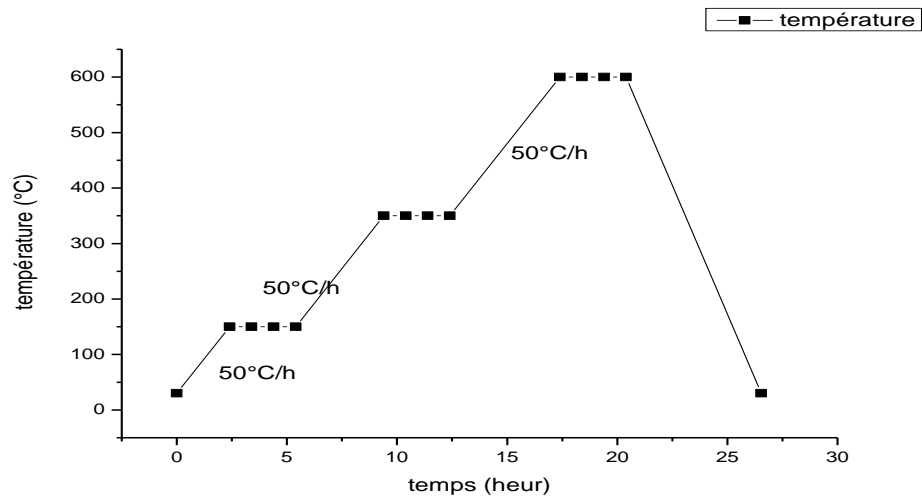


Figure IV. 11 : La courbe de cuisson.

- Le palier 0 à 150°C sert à éliminer l'eau libre inclus dans les pores
- La T° 350°C sert à éliminer l'eau de constitution liée chimiquement pour éviter l'éclatement pendant la cuisson
- Le palier 350 à 600°C permet la déshydratation complète de béton
- Les éprouvettes sont maintenues longtemps (température stable a la fin de chaque palier 3 heures) homogénéisation de traitement thermique.

### Première Formulation

Dans cette partie nous avons élaboré un béton pour un mélange composé des pourcentages 60, 20, 20 % respectivement en Alumine, silico alumine et magnésie, avec un rapport de E/C de 0,4. Pour des éprouvettes de 4\*4\*16

#### IV.2.2.1. Le dosage en eau

Ayan fixé le rapport E/C à 0,4, ainsi que le choit de dosage en ciment « C »est de 400Kg/m<sup>3</sup>, on déduit alors le dosage approximatif en eau :

$$E/C=0,4$$

$$E=400*0.4=160Kg/m^3$$

Si l'on à D < 20 mm, la surface spécifique des granulats augmente, pour une plasticité recommander, il faudra légèrement majorer le dosage en eau.

La correction sur le dosage en eau, peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du tableau IV.8 suivant :

**Tableau IV. 8 :** Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats.

Dimension maximale des granulats en mm	5	8-10	12,5 à 16	20 à 25	30 à 40	50 à 63,5	80 à 100
Correction sur le dosage en eau (en %)	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

La correction selon le Tableau IV.8

$$E_C = E + E \cdot 0.15$$

$$E_c = 160 + (160 \cdot 0.15) = 184 \text{ Kg/m}^3 \text{ (l/m}^3\text{)}$$

Puis que la masse volumique de l'eau égale  $1 \text{ kg/m}^3$ .

**IV.2.2.2. Le dosage en granulats**

$$V = 1000\gamma - c$$

$$c = C / \rho_{\text{ciment}}$$

$$C / \rho_{\text{ciment}} = 400 / 3.24 = 123.45 \text{ m}^3$$

On :  $\rho_{\text{ciment}} = 3.24 \text{ kg/m}^3$

Le coefficient de compacité pour ces granulats  $\gamma$  :

La connaissance de ce coefficient est nécessaire pour calculer les volumes absolus des divers granulats, c'est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matières solide (ciment + granulats) contenues dans un mètre cube de béton.

Les valeurs de  $\gamma$  pour les micros béton ( $D_{\text{max}} \leq 5 \text{ mm}$ ) selon le Tableau IV.9 suivant introduit par Georges Dreux et Festa.

**Tableau IV. 9 :** Valeurs du coefficient de compacité pour les micros bétons.

Consistance	Serrage	Le coefficient de compacité
		D=5mm
Molle	Piquage	0,750
	Vibration faible	0,755
	Vibration normal	0,760
Plastique	Piquage	0,70
	Vibration faible	0,765
	Vibration normal	0,770
	Vibration puissante	0,775
Ferme	Vibration faible	0,775
	Vibration normal	0,780
	Vibration puissante	0,785
Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes Sable roulé et gravier concassé = -0,01 Sable et gravier concassé = -0,03		

Alors Le coefficient de compacité pour ces granulats  $\gamma$  : est de 0,765, il apporte une correction de-0,03 puis que ce sont des granulats concassés issu de concassage des déchets.

$$\gamma = 0,765 - 0,03$$

$$\gamma = 0,735$$

Le dosage en granulats est calculé comme suit :

$$V = (1000 * 0,735) - 123,45 = 611,54 \text{ m}^3 \text{ dans un } 1 \text{ m}^3 \text{ du béton.}$$

Calcule de la fraction pour chaque granulat :

On a 3 type de déchet, ces granulats ayant même courbes granulométrique (même diamètre)

$$\begin{array}{l} \% \longrightarrow 100\% \\ \text{m}^3 \longrightarrow 611,54 \text{ m}^3 \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 60 \% \text{ brique d'Alumine : } 366,924 \text{ m}^3 \\ 20 \% \text{ brique de silico alumine : } 122,308 \text{ m}^3 \\ 20 \% \text{ de brique de magnésie : } 122,308 \text{ m}^3 \end{array} \right.$$

La masse des granulats :  $m = v * \rho_{\text{granulat}}$

$$\left\{ \begin{array}{l} 2,98 \text{ Brique d'Alumine : } 1093,43 \text{ Kg dans un m}^3 \\ 2,9 \text{ brique de silico alumine : } 354,69 \text{ Kg/m}^3 \\ 3,45 \text{ Brique de magnésie : } 421,96 \text{ Kg/m}^3 \end{array} \right.$$

Le tableau suivant montre l'application sur le module d'empilement :

**Tableau IV. 10 :** l'application de module d'empilement sur les granulats

D tamis	FT	0.063	0.08	0.125	0.5	1	2	3.15	4	5
Refus %	4.9	10.32	2.57	5.24	20.75	13.55	16.21	12.33	7.1	7.03
L'alumine	53.58	112.84	28.10	57.29	226.88	148.16	177.24	134.82	77.63	76.87
Silico alumine	17.38	36.60	9.11	18.58	73.60	48.06	57.49	43.73	25.18	24.93
Magnésie	20.68	43.55	10.84	22.11	87.56	57.17	68.40	52.03	29.96	29.66

La quantité d'adjuvant :

$$0,01 * 400 = 4 \text{ Kg/m}^3$$

On est ajouté 1% par rapport au poids de ciment :

La quantité de fumer de silice :

$$0,02 * 400 = 8 \text{ Kg/m}^3$$

On a fixé l'ajout d'additif à 2% :

Pour le renforcement par la fibre en a 2 pourcentages pour chaque fibre :

La fibre d'acier à 1%

$$0.01 \cdot 400 = 4 \text{ Kg/m}^3$$

Pour 1.5% de fibre d'acier

$$0.015 \cdot 400 = 6 \text{ Kg/m}^3$$

Pour 1% de fibre de verre

$$0.01 \cdot 400 = 4 \text{ Kg/m}^3$$

Pour 1.5% de fibre de verre

$$0.015 \cdot 400 = 6 \text{ Kg/m}^3$$

**Tableau IV. 11 : Caractéristiques des bétons élaborés.**

	Béton témoin	1% de la fibre	1,5 % de la fibre
La densité du béton frais	2,466	2,47	2,472
La teneur massique de ciment %	16,22	16,19	16,18
La teneur massique des granulats %	75,83	75,70	75,65

### IV.3. L'économie d'Enterprise

Le cout de béton et essentiel dans le marché,

Sac de ciment réfractaire de 25Kg : 3650 DA

Un mètre (1000 l) cube d'eau : 6 DA

Un sac de 25 Kg de la fumée de silice : 3000 DA

Pour 20 litre d'adjuvant : 7000 DA

La fibre de verre E : 450DA/KG

La fibre d'acier : 250 DA

		1m <sup>3</sup> du béton kg	Le cout d'1m <sup>3</sup> DA
L'E/C=0.4	C	400kg	58400
	E	184	Prix négligeable
La fumée de silice 2%		8kg	960
Le superplastifiant 1% (sika visco crete tempo12)		4kg	875
La fibre d'acier 1%		4Kg	1000
La fibre d'acier 1.5%		6Kg	1500
La fibre de verre 1%		4kg	1800
La fibre de verre 1.5%		6Kg	2700
$\gamma = 0.735$ $\rho_{\text{ciment}} = 3.24 \text{ kg/m}^3$	L'Al 60%	1093.43kg	Gratuit
	Mgo 20%	421.962 Kg	
	SiAl20%	354.693 kg	

Le cout Pour l'élaboration de béton témoin : 60235.55 DA

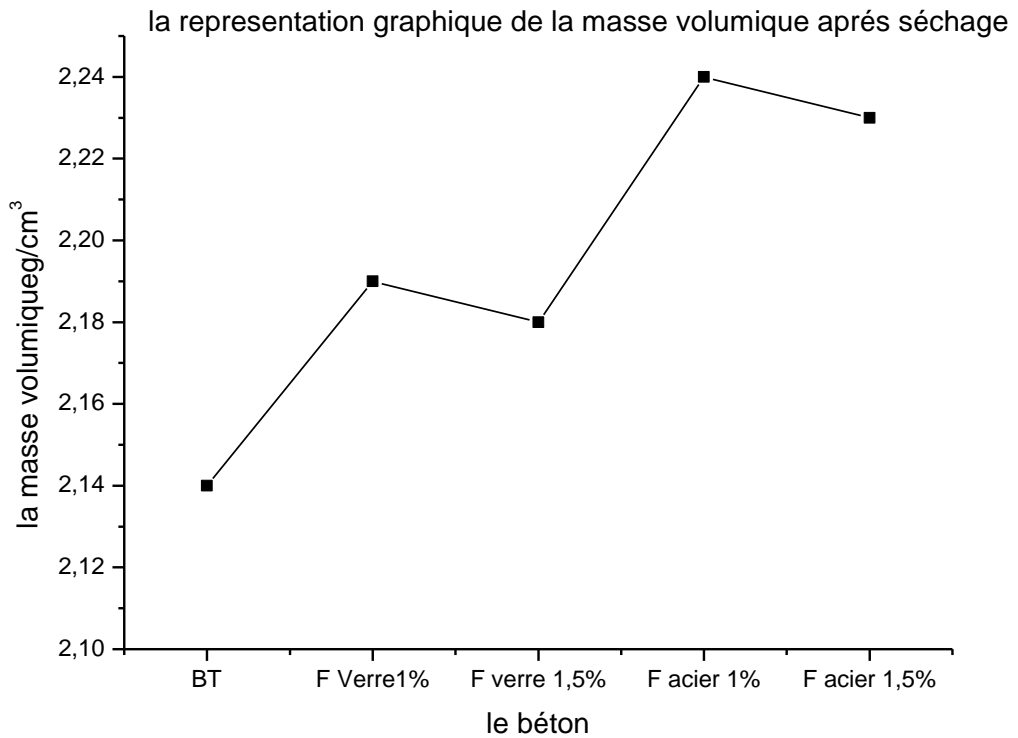
**Tableau IV. 12:**le cout des constituent d'un 1m3 de béton

	Fibre de verre	Fibre d'acier
1%	62035 DA	61235 DA
1.5%	62935 DA	61735 DA

**Tableau IV. 13 :** l'étude de béton selon la masse volumique

L'échantillon	Béton témoin			Fibre de verre 1%			Fibre de verre 1.5%			Fibre d'acier 1%			Fibre d'acier 1.5%		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
La masse après séchage à 110°C	563	535	547	559	559	569	559	548	568	575	594	554	563	594	553
La masse volumique	2.20	2.09	2.14	2.18	2.18	2.22	2.18	2.14	2.22	2.24	2.32	2.16	2.20	2.32	2.16
La moyenne	2.14			2.19			2.18			2.24			2.23		
La masse après cuisson à 600°C	520	530	545	531	534	542	533	523	543	549	568	527	548	560	535
La masse volumique	2.03	2.07	2.13	2.07	2.08	2.11	2.16	2.04	2.12	2.14	2.22	2.06	2.14	2.19	2.09
La moyenne	2.08			2.09			2.11			2.14			2.14		
La chute de la masse volumique en%	2.80			4.57			3.21			4.46			4.03		

La représentation graphique après séchage à 110°



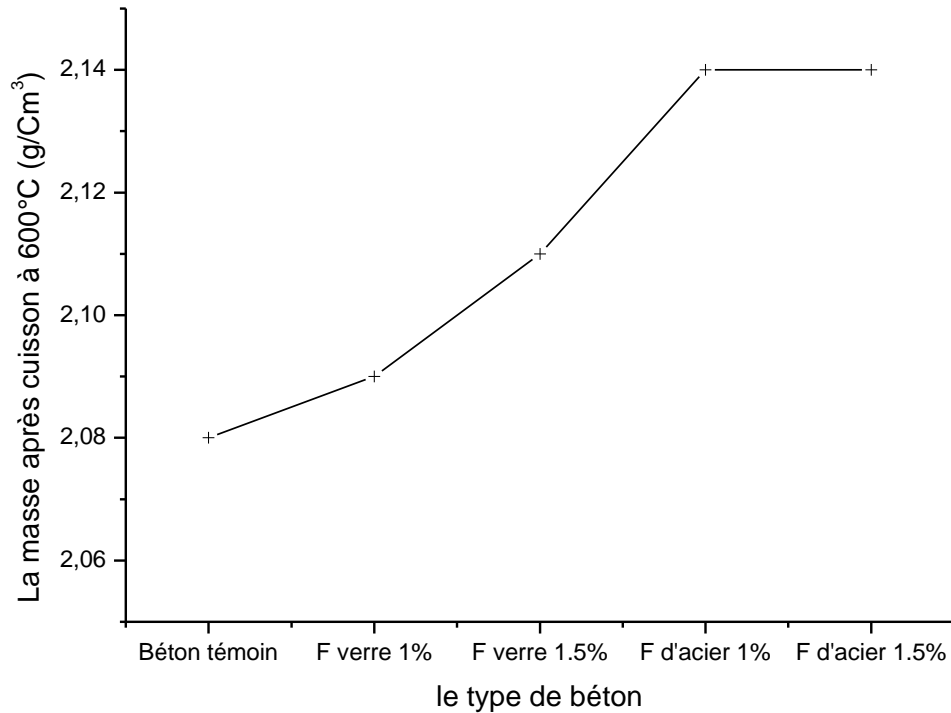
**Figure IV. 12 :** Masse volumique après séchage de béton à 110 °C.

D'après le graphe et le tableau précédent en remarque que :

- La masse volumique de béton avec fibre d'acier est supérieure à celle de béton avec fibre de verre,
- Une différence négligeable 1% de la masse volumique de béton fibré a 1.5 % par rapport à 1%,
- Les masses volumiques des bétons fibré est supérieure à celle de béton témoin.

Ces résultats confirment l'évolution de la masse volumique en fonction de nature des fibres incorporées, cette différence est expliquée par la masse volumique des fibres introduites, ainsi que la diminution de la masse volumique à 1.5% de fibre due à les cavités crée dans le béton a cette dosse.

La représentation graphique de la masse volumique après cuisson à 600°C :



**Figure IV. 13:** la représentation graphique de la masse volumique de béton après cuisson à 600°C.

D'après le graphe que montre la figure IV.13, on remarque une diminution de la masse volumique en fonction du traitement thermique, et une augmentation en fonction de masse volumique de fibre (acier, verre) ainsi en fonction du pourcentage introduit.

La même masse volumique pour les bétons réfractaire a 1 et 1,5%, et légère différence pour les bétons a fibre de verre. Ceci peut être expliqué par l'évaporation de l'eau liée physiquement (séchage à 110°C) et l'eau lie chimiquement (traitement thermique à600°C)

**Modalités d'essai de résistance mécanique :**

Généralement les bétons sont classés selon leurs résistances Cette dernière est souvent influencé par plusieurs facteurs entre autres le rapport E/C, le dosage et la nature de ciment, la nature et les proportions des granulats, les conditions climatiques et de mise en œuvre sans oublier l'influence des ajouts (Fillers, Fibres...).

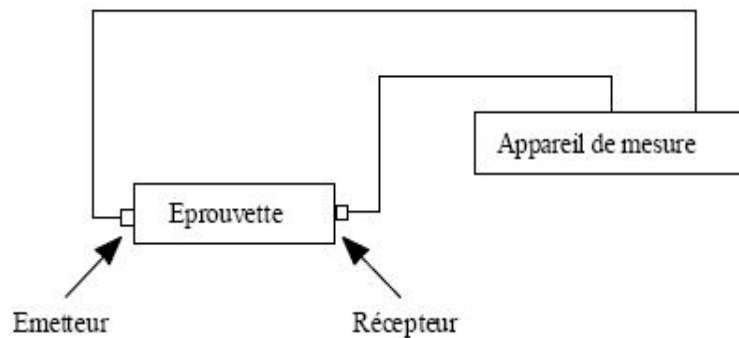
La mesure de la résistance se fait par un essai non destructif « ultrason » permettent de déterminer la vitesse de propagation, et d'autre destructif « flexion et de compression »

permettant de déterminer la contrainte de rupture de traction par flexion et la contrainte de rupture à la compression du béton de ce béton.

### La mesure sur l'ultra son

La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément de la nature et la qualité des composantes et la méthode de mise en œuvre et les contraintes de terrain.

Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée. Les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Comme note, les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air.



**Figure IV. 14** : Appareille de mesure d'ultra son.

Selon NF EN 12504 -4 mai 2005

Classements qualitatifs : selon la classification utilisée par le C.N.E.R.I.B

2500 m/s  $\leq$  V < 3200 m/s béton de faible résistance,

3200 m/s  $\leq$  V < 3700 m/s béton de moyenne résistance,

3700 m/s  $\leq$  V < 4200 m/s béton à haute résistance,

V  $\geq$  4200 m/s béton à très haute résistance

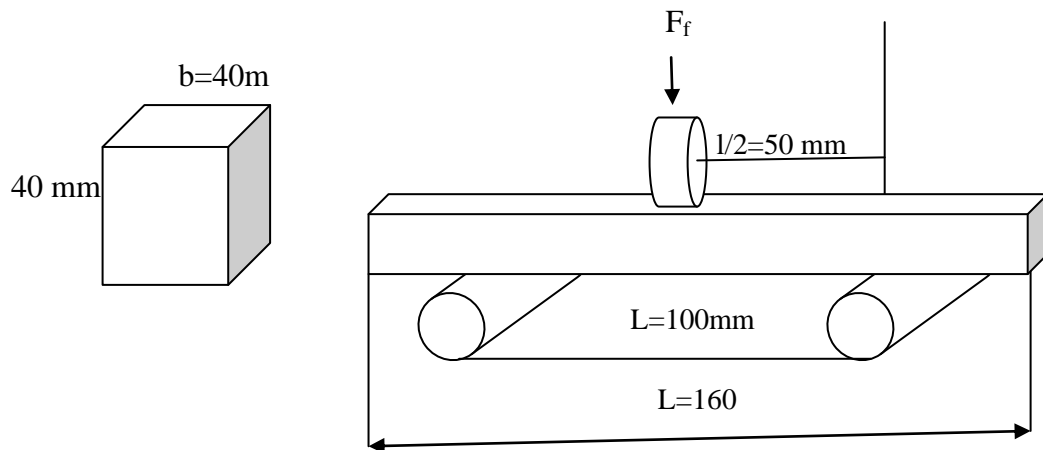
La vitesse d'ultra son :

V=section/lecture \*1000000 (m/s)

### Essais de rupture par flexion

L'essai de flexion : consiste à l'application jusqu'à rupture d'une charge à vitesse constante sur les éprouvettes. La vitesse d'accroissement de la charge est définie par la norme en fonction du type de matériau. Dans notre cas, elle est fixée à 0,15 MPa/s.

Cet essai est établi suivant la norme EN 196-1. Un dispositif à rouleau utilisé en flexion (3 points), comportant deux appuis à rouleau distant de 100mm ou sur lesquels repose l'éprouvette prismatique 40\*40\*160 mm, et un troisième rouleau équidistant des deux premiers, transmettant une charge concentrée.



**Figure IV. 15 :** Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (3 points)

La résistance à la flexion est calculée selon l'équation suivante :

$$R_f = (1.50 \cdot F_f \cdot l) / b^3$$

$R_f$  : Résistance à la flexion en (MPa);

$F_f$  : Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N);

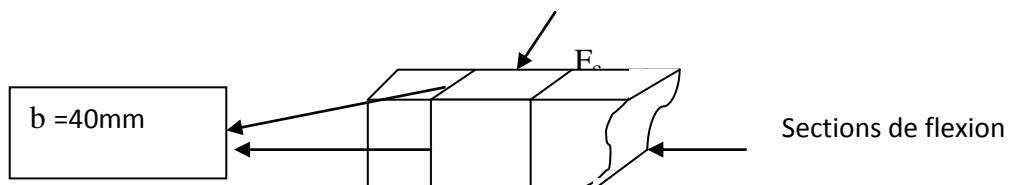
$l$  : Longueur qui sépare les deux appuis en (mm);

$b$  : Côte de l'éprouvette est égal à 40 mm;

$L$  : Longueur totale de l'éprouvette.

### Essai de rupture par compression :

Exécuté avec une presse pour matériaux durs, sur les demi-éprouvettes provenant de l'essai précédent. Chaque demi-prisme est essayé en compression sur ces faces latérales de moulage sous une section de 40x40mm, entre deux plaques de métal dur.



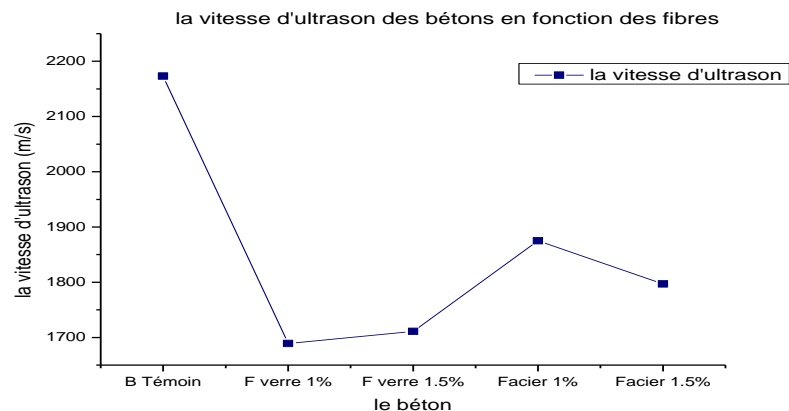
**Figure IV. 16 :** Dispositif d'essai de compression.

**Tableau IV. 14** : les résultats de caractérisation

L'échantillon	Béton témoin			Fibre de verre 1%			Fibre de verre 1.5%			Fibre d'acier 1%			Fibre d'acier 1.5%		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
La lecture	74.8	72.6	73.3	98	94.7	91.7	94.6	101.6	85.7	94.5	77	86.3	88.8	87.6	90.8
La vitesse d'ultra son m/s	2140	2200	2180	1632.65	1689.54	1744.82	1691.33	1574.80	1866.97	1693.12	2077.92	1853.99	1801.80	1826.48	1762.11
La moyenne	2173.33			1689.00			1711.03			1875.01			1796.79		
La contrainte à la flexion MPa	1.4	2.4	1.8	1.5	1.2	1.2	1.2	1.4	1.3	1.4	1.7	1	1.1	1.8	1
La moyenne	1.86			1.3			1.3			1.37			1.3		
La contrainte à la compression MPa	17.7	18.6	23.9	17.5	15.3	17.8	18	16.2	16.9	20.85	23	15.8	20.7	19	17
La moyenne	20.06			16.86			17.03			19.88			18.9		

**La représentation graphique**

La vitesse d'ultrason :



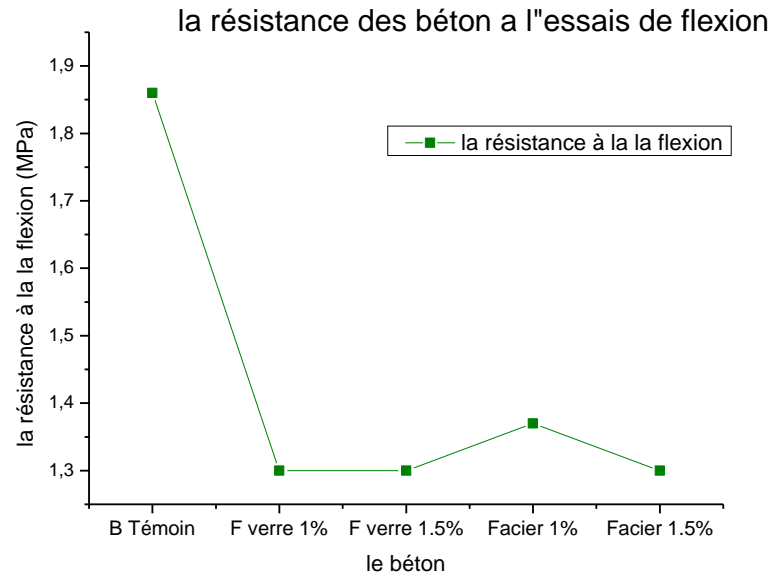
**Figure IV. 17** : la représentation graphique de la vitesse d'ultrason.

**L'interprétation des résultats** On observe que d'après la représentation graphique que les vitesses de propagation d'ultrason dans un béton fibré inférieure à celle de béton témoin, ainsi qu'elles sont inférieures à celle de la classification de C.N.E.R.E.B.

Les vitesses de propagation d'ultrason sont meilleures pour 1% en fibre d'acier 1,5 % fibre de verre,

Cela à cause de la disposition de la fibre et leurs natures dans les éprouvettes, et la porosité de béton (fermé et ouvert).

**La rupture par flexion 3 points :**



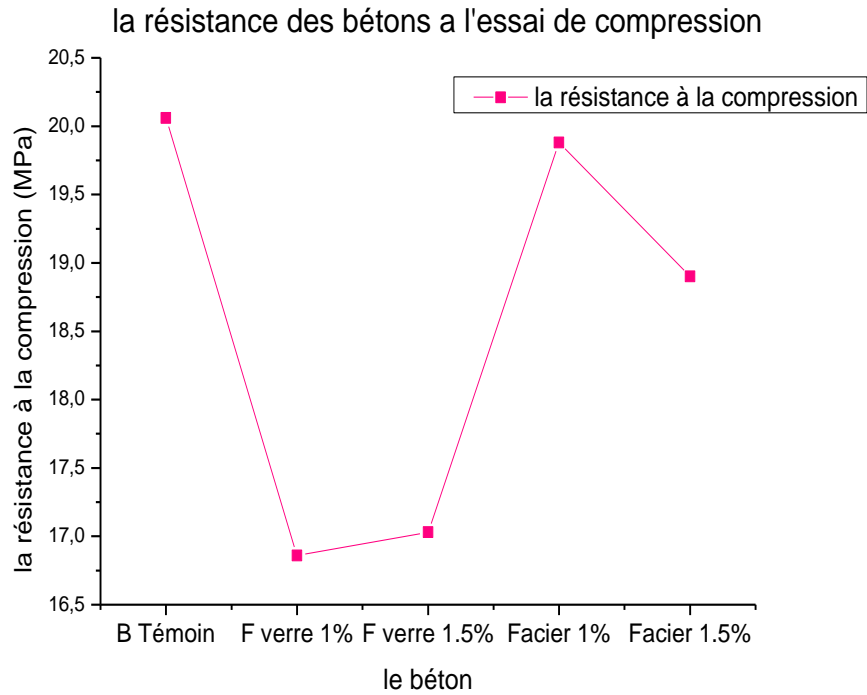
**Figure IV. 18 :** La représentation graphique d'essai de flexion 3 points.

L'interprétation de résultats

Les résultats d'essai mécanique par flexion trois points s'avèrent contradictoires à la littérature par le fait que l'introduction de la fibre dans les éprouvettes fait chuter les résistances en flexion, cela peut être à la réalisation de l'essai avec des moyens pédagogiques et non de recherche (réalisation de l'essai en utilisant des capteurs de déplacement), ou cela peut être expliquer par la distribution des fibres dans les éprouvettes, ainsi leurs longueurs.

Par ailleurs le traitement thermique à 600 C° peut aussi être un paramètre qui n'a pas assuré une bonne cohésion de la matière, il est recommandé de refaire le traitement thermique des éprouvettes à des températures élevées puis refaire les essais mécaniques par flexion trois points.

**La rupture par compression :**



**Figure IV. 19 :** la représentation graphique de résultat de rupture par essais de compression  
Interprétation des résultats

**L'interprétation :**

D'après les histogrammes des essais de compression sur des éprouvettes de  $4*4*16 \text{ cm}^3$ , on remarque une légère diminution des valeurs de résistances mécaniques en compression des éprouvettes avec fibres de verre et d'acier et avec la variation du pourcentage de fibres introduit, par apport au béton témoin

La comparaison en termes de fibres, les meilleures résistances à la compression sont obtenues pour 1% en fibre d'acier 1,5 % fibre de verre,

**Deuxième Formulation :**

Dans cette partie nous avons élaboré un béton pour un mélange composé des pourcentages 40, 40, 20 % respectivement en Alumine, silico alumine et magnésie, avec un rapport de E/C de 0,6., avec ajout de fumée de silice. Pour des éprouvettes de 4\*4\*4 afin d'étudier la compression.

**Tableau IV. 15 :** le dosage pour le béton deuxième formulation

Ep 4*4*4		Pour 1m <sup>3</sup> du béton kg	Sans Fumé Silice	Présence de Fumé
L'E/C= 0.60	C	400kg	25.6g	25.6g
	E	277.75	17.77g	16.64g
La fumée de silice 7.5%		30kg	0 g	1.92g
Le superplastifiant 2% (chryso optima 220)		8kg	0.512g	0.512g
$\gamma = 0.735$ $\rho_{\text{ciment}} = 3.24 \text{kg/m}^3$	L'Al 40%	709.37 kg	45.39g	45.39g
	SiAl 40%	728.93 kg	46.65g	46.65g
	MgO 20%	421.96kg	27.00g	27.00g
Contrainte de compression en Mpa à 600°C/30°C			40	32



**Figure IV. 20 :** les deux éprouvette 4\*4\*4 après cuisson à 600°C et l'ors de caractérisation

**L'interprétation :**

D'après les résultats des essais de compression sur des éprouvettes de  $4*4*4\text{ cm}^3$ , la résistance à la compression des bétons réfractaires à base des granulats recyclés diminue en présence de fumée de silice.

Une augmentation très importante de la résistance à la compression des bétons réfractaires à base des granulats recyclés en augmentant le rapport E/C.

En résumé à notre analyse et interprétation, la littérature d'après Steven [24]. L'absorption des granulats recyclés est généralement comprise entre 3 % et 10 % en fonction du type de béton qui a été recyclé. L'absorption augmente progressivement avec la diminution de la taille des particules. À cause de l'absorption élevée des granulats recyclés, on doit utiliser un dosage en eau plus élevé pour obtenir une maniabilité et un affaissement comparable à ce qui avait été obtenu avec des granulats conventionnels. Les granulats recyclés secs peuvent absorber de l'eau pendant et après le malaxage

## **Conclusion Générale**

Le travail présenté dans ce mémoire a fait l'objet l'étude d'introduction de fibres de verre et d'acier avec différents pourcentages dans des éprouvettes normalisées de bétons réfractaires à base de déchets issus de briques réfractaires de la cimenterie de Sour El Ghouzlane de Bouira et de l'usine Céramique de Guelma.

L'étude expérimentale nous a permis d'effectuer des essais de contrôle de qualité de l'ensemble des constituants du béton réfractaires utilisé dans ce travail, à savoir les granulats et le ciment réfractaires.

Les déchets réfractaires utiliser dans ce travail ont été traité par différents opérations, jusqu'à l'obtention de granulats répondant au modèle théorique qui donne une compacité maximale.

Le béton réfractaire obtenus sans aucun renforcement résulte de l'approche du module s'empilement, également montre une bonne résistance mécanique, sans tenir compte de la minéralogie des déchets.

Les résultats d'essais physico-mécaniques sur les éprouvettes de bétons élaborer en fonction du pourcentage d'introduction de fibres, s'avère acceptable de point de vue physiques, par ailleurs les essais mécaniques réaliser par flexion trois points s'avère contradictoire par rapport aux résultats de la littératures pour des granulats neufs, chose qui nous laisse à revoir plusieurs part les essais mécaniques réaliser par essais de compression ont montré un effet non significatif par comparaison au béton témoin.

Par ailleurs, la pris en charge du déchet réfractaires s'avère possible en Algérie, ce qui permet de réduire les quantités de déchets issus d'industrie de ciment et de céramique en aval, ce qu'est intéressant de point de vu réduction de l'impact environnemental, que face à cela notre pays s'est engagé dans ce sens au sommet mondial sur l'environnement à Paris en 2016.

Ce travail qui traite la possibilité de renforcer les bétons réfractaires à base de granulats issus de déchets de briques réfractaires de l'unité de production de ciment, s'avère un début qui ouvre d'autres réflexions sur l'aspect technique de la chose, entre autres la distribution et la nature des fibre, aussi le traitement thermique des bétons élaborer.

## **Perspectives et Recommandations**

Ce travail est en phase de début, qui mériter d'être complété par plusieurs aspects :

- L'introduction d'autres fibres ;
- L'étude de la distribution de ses dernières afin de confirmer l'effet d'ajout de fibre dans les bétons réfractaires ;
- Possibilité d'étudier l'effet du rapport E/C avec ajout de superplastifiants ;
- L'étude de l'effet du traitement thermique avec des températures supérieures à 1000 C°.
- Réalisation des essais mécaniques sous contraintes thermiques, afin de voir le comportement réel du béton réfractaire dans les conditions d'utilisation.
- Prévoir une étude technico-économique sur la valorisation des déchets réfractaires en Algérie.

## **Références Bibliographiques**

- [1] : Thèse de doctorat (contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen), Sidi Mohammed el amine Boukli Hacene , 2009-, 200 pages.
- [2] : La norme française XP P 18-303, août 1999.
- [3] : Livre : Nouveaux Guide du béton et de ses constituants, Georges Dreux et Jean Festa huitième édition 1998, troisième tirage 2007, 512page.
- [4] : Livre : Dosage et contrôle des mélange de béton, septième édition canadienne ; par Steven H et al 2004 , « chapitre17 » Béton à hautes performances (BHP) p279-313
- [5] :Article rédigé dans le cadre de la Guidance technologique NeoCrete 'Nouveaux bétons spéciaux', subsidiée par le SPW N. Cauberg, ir., chef du laboratoire Structures, CSTC J. Piérard, ir., chef adjoint du laboratoire Technologie du béton, CSTC B. Parmentier, ir., chef de la division Structures, CSTC.
- [6] : mémoire magister (Élaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires), Bouali Khaled, Université m'hamed Bougera-Boumerdes, 2014 ,109 Page.
- [7] : Thèse doctorat (Propriétés mécaniques et durée de vie de bétons réfractaires), Frédéric Thummen, 2004, Université de Lyon, N° d'ordre : 04 ISAL 0027, 165Page.
- [8] : Thèse doctorat (Comportement thermomécanique d'un béton réfractaire : effets du renforcement par des fibres minérales), Aurélien Mazzoni, 2009, Université de Toulouse 3, 248Page.
- [9] : Les céramiques réfractaires l'élaboration aux propriétés d'emploi, Jacques Poirier Université d'Orléans, Polytech' Orléans, 2011, Verres Céramiques & Composites, Vol. 1, N°2 (2011) 28-42.
- [10] : Thèse doctorat option matériaux céramique et traitement de surface (comportement thermomécanique et traction de béton réfractaire : influence de la nature des agrégats et de l'historique thermique), Mahdi Ghassemi Kakroudi, 2007, Université de Limoges, 174page.
- [11] : Thèse doctorat option mécanique de précision (Élaboration et caractérisation thermomécanique de réfractaires à base de kaolin dd3), Kolli Mostafa, 2008, Université Ferhat Abbas- Setif ,175 page.

## *Références Bibliographiques*

---

[12] : Mémoire de magister option le béton structurel Arme et précontrainte (comportement de béton a base de granulats recycles), Saadani Sabrina, 2006, Université Mentouri Constantine, 132 page.

[13] : Thèse doctorat option mécanique et énergétique (séchage de béton réfractaire : expérimentation, modélisation, et l'influence d'ajout de fibre polymère), Brice Collignon, 2009, Université de Nancy INPL, 219 page.

[14] : Livre : La durabilité des bétons, Jean-Pierre OLLIVIER et Angélique VICHOT, chapitre 14 (La durabilité des bétons d'aluminates de calcium) H. Fryda, F. Saucier, S. Lamberet, K. Scrivener, D. Guinot, Page 767-824.

[15] : Fiche commerciale référence FC-CF GE-FR-LAF, aout 2006, ciment Fondu®, Bâtiment, Travaux publics, Industries

[16] : Travaux de réfection dalle utilisant un ciment alumineux chantiers des autoroutes A6(Saprr), A4 (Sanef ) et Al(DDE93,L .Baroin, P. Boulanger, D. Chambon, J. F. Guillaume.

[17] : Thèse doctorat option mécanique – génie civil (incidence du renforcement a l'aide de plaques en matériau composite sur le comportement diffère du mortier), Fouzia Khadraoui, l'institut national des sciences appliquées de Rouen, 2009,113page.

[18] : article Fibres de carbone, Guy Dupupet.la date de publication 10/04/2008 technique de l'ingénieur , référence AM5134

[19] thèse de doctorat djebali said, thème caractérisation des éléments de structures en béton de fibre métallique .le 22/06/2013

[20] : mémoire de magister option structure et matériaux (caractérisation en statique du comportement en traction direct de béton arme de fibre en copeaux ), Makhoulf née CHERGHUI Nadia, Université Mouloud Mammeri de Tizi -ouzou ,2010, 82 page .

[21] : article (comportement mécanique de béton réfractaire fibré ), N. Donval université de Toulouse,17ème journées nationale sur les composite 2011, Poitiers France ,12 page

[23] : Thèse de doctorat Matériaux Céramiques et Traitements de Surface (élaboration et caractérisation a haute température de bétons réfractaires a base d'alumine spinelle), Jean-Michel AUVRAY, Université de Limoges, 2003, 182page.

[24] : Livre : dosage et contrôle des mélange de béton, septième édition canadienne ; par Steven.H et al, 2004, « chapitre 05 » Granulats du béton page 79-105.

# RHI

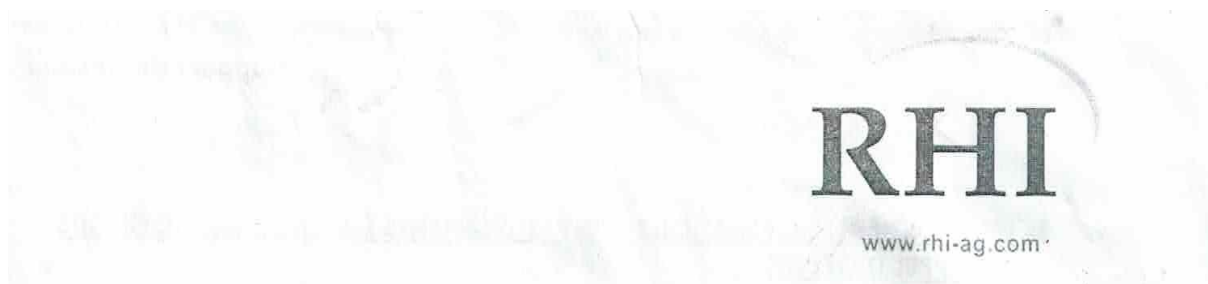
[www.rhi-ag.com](http://www.rhi-ag.com)

## RESISTAL B80Z

Informations générales	
Classification	Produit riche en alumine Type HA75 ISO 10081-1
Matière première principale	Bauxite
Type de liaison	céramique
Mortier à utiliser	RESIMUR B78V-07

Analyse Chimique			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
82.0%	1.8%	12.5%	3.0%
Détermination sur substance recuite (1025 °C / 1877 °F) suivant EN ISO 12677			

Caractéristiques physiques			
Densité		2.80	[g/cm <sup>3</sup> ] EN 993-1
Porosité ouverte		19.0	[vol%] EN 993-1
Résistance à la compr. à froid		80.0	[N/mm <sup>2</sup> ] EN 993-5
Variation perm. lin. (1500 °C / 2732 °F)		2.80	[%] EN 993-10
Affaissement sous charge T <sub>0,5</sub>		1500	[°C] ISO 1893
Résistance au fluage Ta		1520	[°C] IS 1528-2
Choc thermique à leau		> 30	[cycles] DIN 51068-1
Conductivité therm.	500 °C / 932 °F	2.70	[W/mK] DR. KLASSE
	750 °C / 1382 °F	2.65	[W/mK] DR. KLASSE
	1000 °C / 1832 °F	2.65	[W/mK] DR. KLASSE
Abrasion		15.00	[cm <sup>3</sup> ] ASTM C704 calibrated



## MAXIAL 42

Informations générales	
Classification	Produit de chamotte Type FC40 ISO 10081-1
Matière première principale	Argile
Type de liaison	céramique
Mortier à utiliser	DIDOMUR F46V-05

Analyse Chimique					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>			
42.0%	1.9%	52.0%			
Détermination sur substance recuite (1025 °C / 1877 °F) suivant EN ISO 12677					

Caractéristiques physiques			
Densité	2,20	[g/cm <sup>3</sup> ]	EN 993-1
Porosité ouverte	18,0	[vol%]	EN 993-1
Résistance à la compr. à froid	45,0	[N/mm <sup>2</sup> ]	EN 993-5
Variation perm. lin. (1300 °C / 2372°F)	0,70	[%]	EN 993-10
Affaissement sous charge T <sub>0,5</sub>	1280	[°C]	ISO 1893



www.rhi-ag.com

## ANKRAL XE

### Informations générales

Classification	Produit de magnésie spinelle Type MS080 ISO 10081-2
Matière première principale	Galaxite, Magnésie frittée
Type de liaison	céramique
Type de brique	cuit
Mortier à utiliser	ANKERFIX NS60

### Analyse Chimique

MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO
81.2%	8.0%	4.5%	1.9%	0.8%	3.6%

Détermination sur substance recuite (1025 °C / 1877 °F) suivant EN ISO 12677

### Caractéristiques physiques

Densité	3.01	[g/cm <sup>3</sup> ]	EN 993-1	
Porosité ouverte	17.0	[vol%]	EN 993-1	
Résistance à la compr. à froid	75.0	[N/mm <sup>2</sup> ]	EN 993-5	
Dilatation thermique	500 °C / 932 °F	0.52	[%]	EN 993-19
	750 °C / 1382 °F	0.86	[%]	EN 993-19
	1000 °C / 1832 °F	1.21	[%]	EN 993-19
Affaissement sous charge T <sub>0.5</sub>	1680	[°C]	ISO 1893	
Résistance au fluage Ta	> 1700	[°C]	DIN 51064	
Choc thermique à l'air	> 100	[cycles]		
Conductivité therm.	500 °C / 932 °F	3.20	[W/mK]	DR. KLASSE
	750 °C / 1382 °F	2.80	[W/mK]	DR. KLASSE
	1000 °C / 1832 °F	2.50	[W/mK]	DR. KLASSE

Ciment réfractaire

Clinker: 100 %					
Valor habitual	Especificación	Valor habitual	Especificación	Valor habitual	Especificación
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 41,5%	35%≤Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ≤58%	FeO 1,9%	-	S <sup>2-</sup> 0,02%	≤0,10%
CaO 38,1%	-	SiO <sub>2</sub> 3,7%	-	SO <sub>3</sub> 0,01%	≤0,5%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 13,2%	-	Cl <sup>-</sup> 0,01%	≤0,10%	Álcalis 0,14%	≤0,4%
Valor habitual	Especificación	Valor habitual	Especificación		
Resistencia compresión 6h(MPa): 55	≥18,0	Resistencia compresión 24h(MPa): 75	≥40,0		
Tiempo inicio fraguado (min): 200	≥90	Tiempo fin fraguado (min): 220	≤720		
Superficie específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g): 3200					
Características adicionales:					
Componente mineralógico mayoritario: CaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>			Cono Seger: 9 (1315°C)		
Componentes mineralógicos secundarios: Ca <sub>2</sub> FeAlO <sub>5</sub> , Ca <sub>12</sub> Al <sub>14</sub> O <sub>33</sub> , β-Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , Ca <sub>3</sub> TiFe <sub>2</sub> O <sub>8</sub> , FeO					
Granulometría láser D (v,0.9)(μm) inferior a 70 micras					
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> ): 1,1			Peso específico (g/cm <sup>3</sup> ): 3,2		

# MEDAPLAST HP

Conforme à la norme NFP 18-502

Ajout à base de micro silice

## DESCRIPTION

Le MEDAPLAST HP est un ajout en poudre pour confection de bétons à hautes performances (BHP). Il permet :

- D'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées
- D'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques

## DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Autoroutes, pistes d'aéroport
- Ouvrages d'art, ouvrages hydrauliques
- Bétons très sollicités
- Bétons soumis aux impacts et aux chocs
- Bétons soumis à des milieux agressifs
- Sols industriels
- Silos

## PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST HP permet :

### Sur béton frais :

- Améliorer la cohésion
- Éviter le ressuage et la ségrégation

### Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques
- Obtenir des bétons possédant une excellente imperméabilité
- Augmenter la résistance à l'érosion et à l'abrasion
- Obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques
- Augmenter la durabilité du béton

L'ajout d'un superplastifiant est recommandé (MEDAPLAST SP, SP40) afin d'améliorer la fluidité du béton et de diminuer le rapport E/C. Le béton obtenu, une fois appliqué, ne présente aucun ressuage.

## CARACTÉRISTIQUES

- Aspect ..... Poudre
- Densité ..... 0,5
- Densité absolu.....  $2.3 \pm 0.1$
- Composants :
  - SiO<sub>2</sub>..... > 85(%)
  - SO<sub>3</sub> ..... < 2,5 (%)
  - Cl- ..... < 0,2 (%)
- Surface spécifique..... > 15 (m<sup>2</sup>/gr)
- Humidité par étuve à 105°C ..... < 1 (%)
- Taille des particules ..... < 0,1 (microns)

## MODE D'EMPLOI

Le MEDAPLAST HP est mélangé à sec avec les composants du béton, avant l'ajout de l'eau de gâchage, pendant 1 minute au moins. Après ajout de l'eau de gâchage mélanger encore pendant 2 minutes au minimum.

Malaxer ensuite jusqu'à homogénéisation du béton.

Il est nécessaire de procéder à une cure de plusieurs jours du béton obtenu (MEDACURE) surtout par temps chaud ou en présence de vents.

### DOSAGE

Le dosage du MEDAPLAST HP varie de 5 à 10% du poids du ciment. Ce dosage dépend des performances recherchées.

## CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le MEDAPLAST HP est conditionné en sacs de 2 kg et 25 kg . Disponible aussi en Bigbag.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur.

## PRÉCAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : [www.granitex-dz.com](http://www.granitex-dz.com)

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

[www.granitex.dz](http://www.granitex.dz) - E-mail: [granitex@granitex.dz](mailto:granitex@granitex.dz)

# MEDISOL

Mat de verre

## DESCRIPTION

MEDISOL se présente sous la forme de feuillets conçus de fils de verre de type E sectionnés à 50mm de long et liés par émulsion de résine.

## PROPRIETES

- Combustible.
- Très bonne stabilité dimensionnelle.
- No toxique.
- Imputrescible.
- Très bel aspect de surface après peinture
- Faible absorption lorsque le mat reçoit de la peinture.
- Résistant à la traction aux chocs et à l'usure.
- Pose aisée sur tous supports.

## DOMAINES D'UTILISATION

- Généralement dans les systèmes stratifiés à base de résine époxydique, vinyl-ester ou polyuréthane.

## COMPOSITION

- Tissu 100% fibre de verre.

## CARACTERISTIQUES GENERALES

- Masse surfacique moyenne.....450g/m<sup>2</sup>
- Largeur ... .....80 cm
- Longueur .....50 m

## CONDITIONNEMENT

- Livré en mètre linéaire.

## STOCKAGE

- Une année dans son emballage fermé à l'abri de l'humidité et de toute source de flamme ou de chaleur.

*Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.*



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger  
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82  
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23  
www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz

## Fiche technique

### Fibres droites en acier

## Wirex 0.3/0.4 x 12.5

#### Dimensions

Diamètre de la fibre (d)	0.3 – 0.4 mm
Longueur de la fibre (l)	12.5 mm ( $\pm$ 2.00 mm)
Rapport (L/d)	31 – 42

#### Conditionnement

Sachets de papier résistants à l'humidité	
Contenu/boîte	25 kg
Boîtes/palette	20 sacs de 25 kg
Poids/palette	500 kg
Palettes emballées dans une feuille hi-stretch	

#### Composition chimique

- ▶ C  $\leq$  0.05 %
- ▶ S  $\leq$  0.02 %
- ▶ N<sub>2</sub>  $\leq$  0.006 %
- ▶ Mn = 0.20 – 0.25 %
- ▶ Si = 0.02 – 0.04 %
- ▶ P  $\leq$  0,025 %
- ▶ Al : traces

#### Divers

La fibre décrite est conforme aux standards suivants :

- ▶ EN 14889-1 type 1 (fibres en fil d'acier tréfilé à froid)
- ▶ ASTM A820/A820M-04 type 1 (fibres en fil d'acier tréfilé à froid)

## SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.



Construction

**Présentation** SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

**Domaines d'application**

- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplacants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplacants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

**Caractères généraux** SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- longue rhéologie (>2h),
- robustesse à la ségrégation,
- qualité de parement.



<sup>1</sup>RHÉOLOGIE

<sup>2</sup>RÉSISTANCES  
INITIALES

<sup>3</sup>RÉDUCTION  
D'EAU

5

3

4

### Caractéristiques

**Aspect** Liquide brun clair

**Conditionnement**

- Fûts de 230 kg
- CP de 1000 L
- Vrac

**Stockage** Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 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.

**Conservation** 1 an en emballage intact

### Données techniques

**densité** 1,06 ± 0,01

**pH** 6 ± 1

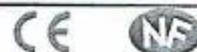
**Teneur en Na<sub>2</sub>O Eq.** ≤ 1 %

**Extrait sec** 30,2 ± 1,3 %



**CHRYSO®Fluid Optima 220**

Plastifiant – Réducteur d'eau

**Descriptif**

CHRYSO®Fluid Optima 220 est un plastifiant – réducteur d'eau à fonction superplastifiant de nouvelle génération à base de polycarboxylate modifié particulièrement recommandé pour le béton prêt à l'emploi et les chantiers de génie civil.

CHRYSO®Fluid Optima 220 est destiné à créer une forte réduction d'eau et/ou une augmentation de l'ouvrabilité du béton. Il permet de réaliser des bétons avec un long maintien d'ouvrabilité sans retard de prise. Ainsi CHRYSO®Fluid Optima 220 peut être utilisé dans une gamme étendue de bétons.

CHRYSO®Fluid Optima 220 est particulièrement adapté à la formulation de bétons auto-plaçants homogènes ayant une capacité de remplissage élevée.

CHRYSO®Fluid Optima 220 est compatible avec la majorité des ciments.

**Caractéristiques**

- Nature : liquide
- Couleur : brun
- Densité (20° C) : 1,05 ± 0,02
- pH : 5,0 ± 1,0
- Teneur en ions Cl<sup>-</sup> : ≤ 0,10 %
- Na<sub>2</sub>O équivalent : ≤ 1,0 %
- Extrait sec (halogène) : 21,6 % ± 1,0 %
- Extrait sec (EN 480-8) : 21,8 % ± 1,0 %

**Conditionnement**

- Vrac
- Tonnelets de 60 L
- Fûts plastiques de 215 L
- Cubitainers de 1000 L

**Conformité**

CHRYSO®Fluid Optima 220 est un plastifiant – réducteur d'eau qui satisfait aux exigences réglementaires du marquage CE. La déclaration correspondante est disponible sur notre site internet.

CHRYSO®Fluid Optima 220 est conforme au référentiel de certification NF 085, dont les spécifications techniques sont celles de la partie non harmonisée de la norme NF EN 934-2.

AFVOR - 11 avenue F. de Pressensé - 93571 Saint-Denis La Plaine cedex - France

**Application****Domaines d'application**

- BPE
- Ouvrages d'art
- BHP - BTHP
- Bétons plastiques à très fluides
- Bétons auto-plaçants

**Mode d'emploi**

Plage de dosage : 0,3 à 2,0 kg pour 100 kg de ciment. CHRYSO®Fluid Optima 220 doit être ajouté de préférence dans l'eau de gâchage.

Dans le cas d'un ajout différé sur le béton frais et dans un camion malaxeur, il est nécessaire de malaxer à grande vitesse 1 minute par m<sup>3</sup> de béton (avec un minimum total de 6 minutes).

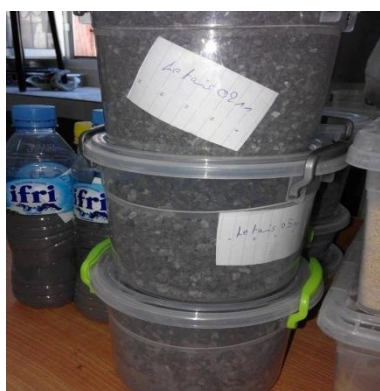
L'efficacité maximale de CHRYSO®Fluid Optima 220 doit être déterminée après des essais de convenance prenant en compte les caractéristiques rhéologiques et les performances mécaniques souhaitées pour le béton.

Selon les applications prévues, il est possible d'utiliser CHRYSO®Fluid Optima 220 en synergie avec d'autres adjuvants CHRYSO®.

**Précautions**

- Stocker à l'abri du gel.
- En cas de gel, le produit conserve ses propriétés une fois dégelé et homogénéisé par agitation.
- Durée de vie : 9 mois.

**Préparation des Matières**



**Éprouvettes de Bétons Réfractaires**

