



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET**  
**POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES**  
**DEPARTEMENT GENIE DES MATERIAUX**

***Mémoire de Fin D'études***  
***En vue de L'obtention du diplôme de Master***  
***Spécialité : Génie des matériaux***  
***Option : Contrôle-Qualité des Matériaux***

***Valorisation des superplastifiants naturels dans les BFUP***  
***à base des déchets de briques réfractaires***

**Réalisé par :**

***M<sup>elle</sup> : MECHIA Aziza***

**Suivi par :**

***Mr : M. Saidi***

***M<sup>elle</sup> : I. Djefour***

***Boumerdès 2016-2017***

## Résumé

Ce travail a pour objectif l'étude de l'effet de l'ajout de déchet des briques réfractaires comme des ultrafines par remplacement total de la fumée de silice ainsi que la possibilité de l'utilisation des adjuvants naturels à la place des adjuvants commerciaux, sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques des bétons fibrés ultra hautes performances.

Les résistances à la flexion et à la compression augmentent lorsqu'on ajoute une quantité de déchet de brique réfractaire (10 à 15 % d'ajout par rapport à la masse de ciment) par rapport au BFUP témoin et l'action de l'adjuvant naturel est comparable à celle de l'adjuvant artificiel avec une quantité d'extrait sec très faible (0,060 g) 32 fois moins faible que celle de l'extrait de l'adjuvant commerciale ,toutes les éprouvettes élaborées à base de déchet de brique réfractaire et de sable des dunes présentent des résistances thermiques importantes (Début de retrait à 1270 C° pour le témoin et 1330 C° pour le BBr 10 %).

**Mots Clés :** bio-polymères, déchet de briques réfractaires, lignine, résistances mécaniques et thermiques.

## Abstract

The aim of this work is to study the effect of addition of waste refractory briks as ultrafine by completely replacing silica fume and the possibilitu of using natural adjuvants instead of commercial additives , on the physico-mechanical and thermal properties of ultra high performance fiber concretes ,The bending and compression strengths increase when an amount of refractory brick waste (10 to 15% addition relative to the cement mass) is added compared to the control BFUP and the action of the adjuvant Natural ration is comparable to that of the artificial builder with a very low solids content (0,060g) which is 32 times less than that of the commercial adjuvant extract , All the specimens prepared from refractory brick waste and sandy sand dunes have significant thermal resistance (starting shrinkage at 1270 for the control and 1330 ° C for the 10% BBr).

**Keywords:** bio-polymers, refractory brick waste, lignin, mechanical and thermal resistances

## ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير إضافة نفايات الطوب الحراري عن طريق استبدال الكلي لغبار السليكا و إمكانية استخدام المضافات الطبيعية بدلا من المواد المساعدة التجارية على الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية و الحرارية للخرسانة الألياف عالية الأداء

تزداد قوة الضغط و الشد عند إضافة كمية من نفايات الطوب الحراري (من 10 إلى 15 بالمائة بالنسبة إلى كمية الاسمنت ) بالنسبة إلى خرسانة الألياف عالية الأداء الشاهد و عمل المساعد الطبيعي مماثلة لتلك التي من المساعدة الاصطناعية مع كمية منخفضة جدا (0,060غرام ) 32 مرة اقل من مستخلص من المواد المساعدة التجارية وجميع العينات التي استخدمت بنفايات الطوب الحراري

و رمل أعطت مقاومة حرارية كبيرة( بداية الانسحاب من 1270 درجة مئوية بالنسبة للخرسانة الشاهدة و 1330 درجة مئوية بالنسبة للخرسانة ذات 10 بالمائة من نفايات الطوب الحراري)

**كلمات البحث** البوليمرات العضوية      نفايات الطوب الحراري      اللجنين      المقاومة الميكانيكية و الحرارية

# Remerciements

*Tout d'abord, je remercie dieu qui m'a donné le courage et la bonne santé pour faire ce travail. Je remercie mes professeurs qui ont contribué à ma formation L M D en particulier :*

*Mr SAIDI mon promoteur.*

*Toutes les personnes de l'unité LH CC D'OUED SM A R en général, Belhadj, H ilel, Driss et A mi A rezki en particulier.*

*Je tiens à remercier également tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour l'aboutissement de ce modeste travail.*

**A Z I Z A M E C H I A**

# ***D é d i c a c e s***

***Je dédie ce modeste travail à :***

***M es chers parents***

***M es sœurs***

***M es frères***

***Touts la famille***

***Toutes les promotions de génie de matériaux,  
particulièrement M CQ15 et M CD 15***

***Et à tous les gens avec qui j'ai passé de très bons  
moments.***

***M echia A ziza***

## Laboratoire de l'habitat et de la construction de centre LHCC

### 1- Présentation de l'entreprise

Le laboratoire de l'habitat et de la construction du centre « **L.H.C.C** » est une filiale du groupe laboratoire national de l'habitat et de la construction « **L.N.H.C** », créée suite à sa restructuration.



Le **L.H.C.C** présente à ce jour une expérience professionnelle de 30 ans dans l'ingénierie géotechnique et de matériaux de la géotechniques des terrassements des fondations et des ouvrages de soutènement grâce à laquelle il s'est rapidement imposée comme un acteur incontournable de la géotechniques, il dispose d'une maitresse globale de toute la chaîne de l'ingénierie géotechnique et de chacun de ses domaines particulière des études à la réalisation des travaux

Le **L.H.C.C** est composé de 6 unités et 2 entités réparties sur la région centre et emploie un effectif de plus de 400 personnes hautement qualifiées dont 45% d'ingénieurs et techniciens pluridisciplinaire

Le **L.H.C.C** s'engage en outre à mettre en œuvre tous les moyens techniques et intellectuelles pour mener à bien toutes les études qui lui sont confiées alliant qualité rapidité d'exécution prix compétitif pour établir une prestation claire précise et complète. Ce qui s'est traduit au cours de toutes ses années d'activités par :

- le renouvellement et l'acquisition de nouvel équipement pour satisfaire une qualité de reconnaissance géotechnique
- l'optimisation de rôle de géotechnicien dans l'acte de construire indispensable pour une meilleure appréhension et maîtrise des risques de sol grâce à la banque de données dont il dispose compose de plus de 50000 études et la bonne adéquation entre les moyennes mis en œuvre et le but à atteindre
- l'établissement de programmes de formation très pointus de personnel

### 2. Domaines d'activités et compétences :

Le **LHCC** intervient un géotechnique du bâtiment en géotechniques des infrastructures de transport (études des sols, projets de terrassements, contrôles techniques des travaux), pour la stabilité des pentes les sols compressible, les fondations des ouvrages d'arts les grands murs de soutènement les ouvrages, Sous-terrains ou pour les risques Natural (falaises, glissement de terrains, gravités souterraines...)

### 3. Etudes géotechniques

Le **LHCC** effectue l'ensemble des études de sol nécessaire à la conception, au dimensionnement et la réalisation des ouvrages géotechniques du BTPH :



## Présentation de l'entreprise

---

- ✓ Bâtiments et ouvrages d'arts
- ✓ Voiries et dallages
- ✓ Infrastructures (bassins, pylônes, grues...)
- ✓ Soutènements et stabilités de pentes
- ✓ Renforcement de sols
- ✓ Tunnel et ouvrages enterres
- ✓ Etudes pathologiques

Pour réaliser ces missions d'études et d'assistance, le **LHCC** dispose des moyens suivants :

### **Sur site :**

- ✓ Sondage et essais in situ
- ✓ géophysiques

### **Au laboratoire :**

- ✓ essais d'identification
- ✓ essais de compactage
- ✓ analyse chimique

### **4. laboratoire béton et matériaux**

#### **Béton et matériaux :**

- ✓ analyse de matériaux
- ✓ contrôle de production de granulats (carrière, gravier, sablière...)
- ✓ analyse granulométrique
- ✓ coefficient d'aplatissement
- ✓ détermination de la masse volumique apparente et absolue
- ✓ essais et vérifications sur mélange de béton de ciment
- ✓ expertises et recommandations
- ✓ essais normalisées sur ciment
- ✓ essais los Anglos , deval simple et micro deval
- ✓ essais de friabilités des sables
- ✓ essais d'affaissement au cône d'Abrahams
- ✓ essais de porosité ou d'absorption sur granulats
- ✓ étude de formulation de béton

#### **Essais sur béton durci :**

- ✓ Résistance à la compression sur éprouvettes
- ✓ Essais d'étanchéité sur béton
- ✓ Essais de traction par fendage (essai brésilien).

## Présentation de l'entreprise

---

### 5. Contrôle des chantiers

#### Route :

- ✓ Contrôle des matériaux (classification GTR, comportement mécaniques et physique)
- ✓ Contrôle de compactage (essai à la plaque et d'ina plaque, gamma densimètre)
- ✓ Vérification de la fabrication et de mise en œuvre des enrobes (granulométrie, teneur en lient, température)

#### Essais sur béton durcis

- Prélèvement par carottage
- Auscultation des ouvrages de béton à l'ultra son et au scléromètre
- Auscultation sonique des pieux

 Les essais réalisés sont les suivants :

ESSAIS	NORME DE REFERENCE
Essais physico-mécaniques	
Analyses granulométries, (Teneur en fine)	<b>NF P18-560</b> Sép.1990
Masse volumique apparente et absolue des granulats. ( $\rho_{ab}$ ), ( $\rho_{ap}$ )	<b>NF EN 1097-3</b> (Avril.1998)- <b>NF EN 1097-6</b> (Juin.2001).
Equivalent de sable ( <b>SE</b> )	<b>NF EN 933-8</b> (Aout.1999).
Détermination de la propreté superficielle des gravillons ( <b>f</b> )	<b>NF EN 933-1</b> (Déc.1997).
Détermination du coefficient d'aplatissement ( <b>FI</b> )	<b>NF EN 933-3</b> (Mar.1997).
Essai de friabilité es sable. ( <b>F<sub>s</sub></b> )	<b>NF P 18-576</b> (Déc.1990).
Essai de fragmentation (Los-Angeles). ( <b>LA</b> )	<b>NF EN 1097-2</b> (Oct .1998).
<b>Essai sur béton frais</b>	
Plasticité au cône d'abrams (slump .test)	<b>NF EN 12350-2.</b>
Densité du béton frais.	<b>NF EN 12350-6</b>
Essai sur béton durci	
Essai de compression sur éprouvettes $\varnothing 16 \times 32$ cm	<b>NF EN 12390-3</b> (Avril .2012)



# Sommaire

Présentation de l'entreprise	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1
Chapitre I généralités sur les BFUP	
I.1 Historique.....	3
I.2 Introduction.....	4
I.3 Définition .....	4
I.4 Les constituantes principales de BFUP.....	5
I.4.1 Ciments.....	5
I.4.2 Sable.....	5
I.4.3 Fumée de silice.....	6
I.4.4 Quartz broyé.....	6
I.4.5 Les fibres.....	6
I.4.6 Adjuvants.....	6
I.4.7 Teneur en eau.....	7
I.5 Les fibres utilisées dans le BFUP.....	7
I.5.1 Le rôle de fibre dans le BFUP.....	8
I.5.2 Caractéristiques des fibres utilisées dans les BFUP.....	9
I.6 Les adjuvants.....	9
I.6.1. Classifications des adjuvants.....	10
I.6.1.1 Modifiant l'ouvrabilité du béton.....	10
I.6.1.2 Modifiant la prise et le durcissement.....	10
I.6.1.3 Modifiant certaines propriétés particulières.....	10
I.7 Formulation des BFUP.....	10
I.7.1. Principe de formulation des BFUP.....	10

I.8	Microstructure des BFUP et potentiel de cicatrisation.....	11
I.9	Caractéristiques physiques des BFUP.....	12
I.9.1	Ouvrabilité.....	12
	A- Essai d'étalement.....	12
	B-Masse volumique.....	12
I.10	Performances mécaniques de BFUP.....	12
I.10.1	Résistance en compression.....	13
I.10.2	Résistance en traction.....	13
I.10.3	Résistance en flexion.....	13
I.11	Traitement thermique.....	13
I.12	Propriétés des BFUP.....	14
I.12.1	Ductilité.....	14
I.12.2	Porosité.....	14
I.12.3	Retrait – fluage.....	14
I.12.4	Résistance au Feu.....	14
I.12.5	Résistance au choc.....	14
I.13	Fabrication et mise en œuvre des BFUP.....	14
I.14	Durabilité des BFUP.....	15
I.15	Domaines d'applications des BFUP .....	16
I.16	Conclusions.....	16

## Chapitre II bio polymère

II.1	Introduction.....	17
II.2	Composition chimique du bois.....	17
II.2.1	La cellulose.....	18
II.2.2	Les hémicelluloses.....	18
II.2.3	La lignine.....	19
	II.2.3.1 Rôle de la lignine.....	19

II.2.3.2 Les applications de la lignine .....	19
II.2.3.3 Structures chimiques de la lignine .....	20
➤ Structure moléculaire.....	20
➤ Structure macromoléculaire .....	20
II.3 Principaux procédés d'extraction de la lignine.....	21
II.3.1 Procédé de klason .....	21
➤ L'extraction au soxhlet des extractibles .....	22
➤ Traitement avec l'acide sulfurique.....	22
II.3.2 Procédé Kraft au sulfure, alcalin.....	24
II.3.3 Procédé au sulfite, acide.....	24
II.3.4 Procédé organosolv, au solvant organique.....	24
II.4 Propriétés des lignines extraites .....	24
II.5 Applications des lignines extraites .....	25
II.5.1 Applications à court, moyen et long terme.....	25
➤ Résumé des applications présentes et potentielles.....	26
➤ Catabolisme des noyaux aromatiques .....	26
➤ Carburants.....	27
II.6 les adjuvants .....	27
II.6.1 Les principaux plastifiants et super fluidifiants.....	27
1- Les sulfonâtes de lignine.....	27
• les avantages des sulfonâtes de la lignine.....	28
II.6.2 Effet des plastifiants et super-plastifiant.....	28
II .7 Conclusion.....	28

### Chapitre III les matériaux réfractaires

III.1 Historique.....	29
III.2 Définitions.....	30

III.3 Classification des produits réfractaires.....	30
III.3.1 Selon la réfractérite.....	30
III.3.2 Selon la fabrication.....	30
III.3.3 Selon la structure.....	31
III.3.4 Selon la composition chimique.....	31
III.4 Les différentes familles des produits réfractaires.....	32
III.4.1 Réfractaires façonnées denses.....	32
III.4.2 Réfractaires non façonnés préparés.....	32
III.4.2.1 Béton réfractaire.....	33
✓ les Bétons réfractaires denses.....	33
✓ les bétons réfractaires isolants.....	33
III.4.2.2 Domain d'utilisation de béton réfractaire.....	33
III.4.3 Les réfractaires électrofondus et frittés.....	33
III.4.4 Les réfractaires isolants façonnés rigides.....	34
III.5 Propriétés des matériaux réfractaires.....	34
III.6 Caractérisation des matériaux réfractaires.....	34
III.7 Les briques réfractaires.....	35
III.7.1 Définition.....	35
III.7.2 Principe de fabrication des briques réfractaires.....	35
III.7.3 Déchet de brique.....	36
III.7.4 Domaine d'utilisation de brique réfractaire.....	36
III.7.5 L'influence de la chaleur sur les briques réfractaires.....	36
III.7.6 Types de brique réfractaire.....	37
III.7.6.1 Brique ordinaire.....	37
A- Caractéristiques des briques pleines ou perforées.....	38
B- Utilisation.....	38
III.7.6.2 Briques d'argiles creuses à perforations.....	38

III.7.6.3 Brique poreuse.....	39
III.8 les briques à base d'oxyde de zircon corindon.....	39
III.8.1 Définition.....	39
III.8.2 Microstructure de brique de zirconium.....	40
▪ Les agrégats.....	40
▪ Les différents systèmes de liaison.....	40
▪ Les additifs.....	40
III.8.3 L'oxyde de zirconium.....	41
➤ Les caractéristiques d'oxyde de zirconium.....	41
III.8.4 Le corindon.....	41

## Chapitre VI partie pratique

IV. Méthodologie et objectif du travail.....	42
❖ Première partie.....	43
I. Caractérisation des différents constituants.....	43
I.1 Ciment.....	43
I.1.1 Caractéristiques physiques.....	43
I.1.2 Composition minéralogique du ciment.....	43
I.1.3 Composition chimique du ciment.....	43
I.1.4 Classe vraie du ciment.....	44
I.2 Sable (sable d'oued souf).....	44
I.2.1 Caractéristiques physiques.....	44
I.2.2 Equivalant de sable (NF EN 933-8).....	44
I.2.3 Friabilité du sable (NF P 18-576).....	46
I.2.4 Composition chimique du sable oued souf.....	47
I.2.5 Analyse granulométrique du sable oued souf.....	48
I.3 Adjuvant.....	50

I.3.1	Présentation.....	50
I.3.2	Données techniques .....	50
I.3.3	Conditions d'application.....	50
I.3.4	Le point de saturation.....	50
I.4	La lignine.....	51
I.4.1	L'extraction de la lignine .....	51
I.4.2	Préparation d'adjuvant naturel .....	51
➤	Dissolution de la lignine.....	51
➤	Calcul de la quantité de l'extrait sec d'adjuvant naturel.....	51
➤	Calcul de la masse de la lignine pour 1m <sup>3</sup> .....	51
I.5	Les fibres.....	52
I.5.1	les fibres métalliques.....	52
I.5.2	Caractéristiques géométriques .....	52
I.5.3	Rôle des fibres métalliques .....	53
I.6	Briques réfractaires.....	53
I.6.1	Préparation .....	53
I.6.2	Caractéristiques chimiques de la brique .....	54
I.6.3	Caractéristiques physiques du déchet de brique réfractaire.....	56
I.7	Eau de gâchage.....	56
❖	Deuxième partie .....	57
II.	Formulation et conservatn des éprouvettes.....	57
II.1	Formulation.....	57
II.2	Le malaxage.....	60
II.2.1	Le mode de malaxage.....	60
II.3	Le moulage, démoulage et conservation des éprouvettes.....	61
❖	Troisième partie.....	61
III.	Caractéristiques physiques et mécaniques des BFUP.....	61



III.1 A l'état frais.....	61
➤ L'étalement au mini cône.....	61
➤ Masse volumique.....	62
III.2 L'état durci.....	63
➤ Masse volumique.....	63
➤ La porosité &l'absorption.....	64
➤ Les résistances mécaniques.....	65
❖ Quatrième partie.....	71
IV. Caractérisation Thermique des BFUP à base de déchet de brique réfractaire.....	71
IV.1 But.....	71
IV.2 Essai de microscope de chauffe.....	71
conclusion générale .....	73

*LISTE DES  
FIGURES*

## ***Chapitre I généralité sur les BFUP***

<b>Figure I.1</b>	Exemples de béton.....	4
<b>Figure I.2</b>	Ciment.....	5
<b>Figure I.3</b>	Exemple de fibre polypropylène.....	8
<b>Figure I.4</b>	Exemple de fibre métallique .....	8
<b>Figure I.5</b>	Le comporte des BFUP avec et sans fibres.....	9
<b>Figure I.6</b>	Comportement de charge-déformation de béton avec et sans fibres.....	9
<b>Figure I.7</b>	Micrographie au microscope électronique à balayage d'un BFUP .....	12
<b>Figure I.8</b>	Essai d'étalement d'un BFUP.....	13
<b>Figure I.9</b>	Le comportement en compression d'un BFUP.....	13
<b>Figure I.10</b>	Passerelle de Sherbrooke (Québec 1997).....	16

## ***Chapitre II bio polymères***

<b>Figure II.1</b>	Composition typique de la biomasse lignocellulosique.....	18
<b>Figure II.2</b>	Représentation de la chaîne de cellulose.....	18
<b>Figure II.3</b>	Monomères et unités principales impliquées dans la biosynthèse de lignine ....	20
<b>Figure II.4</b>	Principales unités structurelles de la lignine .....	21
<b>Figure II.5</b>	Montage de la prè-extraction au soxhelt.....	22
<b>Figure II.6</b>	Schéma du protocole d'extraction de la lignine de Klason.....	23
<b>Figure II.7</b>	Pales d'éoliennes.....	25

## ***Chapitre III matériaux réfractaires***

<b>Figure III.1</b>	Quelques produits réfractaires.....	30
<b>Figure III.2</b>	Briques réfractaires .....	35
<b>Figure III.3</b>	Schéma de la fabrication des briques.....	35
<b>Figure III.4</b>	Transfert de chaleur entre les parois.....	37
<b>Figure III.5</b>	Brique pleines et perforées.....	38

## Liste des figures

---

<b>Figure III.6</b>	Briques creuses comprimées par vois demi –humide.....	39
<b>Figure III.7</b>	Brique de zircon.....	40
<b>Figure III.8</b>	Microstructure des briques haut teneur en zircone-corindon.....	40

### ***Chapitre IV partie pratique***

<b>Figures IV.1</b>	Cercle des pourcentages de la composition chimique du ciment.....	44
<b>Figure IV.2</b>	Mesure des particules fines.....	45
<b>Figure IV.3</b>	Appareil Micro Deval.....	46
<b>Figure IV.4</b>	Cercle des pourcentages des constituants du sable d’oued souf.....	47
<b>Figure IV.5</b>	La solution de la lignine.....	51
<b>Figure IV.6</b>	fibres métalliques.....	52
<b>Figure IV.7</b>	Brique réfractaire.....	53
<b>Figures IV.8</b>	Préparation de déchet de brique réfractaire... ;,.....	54
<b>Figure IV.9</b>	Cercle de pourcentage de l’analyse chimique de la brique réfractaire.....	54
<b>Figure IV.10</b>	Histogramme de l’analyse chimique du déchet de brique réfractaire par FX.....	56
<b>Figure IV.11</b>	Malaxeur de BFUP.....	60
<b>Figure IV.12</b>	Moulage et démoulage des éprouvettes.....	61
<b>Figure IV.13</b>	Etalement du BFUP.....	62
<b>Figure IV.14</b>	Masses volumiques des BFUP à l’état frais et durci.....	63
<b>Figure IV.15</b>	Eprouvette subie à la flexion.....	66
<b>Figure IV.16</b>	Eprouvette subie à la compression.....	66
<b>Figure IV.17</b>	Résistances à la flexion .....	66
<b>Figure IV.18</b>	Résistances à la compression.....	67
<b>Figure IV.19</b>	Résistance à la flexion en fonction de l’âge.....	68
<b>Figure IV.20</b>	Résistances à la compression en fonction de l’âge.....	68
<b>Figure IV.21</b>	Résistances à la flexion et à la compression en fonction de l’âge.....	70
<b>Figure IV.22</b>	Résultats de microscope de chauffe pour BFUP témoin.....	71

## Liste des figures

---

<b>Figure IV. 23</b> Résultats de microscope de chauffe pour BBr <sub>20%</sub> +T12.....	72
---	----

***LISTE DES  
TABLEAUX***



## **Chapitre I généralités sur les BFUP**

<b>Tableau I.1</b>	Les caractéristiques des fibres utilisées dans les BFUP.....	7
<b>Tableau I.2</b>	Formulation typique de BFUP.....	9
<b>Tableau I.3</b>	Comparatif des indicateurs de durabilité des différents bétons.....	14

## **Chapitre II les bios polymères**

<b>Tableau II.1</b>	Principales applications à court (~2015), moyen terme (~2019) et long terme (~2025) de la lignine.....	26
---------------------	--	----

## **Chapitre III matériaux réfractaires**

<b>Tableau III.1</b>	Classification des produits réfractaires (norme ISO 1109).....	31
<b>Tableau III.2</b>	Dimensions et résistances des briques .....	38

## **Chapitre IV partie pratique**

<b>Tableau IV.1</b>	Caractéristiques physiques du ciment.....	43
<b>Tableau IV.2</b>	Composition minéralogique du ciment.....	43
<b>Tableau IV.3</b>	Composition chimique du ciment CEM II 42,5 .....	43
<b>Tableau IV.4</b>	Classe vraie du ciment .....	44
<b>Tableau IV.5</b>	Caractéristiques physiques du sable.....	44
<b>Tableau IV.6</b>	Résultat d'équivalent de sable .....	45
<b>Tableau IV.7</b>	Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable .....	46
<b>Tableau IV.8</b>	Friabilité de sable (Oued Souf).....	46
<b>Tableau IV.9</b>	Composition chimique du sable oued souf .....	47
<b>Tableau IV.10</b>	Analyse granulométrique du sable oued souf.....	48
<b>Tableau IV.11</b>	Données techniques.....	50

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau IV.12</b> Caractéristiques des fibres métalliques .....	53
<b>Tableau IV.13</b> Analyse chimique de la brique réfractaire (à base de zircon-corindon électrofondus) avant son utilisation dans le four.....	54
<b>Tableau IV.14</b> Analyse chimique du déchet de brique réfractaire par FX.....	55
<b>Tableau IV.15</b> Caractéristiques physiques du déchet de briques réfractaires .....	56
<b>Tableau IV.16</b> Calcule de la composition du BFUP .....	57
<b>Tableau IV.17</b> Composition du BFUP témoin.....	59
<b>Tableau IV.18</b> Composition de BFUP à basse de différents pourcentages de briques réfractaires.....	59
<b>Tableau IV.19</b> Etalement au mini cône des différentes variantes.....	62
<b>Tableau IV.20</b> La masse volumique à l'état frais .....	63
<b>Tableau IV.21</b> La masse volumique à l'état durci .....	63
<b>Tableau IV.22</b> Porosités des différentes variantes.....	65
<b>Tableau IV.23</b> Absorption des différentes variantes.....	65
<b>Tableau IV.24</b> Résistances à la flexion à 7 et 28 jours en fonction de l'âge.....	66
<b>Tableau IV.25</b> Résistances à la compression à 7 et 28 jours en fonction de l'âge .....	66
<b>Tableau IV.26</b> Résistances à la flexion à 7 et 28 jours en fonction de l'âge.....	67
<b>Tableau IV.27</b> Résistances à la compression à 7 et 28 jours en fonction de l'âge .....	68
<b>Tableau IV.28</b> Composition de BFUP avec fibres métalliques.....	69
<b>Tableau IV.29</b> Caractéristiques de BFUP avec fibres métalliques .....	69
<b>Tableau IV.30</b> Résistance à la flexion et à la compression en fonction de l'âge.....	70
<b>Tableau IV.31</b> Résultats de microscope de chauffe pour BFUP témoin.....	71
<b>Tableau IV.32</b> Résultats de microscope de chauffe pour BBr <sub>20%</sub> +T12.....	72

# *Introduction*

## Introduction générale

---

Le béton est un matériau de construction qui trouve dans divers domaines du génie civil, il est le matériau le plus utilisé dans le monde grâce à sa simplicité de fabrication et de sa mise en œuvre, ces avantages technico-économiques et ces performances ont fait de lui un matériau fiable et robuste, Pour cela plusieurs recherches et travaux ont été développés pour aboutir à ces performances qui ont débouché sur la mise au point d'un nouveau type de béton dénommé béton fibré ultra performant (BFUP).

Le béton fibré à ultra performance (BFUP) qui peut être considéré comme une dernière génération des matériaux cimentaires, qui est un mélange de ciment, de poudres minérales ultrafines ou de granulats très fins, d'eau, d'adjuvants et de fibres synthétiques ou métalliques, grâce à sa bonne compacité et sa faible porosité, sa résistance à la compression peut atteindre jusqu'à 250 MPa et voir plus et une ductilité nettement améliorée.

Dans notre travail, nous avons choisi le déchet de brique réfractaire comme ultrafines, en remplacement de la fumée de silice dans la formulation des bétons BFUP, ils peuvent être transformés en granulats ou en poudres recyclés pour être utilisés

Les briques réfractaires sont des briques qui conservent ces propriétés mécaniques à température très élevée. qui sont de différentes qualités qui répondent aux besoins des industries cimentière, céramique, sidérurgique, métallurgique, de la construction (Fumisterie)...etc.

Les polymères lignocellulosique (cellulose, lignine, hémicellulose) constituent une source «inépuisable» de matière issue de la biomasse. La lignine est le deuxième biopolymère renouvelable le plus abondant sur la terre, après la cellulose, et à elles deux, elles cumulent plus de 70 % de la biomasse totale. C'est pourquoi elle fait l'objet de recherches en vue de valorisations autres que ses utilisations actuelles en bois d'œuvre et en combustible, ce biopolymère possède des propriétés physico-chimiques intéressantes.

Dans notre étude et afin d'améliorer les propriétés mécaniques des BFUP, nous nous sommes intéressées à étudier, dans un premier temps, les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des différents matériaux utilisés pour l'élaboration des BFUP.

Dans la seconde partie, c'est d'utiliser le déchet de brique réfractaire comme ultrafines dans les BFUP avec l'incorporation de deux adjuvants naturel (lignine) et artificiel (tempo 12), comparaison des résultats et choix des meilleures formulations.

## Introduction générale

---

La troisième partie est consacrée à la caractérisation thermique par microscopie de chauffe des différentes compositions afin d'évaluer l'effet de ce déchet de brique réfractaire sur la résistance des bétons élaborés à des hautes températures.

# *Chapitre I*

## *Généralité sur les BFUP*





## I.1 Historique

Né avec le xxe siècle, le béton, matériau jeune, a connu ces vingt dernières années des développements considérables, les recherches sur les nouveaux bétons se sont considérablement accélérées depuis 10 ans et ont abouti aujourd'hui aux solutions les plus innovants tant en termes de conception que de mise en œuvre et d'esthétisme.

Les recherches sur l'optimisation des empilements granulaires et les mécanismes de défloculation ont permis de bouleverser les connaissances sur la rhéologie des bétons frais et la durabilité des bétons durcis, elles ont débouché sur la mise au point d'une gamme de bétons aux nouvelles performances les résistances, la durabilité, l'ouvrabilité et les qualités esthétiques ont enregistré des avancées considérables.

### Aux bétons à hautes performances **BHP**

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

### Aux bétons autoplaçant **BAP**

L'expertise acquise lors des travaux de recherche sur les BHP et la maîtrise croissante des nouveaux Super-plastifiants ont permis la mise au point de nouveaux bétons: les BÉTONS AUTOPLACANTS (BAP) qui répondent largement à ces exigences, Les recherches effectuées ces dernières années ont Créé les conditions de réalisation et de reproductibilité d'un béton homogène, très fluide, aisé à mettre en œuvre sans vibration, ne ségrégent pas et présentant des propriétés de résistance et de durabilité comparables à celles des bétons traditionnels.

### Aux bétons à ultra haut performance **BFUP**

La mise au point des BFUP s'inscrit dans une démarche d'amélioration du comportement des matériaux de construction entreprise dès le début des années 1970, la recherche s'oriente par la suite vers la maîtrise de la durabilité de ces bétons à haute résistance à travers d'autres caractéristiques (porosité, résistance aux gel/dégel, fluage, etc.) [1].

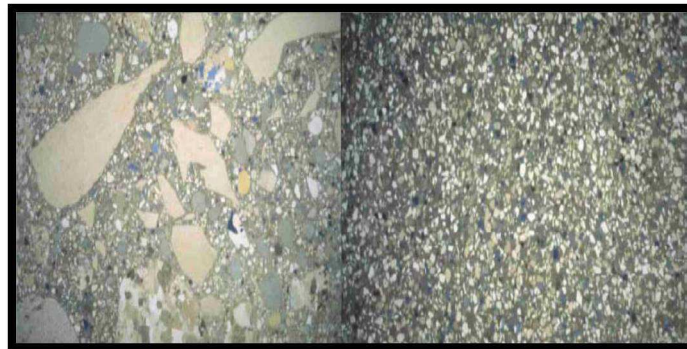
## I.2 Introduction

Une nouvelle famille de matériaux. Ainsi peuvent être considérés les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP), issus de la recherche au début des années 90, leurs premières véritables applications en France ont eu lieu sur les centrales nucléaires de Cattenom et de Civau, le matériau a connu nombre d'applications dans le monde entier et les perspectives de Développement sont illimitées. Mais les BFUP peuvent-ils être vraiment considérés comme des bétons? Au regard de leur composition, pas de doute possible : il s'agit bien d'un mélange de Ciment, de poudres minérales ultrafines ou de granulats très fins, d'eau, d'adjuvants et de fibres synthétiques ou métalliques. Ils sont tous conçus selon le principe de l'empilement granulaire optimal dont la formule mathématique dite de la "compacité maximale"

## I.3 Définition

Les BFUP sont des matériaux à structure micrométrique présentant un fort dosage en ciment et en adjuvants, des granulats de faible dimension et une porosité réduite. Ils présentent une durabilité et une résistance exceptionnelles (de 130 à 250 MPa en compression/de 20 à 50 MPa en traction par flexion) qui permet de se passer d'armatures passives dans les éléments structurels.

La présence de fibres, les performances en traction et leur comportement ductile permettent de s'affranchir dans certains cas des armatures passives [2].



Béton classique

BFUP

**Figure I.1** Exemples de béton

### Ces bétons offrent des performances exceptionnelles:

- Une très grande ouvrabilité;
- Des résistances caractéristiques à la compression à 28 jours très élevées comprises entre 130 et 250 MPa, ainsi qu'à la traction entre 5 et 12 MPa;

- De hautes résistances à court terme (24 h);
- Des résistances mécaniques au jeune âge très élevées;
- Une compacité très importante;
- Une durabilité exceptionnelle (ce qui permet de les utiliser dans des environnements très agressifs);
- Une ductilité importante (déformabilité sous charge sans rupture fragile)
- Une ténacité (résistance à la microfissuration) élevée;
- Un retrait et un fluage très faible;
- Une grande résistance à l'abrasion et aux chocs,
- Une optimisation des frais de maintenance et d'entretien des ouvrages;
- De nouvelles perspectives constructives.

#### I.4 les constituantes principales de BFUP

Les différents constituants (composants granulaires et adjuvants) qui forment généralement les BFUP sont :

##### I.4.1 Ciments

Les Bétons Fibrés Ultra Performants (BFUP) possèdent des quantités importantes en ciment et leur masse varie entre 700 et 1000 kg/m<sup>3</sup>, beaucoup plus élevée que pour des bétons conventionnels qui ont une masse de 300 à 375 kg/m<sup>3</sup>, les ciments pour les BFUP doivent avoir une faible teneur en alcalin et C<sub>3</sub>A permettant ainsi de réduire les besoins en eau et la chaleur d'hydratation, la pâte liante (ciment+fumée de silice) doit être optimisée pour que le mélange ait un comportement autoplaçant avec un comportement mécanique meilleur



**Figure I.2** Ciment

##### I.4.2 Sable

Le sable utilisé doit avoir une nature minéralogique très dure, de classe granulaire serrée et d'un module d'Young voisin de celui de la pâte, développant ainsi une bonne

adhérence granulats-pâte, la taille moyenne du sable utilisée dans la fabrication des BFUP est inférieure à 2mm selon les recommandations de AFGC et inférieure à 7 mm selon les recommandations japonaises

### **I.4.3 Fumée de silice**

Ultrafine hautement pouzzolanique composée de particules sphériques de dioxyde de Silicium amorphe, de diamètre moyen de l'ordre de 0,1  $\mu\text{m}$ , avec une très grande surface Spécifique, elle est le coproduit recueilli sur des filtres au cours du processus de fusion destiné à la production du silicium métal et des alliages de ferrosilicium, l'incorporation de fumée de silice dans le béton permet d'améliorer la résistance en compression, le dosage en fumée de silice utilisé en substitution Partielle de ciment dans la fabrication des BFUP est de 10 à 30% par rapport à la masse de Ciment. (Parant, 2003) et (Wille et al., 2012) ont montré que le pourcentage optimal de Substitution en masse de ciment est de 25%. [3]

### **I.4.4 Quartz broyé**

Le quartz broyé est une poudre, de diamètre moyen entre 10 et 15  $\mu\text{m}$ , issue du broyage d'un sable très riche en silice ( $\text{SiO}_2 > 98\%$ ) généralement utilisé dans la verrerie, il est employé principalement dans la formulation des BFUP traité à une température supérieure à 90 °C comme complément chimique, Pour le béton non traité thermiquement, le quartz broyé peut être considéré comme inerte et son utilisation n'est pas obligatoire.

### **I.4.5 Les fibres**

Un haut dosage en fibres métalliques (2 à 6% en volume) confère à la matrice cimentaire très résistante une excellente ductilité (capacité de déformation sans rupture brutale), ainsi qu'une certaine résistance post-fissuration, la répartition homogène des fibres permet d'armer efficacement toute la section de l'élément, jusqu'à sa surface.

### **I.4.6 Adjuvants**

L'emploi d'adjuvants, tels que les plastifiants réducteurs d'eau et les super-plastifiants fluidifiants, permet de formuler les BFUP avec un très faible rapport E/Liant d'une part, le super-plastifiant doit être choisi en tenant compte de sa compatibilité avec le ciment et de son efficacité, Généralement les super-plastifiants de la troisième génération tels que le poly carboxylate haute réducteur d'eau sont utilisés pour leur fort pouvoir de défloculation

ils peuvent également réduire les besoins en eau de près de 40% avec une très bonne fluidité qui peut persister jusqu'à 60 minutes sans qu'il y ait ségrégation[4].

#### **I.4.7 Teneur en eau**

Pour ce qui concerne la teneur en eau, les BFUP sont obtenus en choisissant un faible rapport Eau/Liant, inférieur à 0,20, dans le but de réduire au maximum la porosité du matériau et la Connectivité des pores résiduels.

#### **I.5 Les fibres utilisées dans le BFUP**

Un béton fibré a ultra performance (BFUP) est un béton dans lequel sont incorporées des fibres à la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, selon leur nature ont un comportement contrainte-déformation très différente chacune à une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du BFUP est présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres :

- Dimensions (diamètre, longueur, ...etc.)
- Formes (lisses, crantées, ondulées, bi ondulées, à crochet ...etc.)
- Résistances mécaniques (résistance à la traction)

Les dosages courants en fibre sont de l'ordre de 0,5 à 2% en volume soit de 5 à 150kg /m<sup>3</sup> de béton, le choix de fibre dans la matrice peuvent être expliqués par leur longueur, forme, diamètre et dosage est aussi conditionné par un module d'élasticité très élevés afin que les fibres soient arrachées et non cassées.

Comme il existe une relation entre les dimensions, le pourcentage de fibres introduit et la maniabilité du BFUP, plus le rapport longueur de la fibre sur diamètre (fibre longue) est élevé plus la maniabilité des BFUP est mauvais, par contre utilisation de fibres courte permet d'obtenir un BFUP maniable aussi une bonne ouvrabilité et facilite le malaxage [5].

Pour faciliter leur utilisation les fibres doivent :

- Etre faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage (leur dispersion dans le béton doit être facile).
- Se répartir de manière homogène lors du malaxage au sein du béton (pas d'agglomération de fibre) et leur du bétonnage.

Est pour améliorer les performances mécaniques des BFUP (ductilité, résistance en flexion, aux chocs ...etc.) elle doit :

- Etre déformables sans être fragile.
- Offrir une bonne capacité de déformation et bonne adhérence avec la pate de ciment



**Figure I.3** Exemple de fibre polypropylène

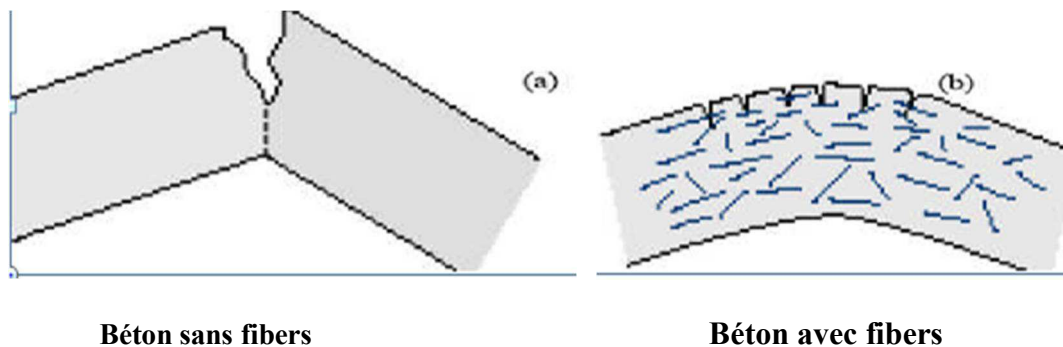


**Figure I.4** Exemple de fibre métallique

### I.5.1 Le rôle de fibre dans le BFUP

Ils ont généralement pour renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures et ce rôle se traduit par des améliorations relatives à :

- La cohésion du BFUP frais.
- La résistance à la traction par flexion.
- La ductilité et la résistance post-fissuration.
- La réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures.
- La résistance aux chocs, à la fatigue et à l'abrasion.



**Béton sans fibres**

**Béton avec fibres**

**Figure I.5** Le comportement des BFUP avec et sans fibres

Transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (**figure I.6**)

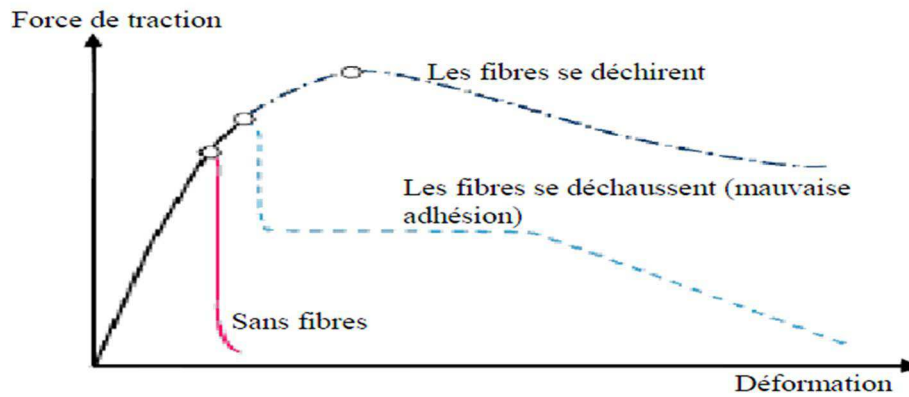


Figure I.6 Comportement de charge-déformation de béton avec et sans fibres

## I.5.2 Caractéristiques des fibres utilisées dans les BFUP

Tableau I.1 Les caractéristiques des fibres utilisées dans les BFUP sont suivant [6] :

Type de fibre	Densité	Diamètre (µm)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (MPa)	Déformation à la rupture %
<b>Métallique</b>	7,85	100-300	500-2600	210000	0,5-3,5
<b>Verre</b>					
E	2,54	8-15	2000-4000	72000	3,0-4,8
RA	2,70	12-20	1500-3700	80000	2,5-3,6
<b>Synthétique</b>					
Acrylique	1,18	5-17	200-1000	17000-19000	28-50
Aramide	1,44	10-12	2000-3100	62000-120000	2-3,5
Carbone	1,90	0-8	1800-2600	230000-380000	0,5-1,5
Nylon	1,14	23	1000	5200	20
Polyester	1,38	10-80	290-1200	10000-18000	10-50
Polyéthylène	0,96	25-300	80-600	5000	12-100
Polypropylène	0,90	20-200	450-700	3500-5200	6-15

## I.6 Les adjuvants

Un adjuvant, selon la norme NF EN 934-2 est un produit dont l'incorporation à faible dose [inférieure à 5% de la masse de ciment] aux bétons, mortiers ou coulis lors du malaxage ou avant la mise en oeuvre, l'emploi d'un adjuvant ne peut entraîner une diminution de certaine caractéristique du béton, il ne doit pas non plus altérer les caractéristiques des armatures du béton ou des aciers de précontrainte

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale, caractérisée par les ou les modifications majeures qu'il apporte aux propriétés des bétons, mortiers ou des coulis à l'état frais ou durci [7]



### **I.6.1. Classifications des adjuvants**

La norme NF EN 934-2 classe ces adjuvants suivant leur fonction principale, en trois grands types :

#### **I.6.1.1 Modifiant l'ouvrabilité du béton**

- Super-plastifiant (anciennement fluidifiant) :

Les super-plastifiants permettent de réduire fortement la teneur en eau du béton donné (haut réducteur d'eau), ou sans modifier la teneur en eau, d'augmenter considérablement l'affaissement/l'étalement ou de produire les deux effets à la fois.

- Plastifiant –réducteurs d'eau (NF EN 934-2) :

Même principe que les super-plastifiants, mais les plastifiants permettent de modifier la consistance

#### **I.6.1.2 Modifiant la prise et le durcissement**

- Accélérateurs de prise et de durcissement (NF EN 934-2) :

Les accélérateurs de durcissement augmentent la vitesse de développement des résistances initiales, avec ou sans modification du temps de prise, et accélérateur de prise permettent de diminuer le temps de début de prise du béton.

- Retardateurs de prise (NF EN 943—2) :

Les retardateurs de prise permettent de retarder le début de prise du béton

#### **I.6.1.3 Modifiant certaines propriétés particulières**

- Entraîneurs d'air (NF EN 934-2) :

Les entraîneurs d'air permettent : d'entraîner, à l'intérieur du béton, des microbulles d'air parfaitement réparties qui serviront de vase d'expansion dans le béton durci, d'améliorer la durabilité du béton

- Hydrofuges de masse (NF EN 934-2):

Ce sont des produits qui améliorent l'étanchéité des bétons et protègent de l'humidité, en arrêtant l'absorption capillaire.

- Colorants.

- Générateurs de gaz.

### **I.7 Formulation des BFUP**

#### **I.7.1. Principe de formulation des BFUP**

La formulation des bétons fibrés à ultra performances repose sur deux principes essentiels :



- 1- la réduction de la teneur en eau contenue, afin de diminuer la porosité du béton grâce à l'ajout de super plastifiants et une composition granulaire optimisée.
- 2- En effet, la taille et le type de grains sont minutieusement étudiés en amont afin de limiter les vides d'air pouvant fragiliser le béton, le béton fibré ultra-hautes performances se constitue de grains de tailles différentes, les grains de petite taille sont privilégiés en vue de l'obtention d'un béton plus compact (D varie de 1 à 7 mm).

Les fibres métalliques ajoutées sont de l'ordre de 2 à 3 % du volume (160 à 240 kg/m<sup>3</sup>) et ont un diamètre n'excédant pas 0,3 mm.

A titre d'exemple, une formulation typique de BFUP est donnée dans le **tableau I.2** suivant

(Pour 1 m<sup>3</sup>) [1] :

Ciment	Sables fin	Quartz broyé	Fumés de silice	Fibre métallique	Adjuvant (extrait sec)	Eau totale
710	1020	200	230	160	10	1401
1075	1050		160	220	35	2001

### I.8 Microstructure des BFUP et potentiel de cicatrisation

La microstructure des BFUP est la clé de leurs performances (Les BFUP sont des matériaux à structure micrométrique), elle leur confère une très faible porosité, a grossissement relativement faible (200 fois), la pâte d'un BFUP laisse apparaître en clair des particules de clinker non hydraté qui jouent le rôle de micro granulats à surface très active et de haut module d'élasticité (120000 MPa), la phase grise interstitielle représente le mélange des silicates de calcium hydratés et de fumée de silice [1].

Le dosage en eau est inférieur à celui nécessaire pour l'hydratation complète du ciment, ainsi les BFUP possèdent une réserve de ciment anhydre qui leur procure un potentiel d'auto cicatrisation en cas de fissuration, l'eau pénétrant éventuellement par les fissures va permettre la formation d'hydrates au sein des microfissures en réagissant avec les grains de clinker résiduel. Ce phénomène constitue un atout particulièrement intéressant en termes de durabilité pour ce matériau.

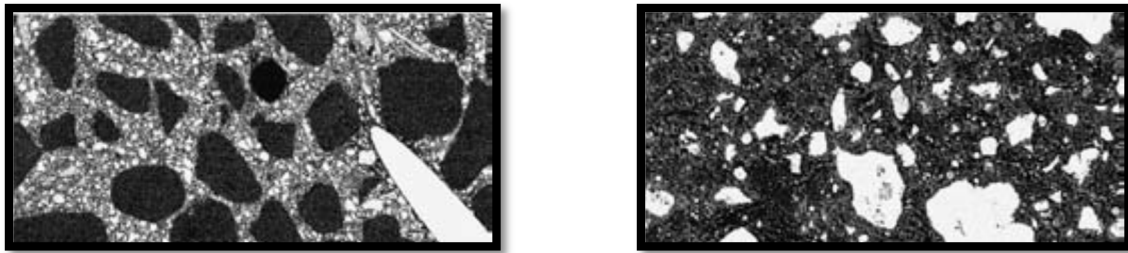


Figure I.7 Micrographie au microscope électronique à balayage d'un BFUP

## I.9 Caractéristiques physiques des BFUP

### I.9.1 Ouvrabilité

Les formules types de BFUP conduisent à des bétons, généralement, de consistance fluide ce qui permet un remplissage aisé des coffrages et des moules.

#### A. Essai d'étalement

Les BFUP sont généralement autoplaçant, cette propriété est vérifiée par un essai d'étalement qui consiste à remplir de BFUP un moule tronconique dont le diamètre inférieur 10 et la hauteur sont de 50 mm, à retirer le moule puis à mesurer l'étalement du BFUP, qui est de l'ordre de 200 mm.

L'essai le plus courant permettant de caractériser la mobilité en milieu confiné, car le plus facile à mettre en œuvre, est l'essai d'étalement réalisé à l'aide d'un cône à mortier (« petit » Cône d'Abrams) selon les recommandations de l'Association Française de Génie Civil .

En effet, la valeur de l'étalement, donnée par la moyenne de deux mesures du diamètre de la galette de béton, s'avère être plus représentative que celle de l'affaissement dans le cas des bétons se mettant en place par simple gravité (type béton autoplaçant).



Figure I.8 Essai d'étalement d'un BFUP

#### B. Masse volumique

La masse volumique des BFUP est de l'ordre de 2400 à 2800 kg /m<sup>3</sup>

## I.10 Performances mécaniques de BFUP

Les BFUP présentent des performances exceptionnelles aussi bien en compression qu'en traction et en flexion

### I.10.1 Résistance en compression

Elle caractérise par leurs résistances en compression et leurs modules d'élasticité. La résistance à la compression à 28 jours est comprise entre 130 et 250 MPa. Le module d'élasticité varie selon les formulations entre 40 et 80 GPa.

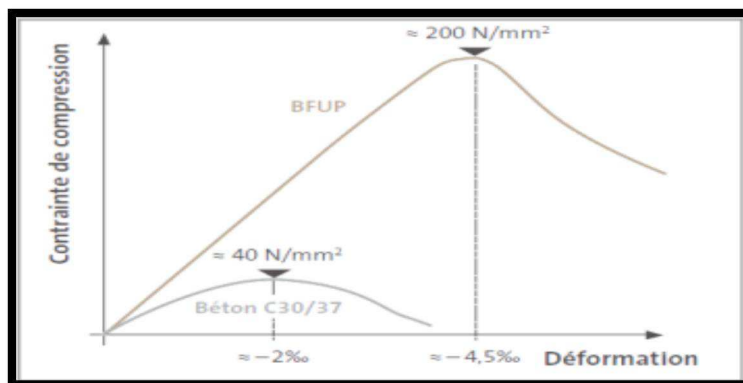


Figure I.9 Le comportement en compression d'un BFUP

### I.10.2 Résistance en traction

Le comportement en traction est caractérisé par :

- Un domaine de déformation élastique limitée par la résistance en traction de la matrice cimentaire;
- Un domaine post-fissuration caractérisé par la résistance en traction du matériau fibré obtenue après fissuration de la matrice

La résistance en traction des BFUP est de l'ordre de 10 MPa.

### I.10.3 Résistance en flexion

Selon le type de formule, les BFUP ont une résistance en flexion de l'ordre de 30 à 50 MPa.

## I.11 Traitement thermique

Les BFUP peuvent faire l'objet de traitements thermiques juste après la fin de leur prise, ce qui permet:

- D'obtenir rapidement des résistances mécaniques élevées ;
- D'améliorer la microstructure;
- D'obtenir des performances en traction et en compression plus élevées;
- D'améliorer la durabilité grâce à une réduction de la porosité;
- De diminuer les effets différés du retrait et du fluage;
- D'éviter tout risque de fissuration par retrait.

## **I.12 Propriétés des BFUP**

Les BFUP offrent de multiples propriétés adaptables aux exigences de chaque application :

### **I.12.1 Ductilité**

La ductilité (déformabilité sous charge sans rupture fragile), la résistance en traction et la ténacité (résistance à la microfissuration) des BFUP sont dues à la présence des fibres (entre 2 et 3 % en volume) et à l'interaction fibre-matrice.

### **I.12.2 Porosité**

Les BFUP présentent une porosité très faible et non connectée à l'échelle du nanomètre ainsi qu'une absence de porosité capillaire.

### **I.12.3 Retrait – fluage**

Dans les BFUP, le retrait endogène de la matrice cimentaire est de l'ordre de 300 à 500 $\mu$ m/m suite au faible rapport eau/ciment qui conduit à un diamètre des pores réduit. Ce retrait endogène n'est pas gêné par le squelette granulaire, et la formation de microfissures est extrêmement faible.

### **I.12.4 Résistance au Feu**

Les lois de comportement et de tenue au feu des BFUP sont différentes de celles des bétons Courants, comme les autres bétons, le BFUP est incombustible (MO), les dispositions constructives doivent être étudiées au cas par cas au regard de la résistance au feu. Les BFUP n'ont aucune contribution au développement d'un feu.

### **I.12.5 Résistance au choc**

Les BFUP présentent compte tenu de la présence de fibres une grande capacité de dissipation d'énergie, ce qui leur permet d'offrir une résistance au choc important.

## **I.13 Fabrication et mise en œuvre des BFUP**

Le BFUP est surtout utilisé dans la préfabrication. Ce système confère un avantage car le fabricant peut gérer les éléments perturbateurs tels que : pluie, vent, soleil, temps de transport. Les éléments sont réalisés dans des conditions idéales puis acheminés sur le chantier.

Le procédé de fabrication peut s'apparenter à un béton normal. Dans un premier temps, les granulats et le liant sont brassés ; puis on rajoute les fibres ; on malaxe le tout. Pour terminer, l'eau et le super fluidifiant sont incorporés pour obtenir le produit frais.

Comme pour tous les bétons, des précautions particulières doivent être prises pour l'utilisation des BFUP à des températures basses ou à l'inverse élevées.

La mise en place du béton peut s'effectuer à la goulotte du malaxeur ou avec une benne, la mise en place sur la surface doit être perpendiculaire au sens que l'on veut que les fibres soient disposées, cette règle permet d'obtenir de meilleur résultat donc une meilleure durabilité.

### I.14 Durabilité des BFUP

Du fait de leur microstructure extrêmement dense, de leur porosité capillaire très faible et de leur compacité, les BFUP présentent des caractéristiques de durabilité exceptionnelles, quel que soit l'environnement, notamment dans les domaines suivants:

- Résistance aux cycles gel-dégel ;
- Résistance aux sels de déverglaçage ;
- Résistance à la carbonatation ;
- Résistance à la pénétration d'ions agressifs et des acides faibles ;
- Résistance à l'abrasion, aux chocs ... etc.

La matrice cimentaire des BFUP constitue un milieu quasi imperméable à l'air et à la pénétration des divers agents agressifs [2].

**Tableau I.3** Comparatif des indicateurs de durabilité des différents bétons

	Mesures	BFUP	BHP	Béton classique
<b>Porosité capillaire</b>	ml/100g	1-6	9-12	12-16
<b>Porosité à l'eau</b>	%	0	12-20	20-25
<b>Perméabilité à l'oxygène</b>	10	<0,1	100	1000-10000
<b>Résistance à l'abrasion</b>	Indice 1 BFUP	1	2,8	4
<b>Résistance au gel-dégel</b>	g/m <sup>2</sup>	10	900	1000
<b>Teneur en portlandite</b>	Km/m <sup>3</sup>	0	76	86
<b>Diffusion des ions chlore</b>		2	200	2000

### I.15 Domaines d'applications des BFUP

Le développement des BFUP marque une nouvelle étape dans l'histoire des bétons. Ce matériau permet d'explorer de nouvelles façons de construire en vue d'alléger la structure grâce à ses propriétés exceptionnelles aussi bien en termes de performances mécaniques que de durabilité. Par rapport aux avantages que peuvent offrir les BFUP, leur utilisation réside à l'heure actuelle, en raison de leur coût de fabrication élevé, en quelques ouvrages exceptionnels, l'utilisation de BFUP est pertinente dans le cas des ouvrages légers et durables ou dans le cas des ouvrages aux formes recherchées, architectoniques (courbes, résilles, etc.) qu'il est impossible de confectionner en béton armé. L'utilisation de BFUP se résume dans les types d'applications suivants :

Passerelles, Ponts routiers, Eléments de toiture (couverture), Renforcement d'ouvrage.

#### ➤ Exemples de l'utilisation

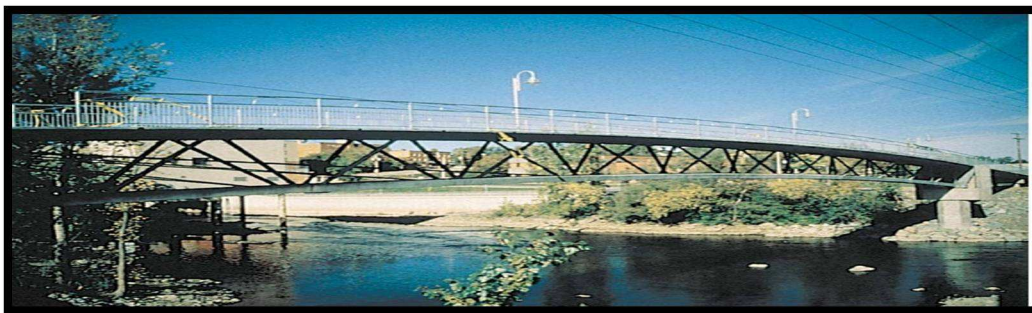


Figure I.10 Passerelle de Sherbrooke (Québec 1997)

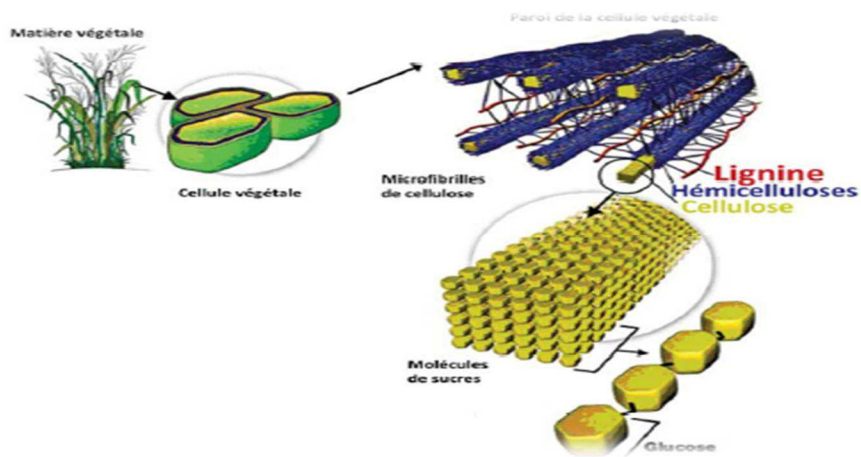
### I.16 Conclusion

Les BFUP compte tenu de leurs multiples performances s'adaptent aux diverses contraintes et exigences des ouvrages. Ils ouvrent de grandes perspectives d'applications pour les ouvrages nécessitant résistances importantes, Ils répondent aux évolutions majeures de la construction en permettant d'optimiser les dimensionnements, et de réduire la durée des chantiers et les coûts globaux des ouvrages.

Pour conclure, ce produit va être dans l'avenir de plus en plus courant, sa maniabilité au niveau des formes et ses caractéristiques en matière de durabilité va en faire un produit incontournable des techniques d'application de demain.

# Chapitre II

## Les biopolymères



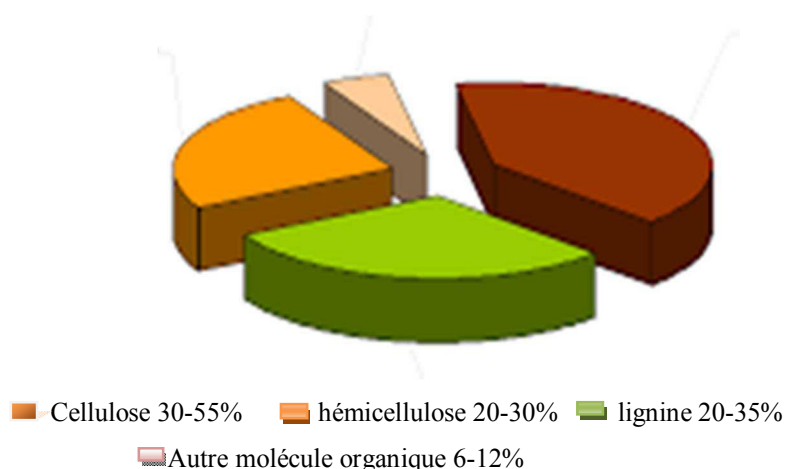
## II.1 INTRODUCTION

La valorisation de la lignine, dans le cadre de la bioraffinerie lignocellulosique du futur, est une thématique particulièrement prometteuse la lignine est la principale matière première renouvelable composée de motifs aromatiques. Ce polymère est le plus souvent valorisé uniquement par combustion dans les papeteries pour la production d'énergie.

La biomasse lignocellulosique, appelée parfois simplement biomasse, est constituée de Trois composants majeurs: la cellulose (polysaccharide linéaire de glucose), les hémicelluloses (polysaccharides branchés de sucres à 5 et 6 atomes de carbone) et la lignine (un polymère complexe aromatique). Elle comprend notamment les arbres et les herbes et représente la grande majorité de la biomasse, définie comme tout matériau d'origine biologique à l'exception des matériaux enfouis dans les formations géologiques ou fossilisés. En moyenne, la biomasse lignocellulosique contient 40-60 % de cellulose, 20-40 % d'hémicelluloses et 10-25 % de lignine [8]

## II.2 Composition chimique du bois

Le bois proprement dit est un mélange de trois polymères naturels : cellulose, lignine et hémicelluloses, dans la proportion approximative de 50%, 25%, 25%, en fonction de l'espèce. La cellulose et les hémicelluloses sont des polymères formés à partir de molécules de monosaccharides ou oses (sucres simples), et la lignine est un polymère avec des motifs « phénol-propane »

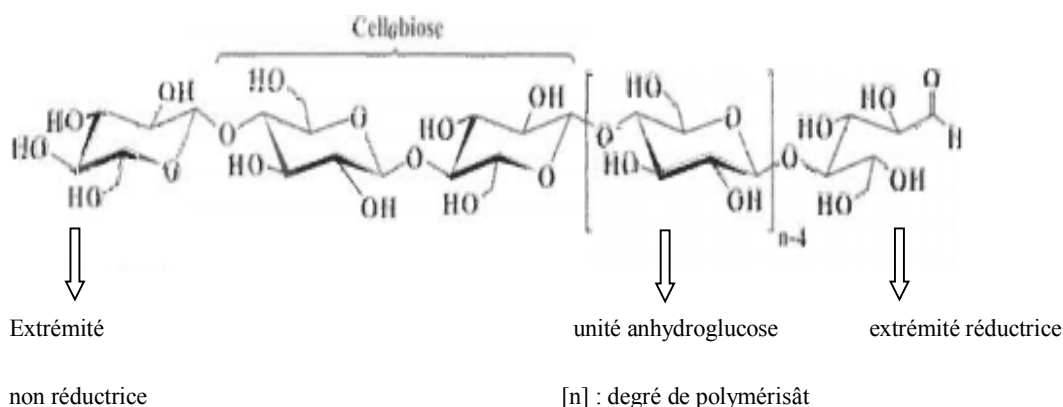


**Figure II.1** Composition typique de la biomasse lignocellulosique



### II.2.1 La cellulose

La cellulose est le constituant le plus abondant des parois cellulaires du bois, Ce polymère de glucose constitue la structure principale de nombreux végétaux. La teneur varie selon l'espèce végétale d'environ 40 à 45% pour les bois de résineux (mous) à 40 à 50% dans les bois de feuillus (durs). La cellulose est un homopolysaccharide linéaire constitué d'unités D-glucopyranose reliées par des liaisons P (1-4). L'unité répétitive, composée de l'association de deux glucoses, est appelée cellobiose. Ce dernier est constitué de deux motifs de glucose relié par la liaison glycosidique C1-O-C4 (Figure II.2) [9]



**Figure II.2** Représentation de la chaîne de cellulose

A partir de la cellulose, il est possible d'obtenir du sorbitol, de la cellulose de spécialités utilisée dans le textile (cellulose régénérée ou viscosse), des dérivés comme la carboxyméthyle cellulose (CMC), du glucose ou encore de l'éthanol.

### II.2.2 Les hémicelluloses

Contrairement à la cellulose, les hémicelluloses sont des hétéropolysaccharides composés par un agencement de cycles à 5 et 6 carbones dont les plus connus sont: le xylose, l'arabinose, le galactose, le glucose, le mannose, et les acides uroniques. Les hémicelluloses représentent environ 20 à 30% de la matière sèche du bois [10]. Leurs taux de ramification élevés et leur bas degré de polymérisation (10 à 100 fois moins élevé que la cellulose) se traduisent par une plus grande solubilité.

Il faut noter que les hémicelluloses dans leurs formes natives ne sont pas solubles dans l'eau mais sont très solubles en milieu alcalin [11]

### II.2.3 La lignine

La lignine (du latin lignum qui signifie bois) est une biomolécule, en fait une famille de macromolécules polymères, qui est un des principaux composants du bois avec la cellulose et l'hémicellulose.

Quantitativement, la teneur en lignine est de 3 à 5 % dans les feuilles, 5 à 20 % dans les tiges herbacées, 15 à 35 % dans les tiges ligneuses<sup>2</sup>. Elle est moindre pour les plantes annuelles que pour les vivaces, elle est maximum chez les arbres. La lignine est principalement localisée entre les cellules, mais on en trouve une quantité significative à l'intérieur même de celles-ci. Bien que la lignine soit un réseau tridimensionnel hydrophobe complexe, l'unité de base se résume essentiellement à une unité de phénylpropane.

La lignine est le deuxième biopolymère renouvelable le plus abondant sur la Terre, après la cellulose, et à elles deux, elles cumulent plus de 70 % de la biomasse totale. C'est pourquoi elle fait l'objet de recherches en vue de valorisations autres que ses utilisations actuelles en bois d'œuvre et en combustible.

**Formule :**  $C_9H_{10}O_2$ ,  $C_{10}H_{12}O_3$ ,  $C_{11}H_{14}O_4$

#### II.2.3.1 Rôle de la lignine

La lignine joue le rôle de lien entre les molécules de cellulose et d'hémicelluloses, ces liens sont principalement des liaisons covalentes de type éther et ester, c'est en grande partie le clivage de ces liaisons lors des procédés papetiers, qui libère la lignine et fragmente la matière végétale en ses trois composants [1].

#### II.2.3.2 Les applications de la lignine

- ✓ Énergie.
- ✓ Agents dispersants utilisés dans les pesticides par exemple.
- ✓ Liants.
- ✓ Antioxydants.
- ✓ Additifs : produits nettoyants, plastiques vinyliques.
- ✓ Adhésifs : encres, panneaux de particules.
- ✓ Polymères : polyuréthane, fibres de carbone.

Produits chimiques : lignosulfonates, charbon actif, polyols, phénols

### II.2.3.3 Structures chimiques de la lignine

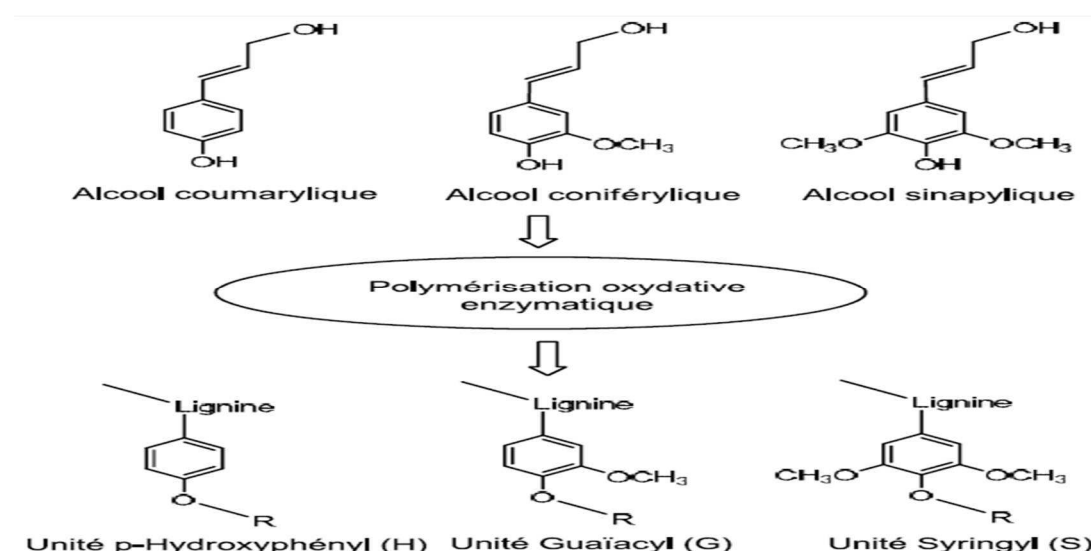
#### ➤ Structure moléculaire

On ne s'accorde toujours pas sur une définition unique et précise de la lignine du fait de sa grande variabilité et cela au sein même d'une espèce donnée, car sa formation dépend de l'environnement physico-chimique dans lequel le végétal croît. Il serait donc préférable de parler des lignines

Les lignines sont des polymères de monolignols. Il existe au moins trois types de monomères différents :

- L'alcool coumarylique, appelé unité H (hydroxyphényle), sans groupe méthoxy ;
- L'alcool coniférylique, appelé unité G (guaïacyle), à un groupe méthoxy ;
- L'alcool sinapylique, appelé unité S (syringyle), à deux groupes méthoxy

Ces unités phénoliques sont liées d'une manière covalente par différents types de liaisons d'éther et de carbone [1].

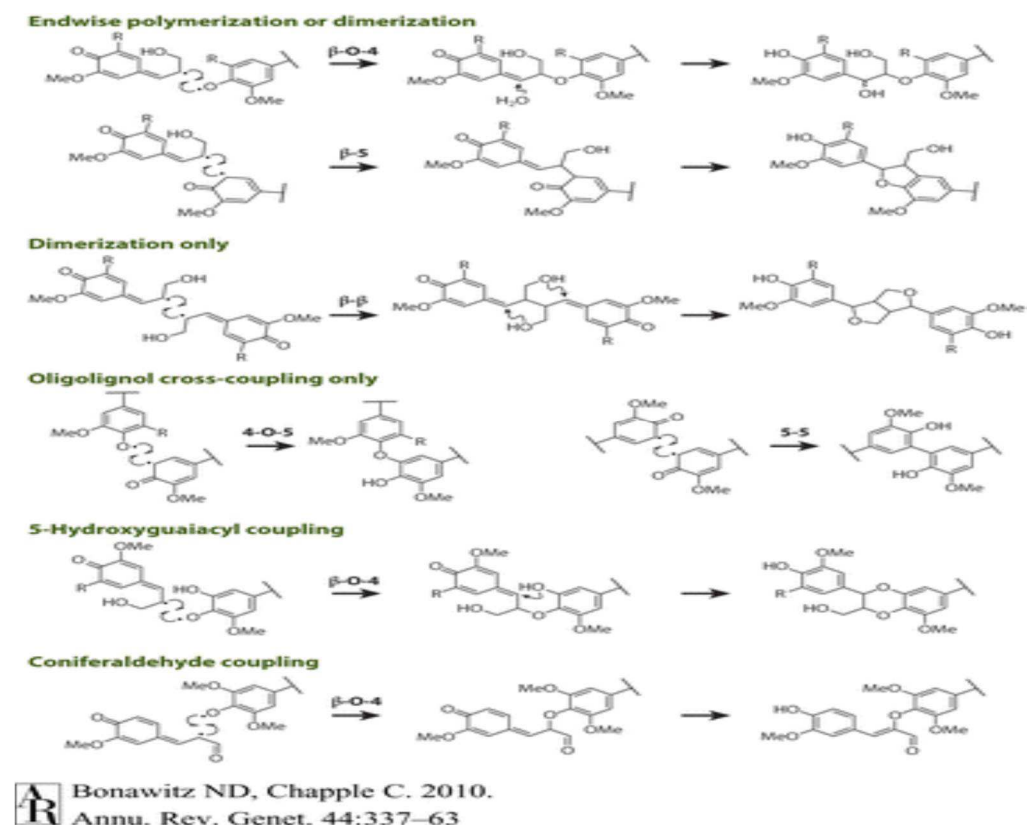


**Figure II.3** Monomères et unités principales impliquées dans la biosynthèse de lignine

#### ➤ Structure macromoléculaire

Le couplage des radicaux monolignols est favorisé à leur position  $\beta$ , et conduit à la formation de liaisons  $\beta$ -O-4 ( $\beta$ -aryl ether),  $\beta$ -5 (structure phénylcoumaran), et  $\beta$ - $\beta$  (structure résinol), le phénylcoumaran  $\beta$ -5 est une structure plus rigide et plus hydrophobe que celle produite par un couplage  $\beta$ -O-4. Ensuite, le dimère doit être déshydrogéné avant de pouvoir se

coupler à un autre radical monomère. Ce mode de polymérisation selon lequel un monomère radical s'ajoute à un polymère en croissance plutôt que de se combiner l'un à l'autre est appelée polymérisation « endwise ».[1]



**Figure II.4** Principales unités structurales de la lignine

### II.3 Principaux procédés d'extraction de la lignine

Tous les procédés chimiques papetiers procèdent en deux étapes pour la séparation des polymères lignocellulosique :

- Filtration de la cellulose restée insoluble, et concentration du filtrat (liqueur noire).
- Libération et solubilisation des hémicelluloses et de la lignine sous forme de «liqueur noire»

#### II.3.1 Procédé de klason

Cette méthode comporte deux (2) grandes étapes :

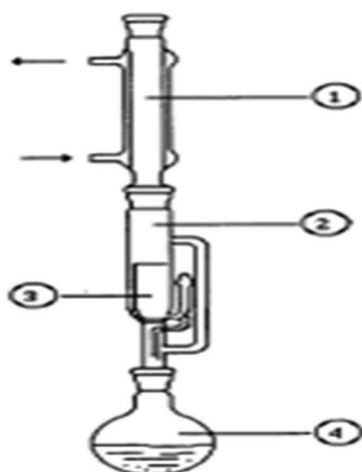
- 1- Consiste à éliminer l'extractible présente dans le bois.
- 2- Résume à traiter le résidu obtenu par l'acide sulfurique.

➤ **L'extraction au soxhlet des extractibles**

- 1- Utiliser la matière végétale préalablement broyée et de pré-extraire la lignine, afin d'éliminer toutes traces de produits organique.
- 2- La pré-extraction nécessite l'utilisation d'un soxhlet d'un volume de 250 ml, pouvant extraire une masse de 5,0 g de bois
- 3- La durée de cette étape nécessite un temps minimal de quatre heures (4h).

L'extraction au soxhlet permet d'éliminer les produits extractibles contenus dans la matrice, les solvants solubilisent les extractibles contenus dans la matière végétale.

L'avantage de cette méthode est extraire les produits extractibles avec des solvants comme le toluène et l'éthanol dans les proportions de l'ordre de 66,7 (v/v) et 33,3(v/v) , après quatre heures (4h) d'extraction le résidu et récupéré puis séché à une température constante de 28 C°.



**Légende :**

- 1- réfrigérant
- 2- soxhlet
- 3- support à échantillon
- 4- ballon [solvant]

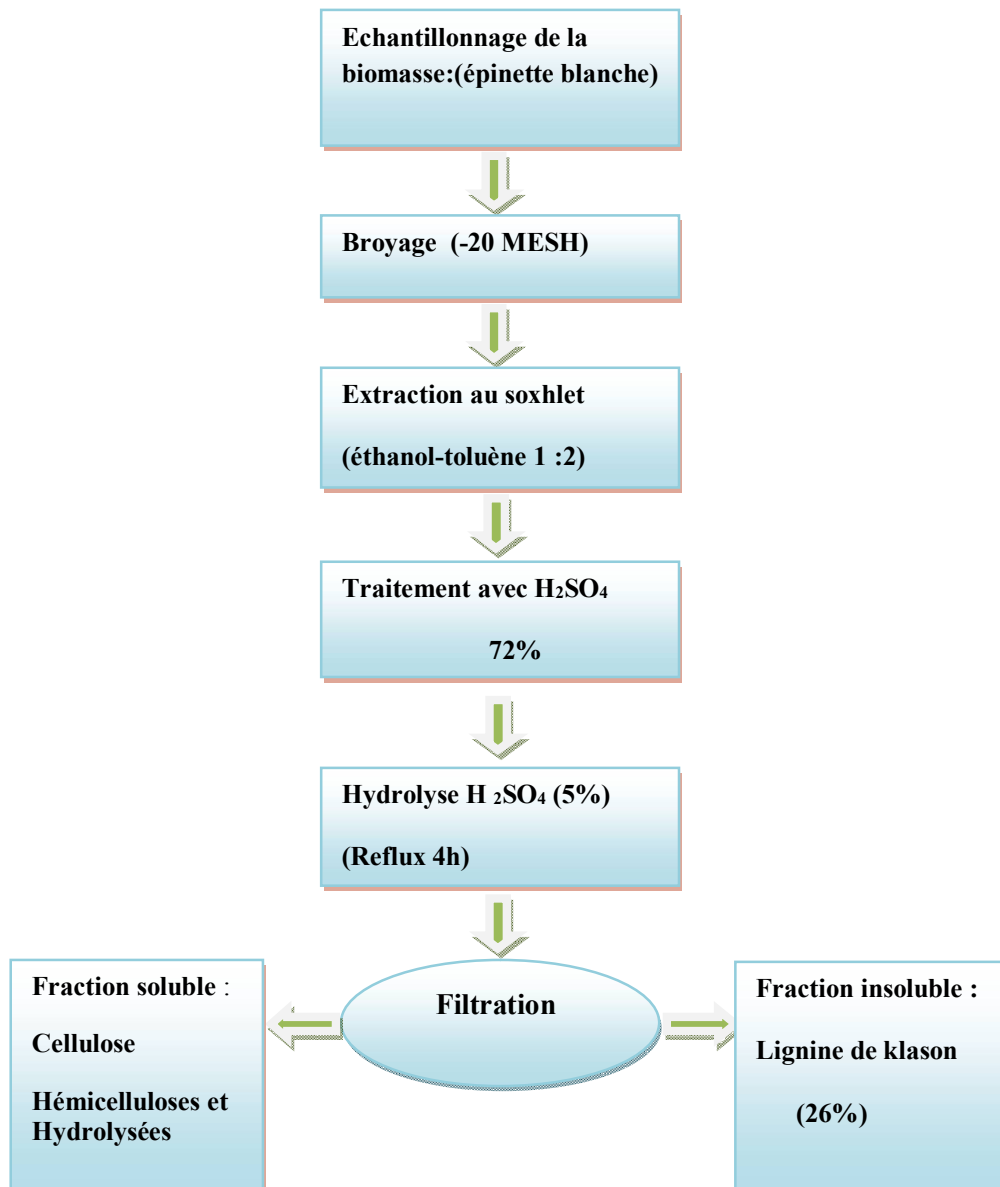
**Figure II .5** Montage de la prè-extract au soxhelt

➤ **Traitement avec l'acide sulfurique**

- 1- traiter le résidu obtenu précédemment par une solution d'acide sulfurique.
- 2- Une fois l'acide sulfurique 72% (v/v) ajouté au résidu, une suspension gélatineuse se forme après 30 secondes de contact.
- 3- La concentration en acide sulfurique est réduite à 40% par addition d'eau et une agitation constante pendant 60 minutes (60 min).
- 4- Ensuite, une hydrolyse acide est réalisée en diluant, par addition d'eau, l'acide sulfurique jusqu'à l'obtention d'une concentration de 5% (v/v).

Et ce là nécessite l'utilisation d'un ballon de 500 ml dépassé d'un réfrigérant et d'un système de chauffage à reflux pendant quatre heures (4h).

- 5- Et finalement, une filtration à chaud sur verre poreux est effectuée afin d'éliminer les traces d'acide et les sucres hydrolysés, Pour ce faire, le résidu est lavé avec de l'eau déminéralisée jusqu'à ce que le pH devienne légèrement acide, le résidu obtenu est séché à l'étuve et analysé par différentes méthodes spectroscopiques [12].



**Figure II.6** Schéma du protocole d'extraction de la lignine de Klason.

### II .3.2 Procédé Kraft au sulfure, alcalin

Le procédé kraft est le procédé chimique principal de fabrication de la pâte à papier dans le monde, Consiste à traiter le bois vers 170 - 175°C par de la soude et du sulfure de sodium (Les ions  $S^{2-}$  et  $HS^-$  très nucléophiles réagissent avec la lignine et coupent les liaisons éther) .Dans le procédé kraft, les produits chimiques actifs de cuisson (liqueur blanche) sont l'hydroxyde de sodium (NaOH) et le sulfure de sodium ( $Na_2S$ ). En raison de l'importante quantité d'hydroxyde de sodium utilisée, au début de la cuisson, la valeur du pH est comprise entre 13 et 14 (méthode de fabrication de la pâte alcaline), elle baisse continuellement pendant la cuisson du fait de la libération d'acides organiques contenus dans la lignine et les hydrates de carbone au cours de la réaction.

### II.3.3 Procédé au sulfite, acide

Le procédé au sulfite a été largement remplacé par le procédé Kraft (alcalin), les Lignosulfonates isolées des liqueurs usées du procédé au sulfite sont la source la plus importante de lignine,

Les lignines Kraft se retrouvent dans la liqueur noire et sont brûlées, ce qui explique leur faible volume, les Lignosulfonates contiennent des groupes sulfonâtes ( $-SO_3^-$ ) liés au polymère et sont par conséquent des poly-électrolytes anioniques solubles dans l'eau dans une grande gamme de pH22

### II.3.4 Procédé organosolv, au solvant organique

Procédé organosolv consiste à solubiliser et extraire la lignine et les hémicelluloses dans un solvant organique(en générale méthanol ou éthanol), un catalyseur acide (HCL ou  $H_2SO_4$ ) est souvent ajouter en faible quantité.

L'évaluation de ce procédé à été effectuée sur du bois tendre en utilisant une solution aqueuse d'éthanol à 40 – 60 %, et une température de 200 C<sup>0</sup>, le taux d'hydrolyse de la cellulose est supérieur à 90% et la lignine obtenue est de haut pureté.

Les procédés organosolves souffrent d'une consommation d'énergie trop importante due au recyclage des solvants par distillation

## II.4 Propriétés des lignines extraites

Les lignines sont :

- Des polymères amorphes thermoplastiques, tridimensionnels.
- Peuvent être mélangés avec la plupart des thermoplastiques pour produire des composites
- Tendre ont un Tg (température de transition vitreuse) légèrement supérieur aux lignines de bois dur.

## II.5 Applications des lignines extraites

### II.5.1 Applications à court, moyen et long terme

La lignine est le second polymère bio-basé sur Terre après la cellulose, la plus grande partie de la lignine est brûlée pour générer de l'énergie pour les usines de pâte à papier [13]

Les principales applications de la lignine sont:

- ✓ La lignine est employée uniquement comme source de carbone et des moyens agressifs
- ✓ Sont utilisés pour rompre sa structure macromoléculaire (est avantageusement conservée)
- ✓ Combustible, fournissant plus d'énergie par unité de masse que la cellulose, électricité, gaz de synthèse
- ✓ Liant dans l'alimentation animale pour plastifier et assurer la cohésion des pellets et additif pour les pellets de biomasse servant de combustible
- ✓ Composites à base de lignine et composant de matériaux polymères tels que film d'amidon, polymères conducteurs, polyesters et polyuréthanes;
- ✓ Molécule plateforme pour la production de fibres de carbone et conditionneur de sol [14] telles que les pales des éoliennes, Les fibres de carbone peuvent fournir une plus grande performance mécanique [15]. (figure II.7)



**Figure II.7** Pales d'éoliennes



- ✓ Incorporation de la lignine dans les plastiques et composites dérivés de plantes La synthèse de plastiques techniques et d'élastomères thermoplastiques, de mousses polymériques et de membranes.
- ✓ Produits chimiques à base aromatique tels que les phénols, benzène, toluène, xylènes résultant de la dépolymérisation de la lignine [16],
- ✓ Stabilisant UV et agent colorant
- ✓ Tensioactif

➤ **Résumé des applications présentes et potentielles**

**Tableau II.1** Principales applications à court terme (~2015), moyen terme (~2019) et long terme (~2025) de la lignine\*

Catégories		Exemples
Court terme/faible valeur ajoutée	Bioénergie, gaz de synthèse	Chaleur, électricité
Moyen terme/moyenne à haute valeur ajoutée	Macromolécules	Fibres de carbone Modificateurs de polymère Résines/colles/liants
Long terme ou haute valeur ajoutée	Monomères et oligomères aromatiques	Benzène, toluène, xylène Vanilline Molécules de lignine monomères Molécules plateformes (phénoliques, styrène )

➤ **Catabolisme des noyaux aromatiques**

La lignine, Jusqu'à présent n'a pas été convertie efficacement en carburants et en produits chimiques issus de la biomasse certains microorganismes ont développé des voies métaboliques qui permettent l'utilisation des molécules aromatiques dérivées de la lignine comme sources de carbone [17]

**➤ Carburants**

Certaines fractions de la lignine issues d'une bioraffinerie ne devraient pas convenir pour des applications de chimie de synthèse de matériaux mais peuvent convenir pour une conversion en carburant, La dépolymérisation de la lignine fait face à des défis importants vu la grande distribution des forces de liaison dans les diverses liaisons C-O et C-C dans la lignine et la tendance pour les espèces de bas poids moléculaire de subir une recondensation, souvent vers des espèces plus récalcitrantes

**II.6 les adjuvants**

Adjuvants les plus fréquemment utilisés sont :

- ✓ Les super fluidifiants conviennent en outre pour la fabrication de béton à consistance fluide (béton fluidifié).
- ✓ Les plastifiants, ils réduisent l'exigence en eau ou améliorent l'ouvrabilité, ou font l'un et l'autre.

Les super fluidifiants s'appliquent également aux plastifiants, mais dans une moindre mesure, Cela ressort par exemple des performances requises de ces deux adjuvants quant à l'augmentation de la résistance à la compression pour le béton durci, et à la réduction d'eau pour le béton frais [18]

**II.6.1 Les principaux plastifiants et super fluidifiants**

La composition chimique des principaux plastifiants et super fluidifiants est très complexe, car il s'agit de polymères dont la constitution peut varier.ils peuvent provenir de produits naturels modifiés chimiquement comme les sulfonâtes de lignine , ainsi que les composés polyvinyliques synthétiques encore relativement peu répandus , D'autres informations sur la fabrication et certaines propriétés sélectionnées des super fluidifiants et plastifiants les plus fréquemment utilisés figurent dans l'encadré «Les principaux plastifiants et super fluidifiants»

**1- Les sulfonâtes de lignine**

Les sulfonâtes sont des sous produits de la cellulose obtenus par un procédé au bisulfite dans le traitement du bois, leur taux élevé en sucre (xylose) est la raison de l'effet retardateur et sont aussi :

- 1- Des acides sulfoniques
- 2- Des produits lors de la fabrication de papier ou de cellulose par dissolution acide des sulfites

- 3- souillés par d'autres substances contenues dans le bois, telles que sucre, produits de dégradation de la cellulose et lignine même.
- 4- utilisés pour leur pouvoir liant et agglutinant, ainsi que pour leur caractère tensio-actif.
- 5- agissent autant que plastifiant du béton frais même en faibles concentrations: 0,2 à 0,5 % d'une solution aqueuse à 30 %

Mais Pour pouvoir être utilisés sous forme de plastifiants ou super-fluidifiants, ils doivent être purifiés [19].

Les sulfonâtes de lignine sont efficaces plus long temps, mais leur activité faiblit au début plus fortement que celle des autres supers fluidifiants.

- **Les Avantages des sulfonâtes de lignine**
  - Retarder légèrement la prise grâce au sucre contenu dans le sulfonâtes de lignine ;
  - Assure une ouvrabilité de plus longue durée ;
  - Réduire les coûts.

### **II.6.2 Effet des plastifiants et super-plastifiant**

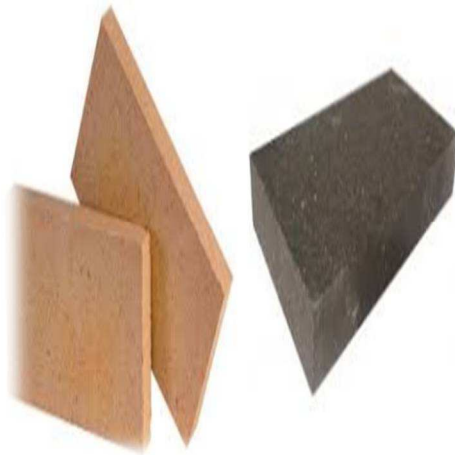
Les effets des plastifiants et super-fluidifiants sont principalement de nature physique dans le béton frais c'est-à-dire n'influencent pas, de nombreux facteurs influencent l'action des plastifiants et super fluidifiants, on compte parmi les plus importants: la consistance du béton, le système d'adjonction et de malaxage, la teneur en eau, les adjuvants (type et fabricant), le ciment (composition, finesse et dosage), et les granulats (forme et grosseur des grains) [20].

### **II .7 Conclusion**

La valorisation de la lignine est une des pistes importantes qu'entendent explorer chercheurs et industriels, d'un point de vue économique, il y a une grande cohérence à valoriser toutes les parties de la plante dans une approche intégrée de bio-raffinage, qui peut être défini comme le processus durable de transformation de la biomasse en produits bio basés et en bioénergie.

# *Chapitre III*

## *Les matériaux réfractaires*



### III.1 Historique

Réfractaire est un terme français recensé en 1539 par Robert Estienne, La racine latine est portée par le verbe refringere dont le premier sens est briser, abattre une cloison, le second sens est déjà relatif à la déviation des rayons lumineux entrant dans l'eau ou dans une substance vitreuse la réfraction ou réfringence lumineuse est une bonne illustration, la déviation du faisceau lumineux selon la loi de Snell-Descartes obéit à une contrainte des milieux physiques ou des phases traversés, le milieu ou la phase est caractérisé par un indice de réfraction  $n$  dont la valeur est corrélée à la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu, au passage de l'interface, une loi s'est substituée à une autre, dévoilant une brisure ou une séparation de phase pour la propriété physique

Le terme réfractaire a été appliqué à des matériaux résistants à la pénétration du flux calorifique c'est-à-dire à de hautes températures en 1762, le vieux vocabulaire associé s'est maintenu et parfois a perduré dans les techniques modernes. Ainsi, en 1804, apparaît le réflecteur en céramique blanche, placé dans le renflement intérieur de nouvelles cheminées anglaises et améliorant le rendement par rayonnement.

Le renouvellement des conceptions sur la chaleur, en particulier l'équivalence avec l'énergie démontré par Mayer et Joule, vers 1845, n'a pas modifié les terminologies techniques, d'autant plus que la notion de température n'a été comprise que par des approches statistiques dites de statistique de Maxwell-Boltzmann .

Les premières études des matériaux réfractaires en particulier les faïenciers et fabricants de porcelaine, la définition de la haute température définit le matériau réfractaire, qui résiste à 1 000 °C. Elle est plutôt de l'ordre de 1 200 °C pour les céramistes en 1900 [21].

### III.2 Définitions

La norme ISO 1927 de 1984 ne stipule que «les matériaux réfractaires» sont des produits qui conserve ses caractéristiques physico-chimiques jusqu'à des valeurs élevées de température, et la fusion du matériau n'apparaissant qu'au de là des conditions d'emploi, En plus de cette résistance élevée, on exige souvent des réfractaires qu'ils aient :

- ✓ Une bonne résistance aux chocs thermiques ;
- ✓ Une faible conductivité thermique ;
- ✓ Une bonne résistance à la corrosion (acieries, four de verrerie...) [22]



Figure III.1 Quelques produits réfractaires

### III.3 Classification des produits réfractaires

Les produits réfractaires sont classés comme suit [23] :

#### III.3.1 Selon la réfractérite

- **Réfractaire** : température 1350 à 1550 C°.
- **Hautement réfractaire** : température 1580 à 1770 C°
- **Très hautement réfractaire** : température entre 1770 à 2000C°.
- **Super réfractaire** : température 2000 C°.

#### III.3.2 Selon la fabrication

- **Produits réfractaires façonnés : cuits, non cuits, électrofondus ...etc.**
- **Produits réfractaires** : produits broyés réfractaires enduit et mortiers réfractaires, masse à maçonner ...etc.
- **Produits réfractaires poreux façonnés, matériaux fibreux ... etc.**

### III. 3.3 Selon la structure

#### ➤ Réfractaires denses

- Très denses : porosité inférieure à 10%
- Denses : porosité comprise entre 10 et 30 %
- Peu denses : porosité comprise entre 30 et 45%

#### ➤ Réfractaire isolant ou légers

- Porosité supérieure à 45%

### III.3.4 Selon la composition chimique

Tableau III.1 Classification des produits réfractaire (norme ISO 1109)

Système	Désignation	Matières premières	Teneur en oxyde principal
<b>Produits silico-alumineux</b> $Al_2O_3+SiO_2$	Extra-alumineux	Andalousite ( $60\%Al_2O_3$ ) ou la bauxite	$Al_2O_3 > 56\%$
	Alumineux	argile avec un produit haut teneur en alumine	$45\% < Al_2O_3 < 56\%$
	Argileux	Argile réfractaire	$30\% < Al_2O_3 < 45\%$
			$30\% < Al_2O_3 < 33\%$
			$33\% < Al_2O_3 < 37\%$
			$37\% < Al_2O_3 < 40\%$ fil
			$40\% < Al_2O_3 < 42\%$
			$42\% < Al_2O_3 < 45\%$
	Silico-argileux	Chamotte ( $42-45\% Al_2O_3$ )	$10\% < Al_2O_3 < 30\%$ avec $SiO_2 \leq 85\%$
Siliceux de silice	silice siliceux, silice volatilisée	$85\% < SiO_2 < 93\%$	
		$SiO_2 > 93\%$	
<b>Produits basiques</b>	Magnésie	Magnésite, dolomie frittée	$MgO > 80\%$
	magnésie -chrome Produits de dolomie		$55\% < MgO < 80\%$
	chrome-magnésie		$25\% < MgO < 55\%$
	Chromite	Chromite	$Cr_2O_3 > 25\%$
	Forstérite		$MgO < 25\%$
<b>Produits spéciaux</b>	Carbone, graphite, zircone,...		$SiC$ $ZrO_2$

### III.4 Les différentes familles des produits réfractaires

#### III.4.1 Réfractaires façonnées denses

Ce sont les produits classiques, leur porosité totale (ouverte ou fermée) doit être inférieure à 45%, ils sont livrés sous forme de briques normales et d'assortiment de briques ou pièce de formes spéciales, ces produits sont généralement agglomérés par cuisson (liaison céramique), toutefois, il peut être livrés non cuits ou agglomérés à faible températures (150C° à 800C°) par liaison chimique et traitement thermique.

La mise en forme à lieu :

- Par moulage en plastique (porosité totale des produits 18 à 35%), tolérance de dimension + ou - 2% ;
- Par compression à sec d'un mélange pulvérulent (porosité 12 à 25%) tolérance de dimension + ou - 1 à 1,5% ;
- Ou dans certains cas par moulage en « barbotine » dans un moule en plâtre démontable.

Les produits comprimés à sec peuvent être moins poreux, de dimension plus précise et de meilleure résistance aux chocs thermiques, mais à condition d'être très bien fabriqué en haut compression notamment.

#### III.4.2 Réfractaires non façonnés préparés

Ce sont des mélanges contenant un ou plusieurs constituants réfractaires et un liant, préparés pour être mise en oeuvre, les produits non façonnés préparés sont livrés, prêts à l'emploi soit à l'état de pâte soit à l'état pulvérulent

Les mélanges pulvérulents prêts à l'emploi par addition d'eau sont :

- Les coulis de jointoiement, durcissant à chaud (liaison céramique)
- Les réfractaires monolithiques à couler/vibrer, durcissant à froid, utilisés pour les réparations et les constructions monolithiques ils peuvent être denses ou isolants
- Les mélanges projetables de compositions analogues peuvent être projetés à l'aide de machines à projeter, les produits pouvant être transportés à l'état sec ou déjà mélangés avec l'eau
- Les mélanges isolants à couler/ projeter ayant les mêmes fonctionnalités que les façonnés équivalent

On peut citer un des réfractaires non façonnés « bétons réfractaires »



### III.4.2.1 Béton réfractaire

Les bétons réfractaires appartiennent à la classe des matériaux non-façonnés et sont principalement issus d'un mélange de granulats réfractaires et d'une matrice cimentaire (ciment, additifs et ultrafines). 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 [24]. La matrice cimentaire est un agent de liaison qui permet d'assurer en permanence la cohésion de l'ensemble des constituants.

On distingue deux grandes familles :

#### ✓ Les bétons réfractaires denses

Les bétons réfractaires denses sont considérés comme tels dès lors que leur densité est égale ou supérieure à  $1750 \text{ Kg/m}^3$  et dont l'application est destinée aux installations présentant des risques chimiques, mécaniques ou d'abrasions.

La conductivité thermique étant liée à la densité, les bétons réfractaires denses sont conducteurs et donc très peu isolants.

#### ✓ Les bétons réfractaires isolants

Les bétons réfractaires isolants ont des densités après cuisson de  $1500 \text{ Kg/m}^3$  ou moins, Ils sont prioritairement utilisés pour la construction d'enceinte ou de fours ne présentant pas de risques mécaniques majeurs, leurs premières vertus étant de limiter les déperditions thermiques.

Les bétons réfractaires isolants sont couramment utilisés pour la réalisation de pièces de formes moulées.

### III.4.2.2 Domain d'utilisation de béton réfractaire

- 1- Four de traitement thermique ;
- 2- four de céramique ;
- 3- four à forge et four de cimenterie.

### III.4.3 Les réfractaires électrofondus et frittés

Les produits électrofondus sont fabriqués par fusion au four électrique de la matière réfractaire et coulés dans un moule approprié, les produits frittés mise en forme par forte compression à sec sont agglomérés par une cuisson à haute température, dans les deux cas on obtient des produits de haute compacité (porosité souvent voisine de zéro), les

principaux types de produits électrofondus et frittés à usage industriel sont à base d'alumine silice, zircone, ou de leurs combinaisons (en particulier mullite) ainsi que le chrome, magnésium (électro – fondus).

#### **III.4.4 Les réfractaires isolants façonnés rigides**

Les produits réfractaires isolants façonnés rigides doivent être réfractaires ( $R.P > 1500\text{ C}^\circ$ ) et présenter une porosité totale d'au moins 45% du volume apparent, cette porosité atteint parfois 85%, ils sont moulés ou mis en forme par forte compression et généralement agglomérés par cuisson, la porosité est obtenue par des moyens très divers la densité va de 1/6 à 1/2 de celle des produits denses de même nature chimique, les conductivités thermiques sont réduites dans des proportions analogues (du moins aux basses températures).

Ces produits sont surtout fabriqués en argile réfractaire (densité allant de 0,4 à 1,2) mais également en alumine, silice etc.

### **III.5 Propriétés des matériaux réfractaires**

Les matériaux réfractaires doivent :

- Résister aux contraintes thermiques et mécaniques sans risque de rupture
- Ainsi des tests sont effectués pour mesurer leur résistance à la traction, à la compression et à la déformation (le fluage)

D'autres mesures sont réalisées pour évaluer l'élasticité des matériaux réfractaires lorsqu'ils sont soumis à hautes températures sans modifications substantielles de leurs propriétés mécaniques.

#### ➤ **Remarque**

L'élasticité est la déformation temporaire du matériau

### **III.6 Caractérisation des matériaux réfractaires**

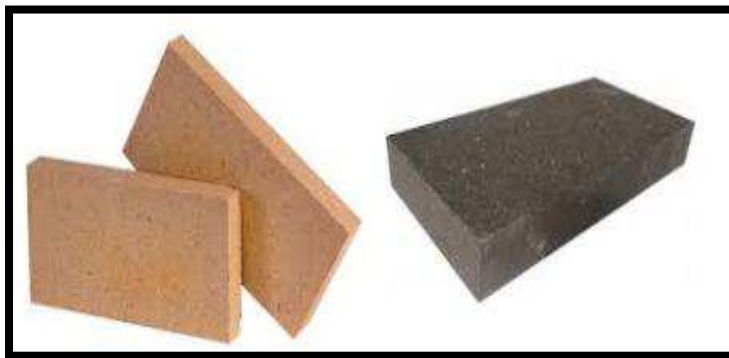
Les produits réfractaires sont caractérisés par leur propriété physique, thermique et chimique qui indique souvent l'utilisation et les performances des matériaux réfractaires :

- 1- densité
- 2- porosité et abrasion
- 3- La dilatation thermique et le choc thermique

## 4- La conductivité thermique

**III.7 Les briques réfractaires****III.7.1 Définition**

Une brique réfractaire est une brique qui conserve ses propriétés mécaniques à haute température (800 °C minimum). Ces briques résistent par nature aux températures élevées et sont utilisées pour la réalisation et la réparation de fours à pain, fours à pizza, barbecues et foyers de cheminées. Traditionnellement, on distingue la brique réfractaire de chamotte à base d'argile et la brique à la vermiculite qui est un minéral naturel.

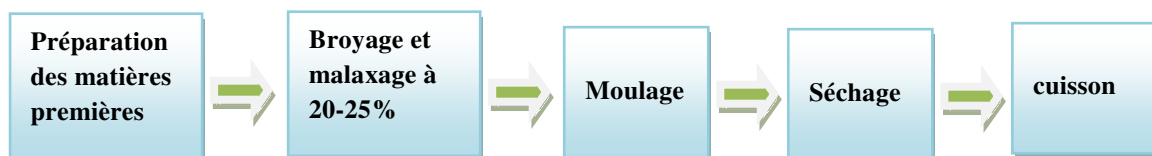


**Figure III.2** Briques réfractaires

**III.7.2 Principe de fabrication des briques réfractaires**

Les briques sont obtenues à partir de plusieurs compositions faites de mélanges argile chamotte-eau. Le compactage s'est fait à l'aide d'une presse manuelle à compactage statique dont le moule en forme de parallélépipède rectangle permet d'obtenir des blocs de dimensions 22 x 10 x 4 cm. Les blocs après séchage pendant 30 jours dans une salle dont la température est de  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  et d'humidité d'environ 65%, ont subi une cuisson à  $1280^\circ\text{C}$  dans un four électrique [25]

L'ensemble des étapes de confection des briques réfractaires peut être résumé par le schéma suivant:



**Figure III.3** Schéma de la fabrication des briques

### III.7.3 Déchet de brique

les déchets de briques sont des matériaux inertes ou résidus qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique important il 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 , ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de travaux publics ou de l'industries de fabrication de matériaux de construction .

les briques réfractaires se retrouvent souvent dans les dépliants des fournisseurs et des fabricants tant de cheminées que de barbecues et de four il semble que ce mot permette de réaliser toutes sortes de performances calorifiques , la brique réfractaire est conçue pour résister à la chaleur en plus de résister à la chaleur la brique réfractaire a également la capacité de restituer la chaleur , c'est ce que l'on appelle la convection et c'est un élément majeur du succès de la brique réfractaire .[26]

### III.7.4 Domaine d'utilisation de brique réfractaire

Les briques réfractaires sont utilisées principalement pour les constructions destinées à résister à une source de chaleur directe ou indirecte :

- Un foyer de cheminée
- Un barbecue
- Un four artisanal (four de boulanger, four à pizza,...)
- Un mur situé à proximité d'une grosse source de chaleur

### III.7.5 L'influence de la chaleur sur les briques réfractaires

Briques réfractaires possèdent une forte inertie thermique, ils chauffent relativement lentement et une fois à température élevée ils refroidissent avec lenteur, une plaque réfractaire permet aux parois des fours de contenir la source de chaleur. [27]

Comme ces matériaux sont souvent de mauvais conducteurs de la chaleur, ils diminuent la déperdition calorifique d'un système de chauffage ou assurent une appréciable isolation thermique, Cette inertie thermique est caractérisée par un coefficient appelé capacité thermique :

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Avec :

- ✓  $Q$  = chaleur évacuée en joules.
  - ✓  $m$  = masse du corps en kg.
  - ✓  $C_p$  = capacité calorifique massique à pression constante du corps, en J/Kg.K.
- $\Delta T$  = différence de température entre le corps et le fluide, en kelvin

Technologie innovante « convection et rayonnement naturel »

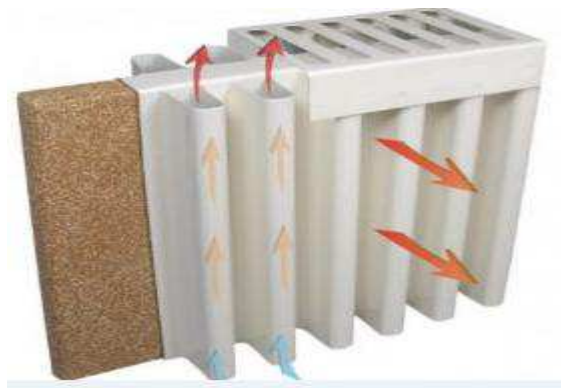


Figure III.4 Transfert de chaleur entre les parois

### III.7.6 Types de brique réfractaire

Les principaux types des briques réfractaires sont [28] :

#### III.7.6.1 Brique ordinaire

Une brique ordinaire est une roche artificiel ayant la forme parallélépipédique rectangle de dimension bien déterminées, sont généralement fabriquées suivant deux procédés : procédé plastique (l'argile est humectée d'eau de 20 à 25%) et procédé demi-sec (l'argile est humectée d'eau de 8 à 12%), sont cuits après moulage et séchage, généralement les dimensions d'une brique ordinaires 250X120X5 mm mais il est difficile d'obtenir des briques ayant des dimensions exactement précise [29].

- ✓ La capacité d'absorption d'eau d'une brique ne doit pas être inférieure à 8 %.

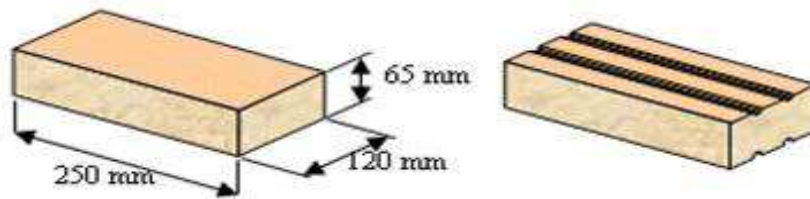


Figure III.5 Briques pleines et perforées

### A- Caractéristiques des briques pleines ou perforées

Les caractéristiques de briques sont très importantes pour définir leurs types, le tableau suivant représente ces caractéristiques :

Tableau III.2 Dimensions et résistances des briques

Dimensions courantes (mm).				Résistances moyennes		
	Epaisseur	largeur	longueur	Catégorie	Résistances	
					MPa	Bar
<b>Briques pleines ou perforées</b>	40	105	220	I	20	200
	55	105	220			
	60	105	220	II	30	300
	55	105	330	II	40	400

### B- Utilisations

- Des murs simples ou doubles enduits ou non
- Des parements extérieurs ou intérieurs décoratifs (appareillages en briques)

#### III.7.6.2 Briques d'argiles creuses à perforations

Les briques creuses sont fabriquées par voie demi-sèche. Ces briques doivent avoir les dimensions suivantes : 250 x 120 x 88 mm ou bien 65mm, les trous de la perforation sont faits soit verticalement dans la proportion de 60 % de la section totale, soit horizontalement avec alvéoles parallèles au lit de pose dans la proportion de 40 % de la section totale, leur capacité d'absorption d'eau à la même valeur que pour la brique ordinaire donc > 8 %, La résistance à la flexion est de 20, 18, 16 et 14 kg/cm<sup>2</sup>[28]

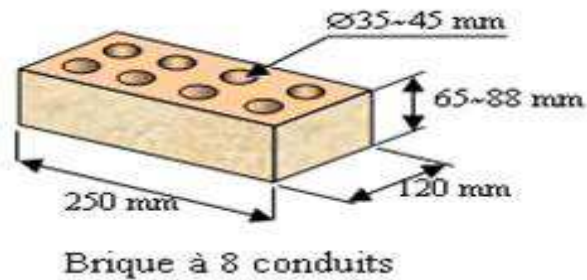


Figure III .6 Briques creuses comprimées par vois demi -humide

### III.7.6.3 Brique poreuse

Les briques poreuses peuvent être fabriquées par la technologie traditionnelle en utilisant les argiles ordinaires on ajoute des additions fusibles (sciure de bois, tourbe pulvérisée, charbon pulvérisé) la résistance d'une brique poreuse étant faible, ce type de briques ne peut pas être utilisé pour construire des murs supportant de fortes charges elles seront plutôt employées pour le remplissage des bâtiments à ossature métallique ou béton armé, l'emploi des briques poreuses permet de réduire les dépenses de transport et donc le prix des murs [28] .

### III.8 les briques à base d'oxyde de zircon corindon

Dans notre travail on 'a utilisé briques réfractaires a base de zircon corindon

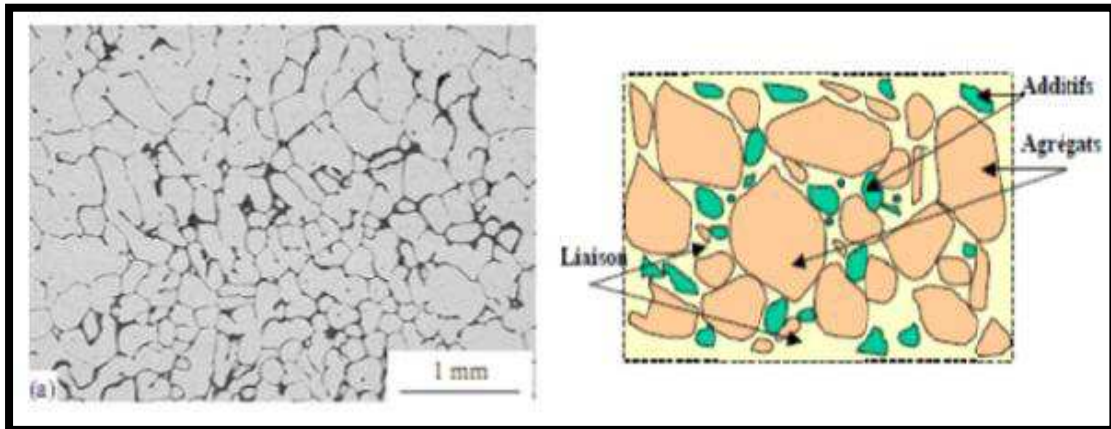
#### III.8.1 Définition

Les composants minéraux principaux sont des phases de corindon et de mullite sable et eaccrueréglables zircon. Ces produit est largement utilisé dans la régénération de la chambre de four à verre sont caractérisés par leur caractère réfractaire élevé, bonne stabilité thermique et résistance à la corrosion et à l'érosion du liquide en verre. Elles utilisent pour le matériel de température élevée dans le four en verre, la poche en acier fondue



Figure III.7 Brique de zircon

## III.8.2 Microstructure de brique de zirconium



**Figure III.8** Microstructure des briques haut teneur en zircone-corindon

Cette figure (24) montre les microstructures de réfractaires zircone-corindon électro fondus, Ces produits réfractaires sont des céramiques hétérogènes, toujours polyphasées, comportant un squelette plus ou moins grossier lié par une matrice de granulométrie fine, généralement sont constituer par :

▪ **Les agrégats**

Sont en général constitués par un ou plusieurs minéraux, Ces minéraux constituent entre 70 et 100% de la composition du produit, en occupent bien souvent toute la répartition granulométrique et toujours la partie la plus grossière.

▪ **Les différents systèmes de liaison**

Constituent le moyen indispensable d'assurer en permanence la cohésion de l'ensemble des constituants des produits réfractaires

▪ **Les additifs**

La matrice est en général le maillon le plus faible du matériau. La tendance actuelle est de renforcer les caractéristiques de cette matrice par l'introduction de particules ou de poudres de synthèse, fines et ultra fines, ayant les caractéristiques suivantes :

- Une grande pureté,
- Une distribution granulométrique étroite,
- Un fort rapport surface / volume et une grande réactivité chimique.



### III.8.3 L'oxyde de zirconium

C'est un composé du zirconium qui a de nombreuses applications, la zircone,  $ZrO_2$ . C'est un oxyde réfractaire qui présente plusieurs transformations structurales : à température ordinaire,  $ZrO_2$  est monoclinique, à 1165 °C, sa maille devient quadratique et, à 2370 °C, sa str. Les zircons stabilisés sont utilisés comme hauts réfractaires sous forme de briques ou de revêtements des fours pour les hautes températures

➤ **Les caractéristiques d'oxyde de zirconium**

- ✓ Excellentes propriétés mécaniques aux températures élevées,
- ✓ Conductivité thermique faible à température ambiante,
- ✓ Conducteur électrique à  $T > 1.000^\circ C$ ,
- ✓ Grande dureté, bonne résistance à l'usure,
- ✓ Bonne inertie chimique,
- ✓ Bonne résistance aux attaques des métaux.

Il existe deux sortes de zircon :

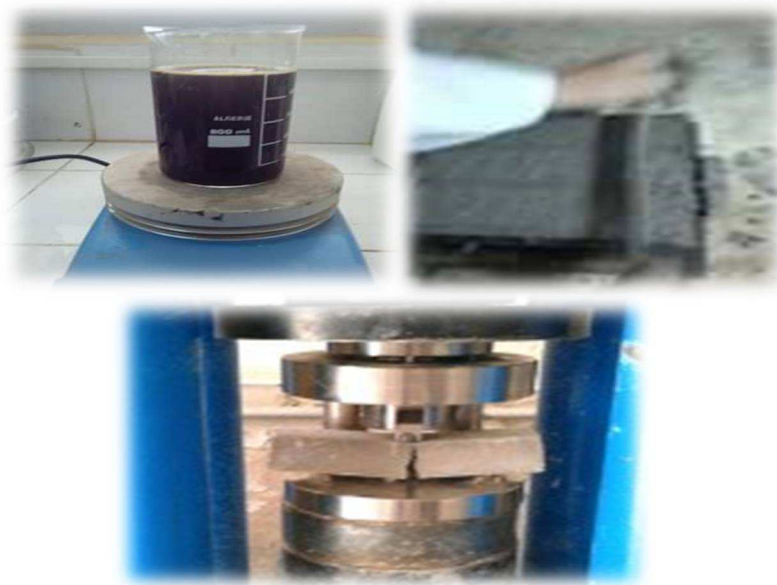
- 1- Zircone non stabilisée, utilisée en tant qu'additif, matériau de revêtement, poudre abrasive,
- 2- Zircone stabilisée à l'yttrium ( $ZrO_2/Y_2O_3 = TZP$ ) ou à la magnésie ( $ZrO_2/MgO = PSZ$ ).

### III.8.4 Le corindon

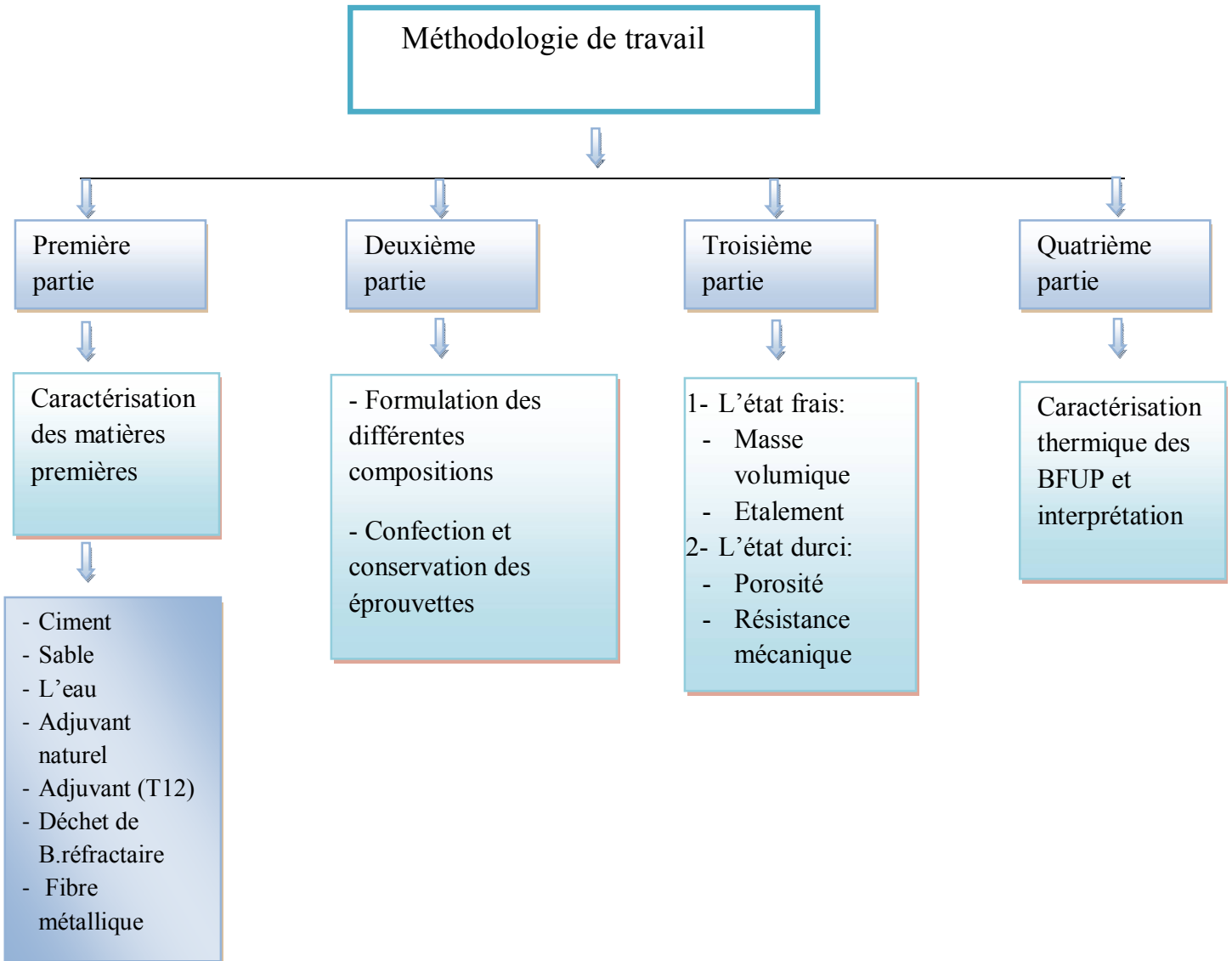
Le corindon, alumine anhydre rhomboédrique, se trouve généralement dans les pegmatites et les produits de contact. Au laboratoire, le corindon (alumine alpha) s'obtient par calcination de l'hydrate d'alumine à 1200°C. Sa densité est de 3.9 à 4.0 et fond de façon congruente vers 2050°C. La dureté de corindon est de 9 sur l'échelle de Mohs, que la pierre soit naturelle ou artificielle, ce qui en fait le deuxième minéral naturel le plus dur après le diamant, C'est une matière hautement réfractaire

# *Chapitre IV*

## *Partie expérimentale*



## Organigramme de partie pratique



### IV. Méthodologie et objectif du travail

Dans cette partie nous exposerons notre travail pratique effectué au niveau de laboratoire (LHCC), ce travail consiste à déterminer les caractéristiques physico-mécaniques d'un BFUP (béton fibré à ultra hautes performances) à base de fibres métalliques et déterminer l'effet de l'ajout de déchet de brique réfractaire comme ultrafines à la place de la fumée de silice sur les caractéristiques de BFUP,

✚ **La première partie** considère la caractérisation de toutes les matières premières à savoir :

- Le ciment [CEM II 42.5 de Sour el ghazlane].
- Le sable des dunes [sable oued souf <2mm].
- L'eau.
- L'adjuvant [tempo 12 Sika].
- L'adjuvant naturel
- Déchet de brique réfractaire finement broyé.
- Fibres métalliques.

✚ **La deuxième partie** est consacrée à :

- ✓ Formulation des différentes compositions de BFUP
- ✓ Confection et conservation des éprouvettes.

✚ **La troisième partie** expérimentale fait l'objet d'étude des propriétés suivantes :

- ✓ Les caractéristiques physiques et mécaniques des BFUP
  - A l'état frais : la masse volumique, l'étalement
  - A l'état durci : les résistances mécaniques, porosité

✚ **La quatrième partie** s'intéresse à l'effet de température sur ces Bétons :

- Caractérisation thermique des BFUP et interprétations.

## ❖ Première partie

**I. Caractérisation des différents constituants****I.1 Ciment**

Le ciment utilisé est un CEM II 42,5 de Sour El Ghozzlen

**I.1.1 Caractéristiques physiques****Tableau IV.1** Caractéristiques physiques du ciment

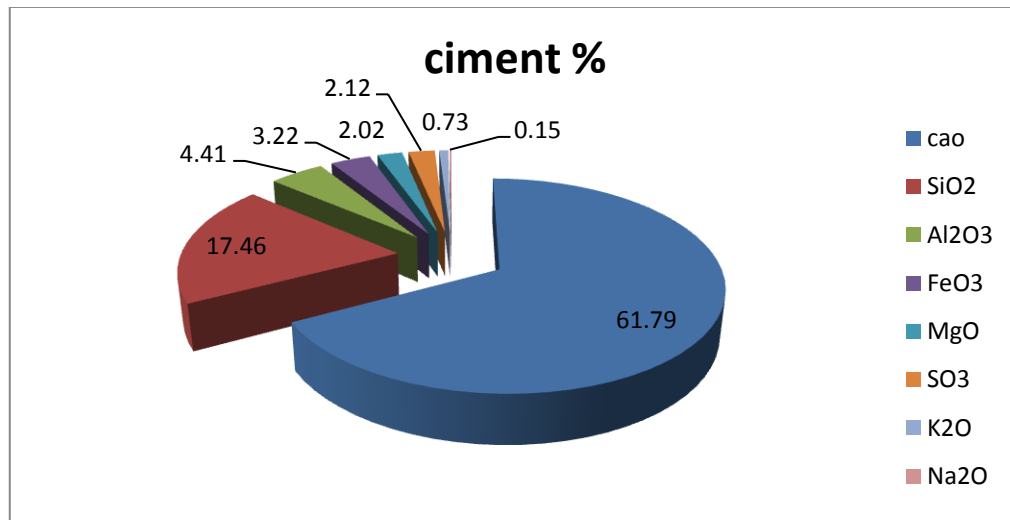
Caractéristiques		Valeur	Unité
SSB		3961	cm <sup>2</sup> /g
Masse spécifique		3,08	g/cm <sup>3</sup>
C. normale		26	% H <sub>2</sub> O
Délais de prise	début de prise	120	mn
	fin de prise	255	

**I.1.2 Composition minéralogique du ciment****Tableau IV .2** Composition minéralogique du ciment

Elément	%
Silicates tricalciques C <sub>3</sub> S	63,08
Silicates bi calciques C <sub>2</sub> S	12,75
Aluminates tricalciques C <sub>3</sub> A	5,74
Alumino-ferrites tétra-calciue C <sub>4</sub> AF	11,67

**I.1.3 Composition chimique du ciment****Tableau IV. 3** Composition chimique du ciment

Eléments	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
%	61,79	17,46	4,41	3,22	2,02	2 ,12	0,73	0,15



Figures IV.1 Cercle des pourcentages de la composition chimique du ciment

#### I.1.4 Classe vraie du ciment

Tableau IV.4 Classe vraie du ciment

28 jours	
Résistance à la compression (MPa)	34

#### I.2 Sable (sable d'oued souf)

##### I.2.1 Caractéristiques physiques

Tableau IV.5 Caractéristiques physiques du sable

Caractéristiques	Valeurs	Unités
Physiques		
M .volumique apparente	1,68	g/cm <sup>3</sup>
M .volumique absolue	2,56	g/cm <sup>3</sup>
Teneur en eau	6,70	%
Absorption	1,2	%
Porosité	1,73	%

##### I.2.2 Equivalant de sable (NF EN 933-8)

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, et effectuer sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5mm. Il prend compte

globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport, conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport multiple par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du flocculat et de la partie sableuse sédimentée.

**Tableau IV.6** Résultat d'équivalent de sable

	1 <sup>ère</sup> Prise	2 <sup>ème</sup> prise
Heure de début d'essai	10H 45mn	10H 50mn
Heure début +10mn	10H 55mn	11H00mn
Heure de lecture (20mn après lavage)	11H15mn	11H20mn
Hauteur totale $H_1$ (cm)	10 ,00	10 ,10
Hauteur $H_2$ (cm) (ESP=43- $H_2$ )	7,5	7,7
Hauteur de sable $H_2'$ (cm)	35	33,5
ESP=100( $H_2/H_1$ )	75	76
<b>Moyenne</b>	<b>75,5</b>	



**Figure IV.2** Mesure des particules fines

➤ **Remarque**

Après l'essai de l'équivalent de sable, on a constaté qu'il s'agit d'un sable propre, son équivalent de sable  $\geq 70$  donc il convient pour notre composition des BFUP

**Tableau IV.7** Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable

E.S.V	E.S.P	Types de sables	Influences
<65	<60	Argileux	Risque retrait ou gonflement
>65	<75	Très argileux	Retrait assez fort
75-85	70-80	Bon sable	Béton haute qualité
>85	>80	Manque de fines argiles	Manque de plasticité

**I .2.3 Friabilité du sable (NF P 18-576)**

Cet essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique des sables produits par fragmentation dans un cylindre en rotation à l'aide d'une charge en présence d'eau, les éléments inférieurs à 0,2 mm, ne sont pas étudiés. Le sable écrêté à 2 ou 4mm.

La friabilité des sables est la quantité des éléments inférieurs à 0,1mm produits au cours de l'essai. Cet essai a été réalisé selon les modalités de la norme NF P18-576.

**Tableau IV.8** Friabilité de sable (Oued Souf)

Classe granulaire	Etat	M Masse initiale (g)	m' Masse du refus sur le tamis 0,1mm	M Masse du passant au tamis 0,1 mm	Coef friabilité %
0.2-4	Humide	500	410	90	18

**Figure IV.3** Appareil Micro Deval



## I.2.4 Composition chimique du sable oued souf

Tableau IV.9. Composition chimique du sable oued souf

Composition	Teneur %
CaO	0,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,23
SiO <sub>2</sub>	94,40
MgO	0,06
Na <sub>2</sub> O	0,36
K <sub>2</sub> O	1,13
Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04
SO <sub>3</sub>	0,17
Pert a feu	0,8200
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,33

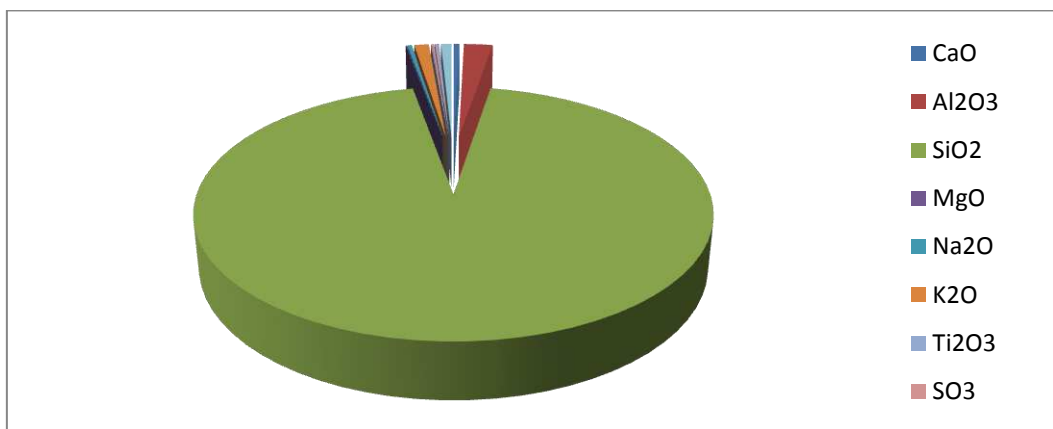


Figure IV.4 Cercle des pourcentages des constituants du sable d'oued souf

## ✓ Remarque

On remarque que ce sable est très siliceux et contient un pourcentage (%) important de silice donc est un sable très adéquat pour la confection de tous les types des bétons.

## I.2.5 Analyse granulométrique du sable oued souf

Tableau IV.10 Analyse granulométrique du sable oued souf

Tamis Ouverture (mm)	Refus cumulé (gr)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
4	20,4	1,02	98,98
2,50	36,4	1,82	98,18
1,25	112,4	5,62	94,38
0,63	472,4	23,62	76,38
0,315	1425,7	71,28	28,72
0,16	1906,2	95,31	4,69
0,08	1980	99,025	0,975
F.T	1995	100	00

➤ **Module de finesse est calculé par la relation suivante :**

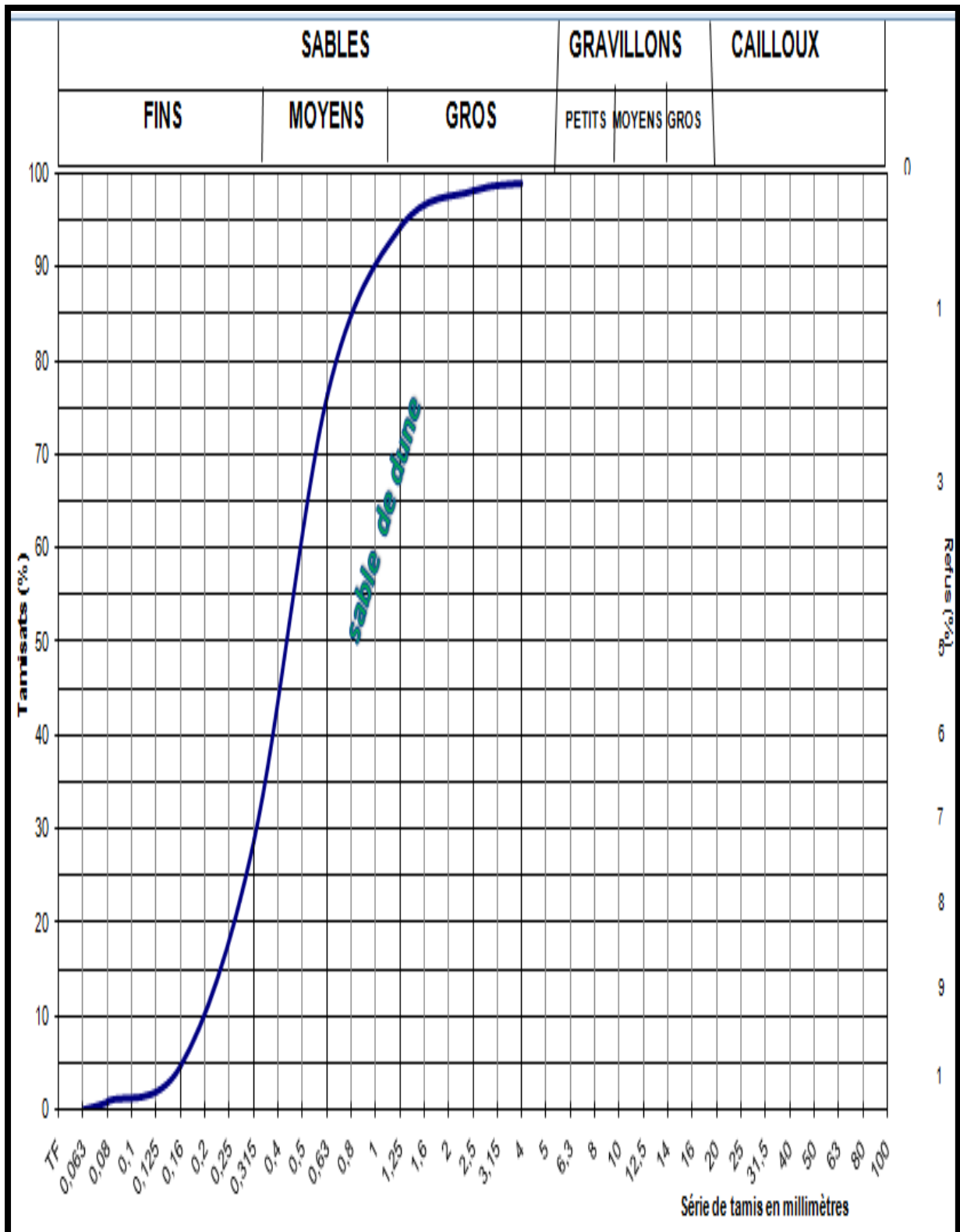
$$MF = \frac{\sum \text{Refus des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 4}{100}$$

$$MF = \frac{95,31+71,28+23,62+5,62+1,82+1,02}{100}$$

**Mf=1,9**

Analyses granulométrique par tamisage NF EN933-1

ENR.N° 0160/13



### I.3 Adjuvant

Nous avons utilisé comme adjuvant le super-plastifiant haut réducteur d'eau [tempo 12], conforme à la norme EN 934-2 de SIKA.

#### I.3.1 Présentation

SIKA VISCOCRETE **TEMPO 12** est un super-plastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

#### I.3.2 Données techniques

**Tableau IV.11** Données techniques

Densité	1,06 ± 0,01
PH	6 ±1
Teneur en Na <sub>2</sub> O	≤ 1%
Extrait sec	28,0 à 31,0%
Teneur en ion Cl <sup>-</sup>	≤0,1%
Aspect	Liquide brun clair

#### I.3.3 Conditions d'application

Dosage Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.

Mise en œuvre SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajoutée soit :

- 1- en même temps que l'eau de gâchage ;
- 2- en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

#### I.3.4 Le point de saturation

Le dosage en super-plastifiant est déterminé par l'essai d'étalement (visuellement), et même donné par la fiche technique de notre adjuvant

## I.4 La lignine

### I.4.1 L'extraction de la lignine

Dans le but de l'utilisation de la lignine dans les BFUP comme adjuvant à la place d'un adjuvant commercial nous avons procédé à son extraction à partir d'un bois algérien. La lignine est extraite par la méthode organosolv.

### I.4.2 Préparation d'adjuvant naturel

#### ➤ Dissolution de la lignine

Après l'extraction de la lignine par la méthode d'organosolv, la lignine obtenue par ce procédé est sous forme solide. Pour son utilisation éventuelle comme adjuvant liquide à la place d'un superplastifiant commercial, la lignine obtenue doit être dissoute dans un solvant adéquat (NaOH) en suivant les étapes ci-dessous :

- 1- Peser 2g de la lignine d'organosolv à l'aide d'une balance tarée ;
- 2- Mettre les 2g de la lignine dans un flacon de 500ml puis ajouté 5g de soude (NaOH) ;
- 3- Mettre 500 ml d'eau de robinet dans le flacon avec un chauffage et agitation à une température 80 C°, pendant une durée quatre heures (4h).



Figure IV.5 La solution de la lignine

#### ➤ Calcul de la quantité de l'extrait sec d'adjuvant naturel

$$2\text{g} \quad \xrightarrow{\hspace{2cm}} \quad 500\text{ml}$$

$$X \quad \xrightarrow{\hspace{2cm}} \quad 15\text{ml}$$

$$X = [(15 \cdot 2) / 500]$$

$$X = 0,060 \text{ g}$$

Quantité d'extrait sec de lignine

#### ➤ Calcul de la masse de lignine pour 1m<sup>3</sup>

15 ml  $\Rightarrow$  0,060 g

210 ml  $\Rightarrow$  Y

$Y = 28,6 \cdot 10^{-5} \text{ g/ml}$   $\Rightarrow$

$Y = 0,286 \text{ kg/m}^3$

## I.5 Les fibres

### I.5.1 Les fibres métalliques

Les fibres métalliques peuvent être utilisées pour l'amélioration de certaines caractéristiques du béton telles que : résistances aux chocs, à l'abrasion et au poinçonnement, elles ne remplacent pas les armatures de structure mais procurent une ductilité au niveau local.

### I.5.2 Caractéristiques géométriques

Les fibres les plus répandues ont une forme cylindrique et droite et sont alors caractérisées par leur longueur L et leur diamètre d.

Dans notre BFUP, on a utilisé des fibres de longueur 30 mm avec un diamètre  $0,375 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ , les caractéristiques et le volume des fibres utilisées influent sur les propriétés mécaniques des BFUP lors d'un chargement en traction ou en flexion, leur géométrie est très variable c'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post fissuration.



Figure IV.6 fibres métalliques

**Tableau IV.12** Caractéristiques des fibres métalliques

Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Diamètre moyen (µm)	Résistance A la traction (N/mm <sup>2</sup> )	Module d'élasticité (GPa)	Allongement à la rupture %
<b>7,8</b>	<b>375</b>	<b>1750</b>	<b>175</b>	<b>3-4</b>

### I.5.3 Rôle des fibres métalliques

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

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

### I.6 Briques réfractaires

On a utilisé la brique réfractaire fabriquée à base de zircon-corindon électro- fondu (plus de 30% d'oxyde de zirconium et plus de 40% de corindon).



**Figure IV.7** Brique réfractaire

#### I.6.1 Préparation

Les briques récupérées ont été concassées, broyées et tamisées pour les utiliser comme

fines minérales dans la fabrication du BFUP

Le concassage est effectué à l'aide d'un concasseur à cône.

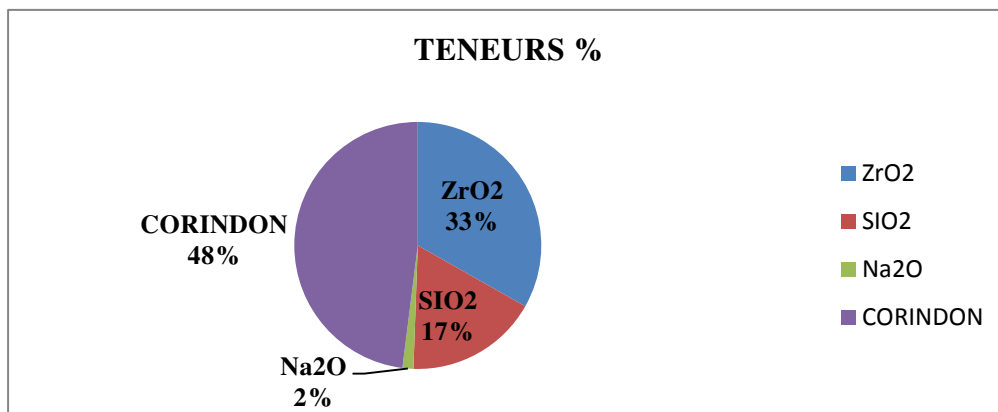


**Figures IV.8** Préparation de déchet de brique réfractaire

**I.6.2 Caractéristiques chimiques de la brique**

**Tableau IV.13** Analyse chimique de la brique réfractaire (à base de zircon-corindon électrofondus) avant son utilisation dans le four

Composition chimique	ZrO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Corindon
Valeurs %	33	17	/	2	48

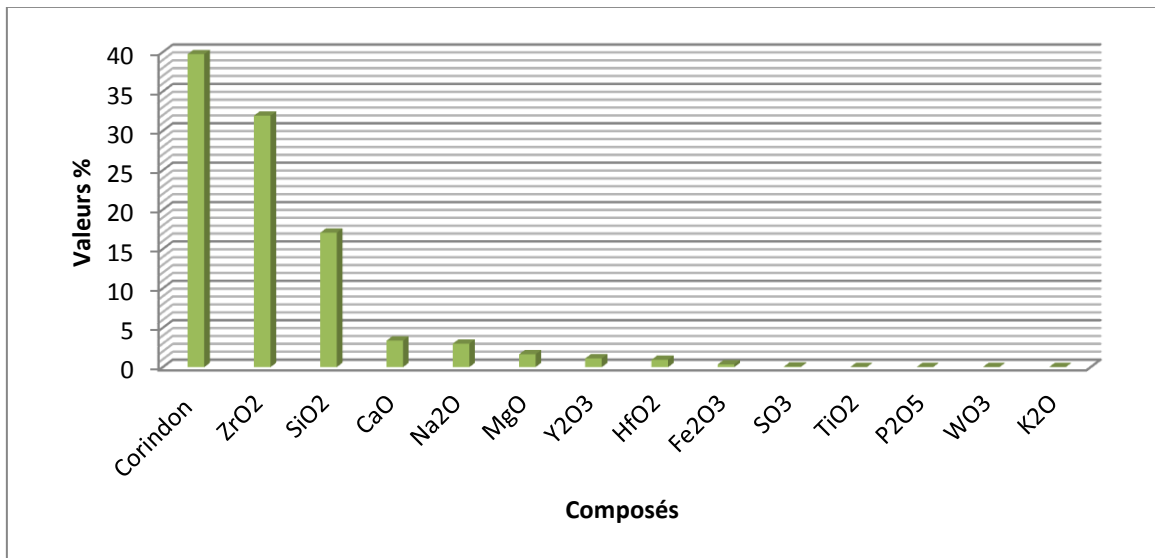


**Figure IV.9** Cercle de pourcentage de l'analyse chimique de la brique réfractaire



**Tableau IV.14** Analyse chimique du déchet de brique réfractaire par FX

<b>Composés</b>	<b>Valeurs (%)</b>
Corindon	39,73
ZrO <sub>2</sub>	31,92
SiO <sub>2</sub>	17,06
CaO	3,36
Na <sub>2</sub> O	2,98
MgO	1,62
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,11
HfO <sub>2</sub>	0,93
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,35
SO <sub>3</sub>	0,08
TiO <sub>2</sub>	0,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01
WO <sub>3</sub>	0,01
K <sub>2</sub> O	0,01



**Figure IV.10** Histogramme de l'analyse chimique du déchet de brique réfractaire par FX

### I.6.3 Caractéristiques physiques du déchet de brique réfractaire

**Tableau IV.15** Caractéristiques physiques du déchet de brique réfractaire

caractéristique physiques	Valeurs	Unités
SSB	4350	cm <sup>2</sup> /g
Masse volumique	1,15	[g/cm <sup>3</sup> ]
Masse spécifique	3,69	[g/cm <sup>2</sup> ]
Absorption d'eau	2,3	(%)
Teneur en eau	0,33	(%)
Couleur	jaune	/

### I.7 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection de notre BFUP est l'eau potable de LNHCC (Oued Smar.)

## ❖ Deuxième partie

## II. Formulation et conservation des éprouvettes

## II.1 Formulation

La méthode de formulation des BFUP est plus délicate par rapport aux autres types des bétons, plusieurs méthodes sont disponibles à savoir DREUX –GORISSE, JAPONAISE et FAURY ... etc. qui ne sont pas adaptables pour les BFUP.

Il existe des formulations recommandées par des entreprises et des associations, à savoir LA FARGE et l'AFGC, dans cette partie, nous allons présenter les calculs des compositions de BFUP, selon la méthode AFGC.

Le tableau suivant représente un exemple de formulation pour 1 m<sup>3</sup> de béton

**Tableau IV.16** Calcule de la composition du BFUP

Exemples de formulation de BFUP (pour 1m <sup>3</sup> )						
Ciment	Sable fin	Quartz broyé	Fumée de silice	Fibres métalliques	Adjuvant (extrait sec)	Eau totale
1075kg	1030kg	-	160kg	220kg	35kg	200L

Optimisation de la composition d'un m<sup>3</sup> de BFUP

- On fixe le rapport E/C=0.25
- On fixe le dosage de ciment = 800 kg/m<sup>3</sup>.
- On a remplacé la fumée de silice par le déchet de brique réfractaire finement broyé

Les résultats suivants sont calculés par rapport au dosage de ciment :

$$C=800\text{kg/m}^3$$

- **Sable fin (oued souf) <2mm**

$$1075 \longrightarrow 1030$$

$$800 \longrightarrow X$$

$$X=766 \text{ kg /m}^3$$

- **Fumée de silice remplacée par le déchet de brique réfractaire finement broyé**

$$160 \longrightarrow 1075$$

$$Y \longrightarrow 800$$

$$Y=119\text{Kg/m}^3$$

- **Pour les fibres métalliques**

$$1075 \longrightarrow 220$$

$$800 \longrightarrow Z$$

$$Z=163,72\text{Kg /m}^3$$

- **Dosage en eau totale**

$$E/C= 0,25$$

$$E=C * 0,25$$

$$= 800 * 0,25$$

$$E=200\text{Kg/m}^3$$

- **Adjuvant (super-plastifiant):**

Selon la fiche technique et après détermination du point saturation de 1 % de la masse du ciment, on trouve que la masse du super-plastifiant =  $(1 * 800) / 100 = 8\text{kg / m}^3$

- ✓ L'extrait sec 30% d'où la quantité d'eau est 70%
- ✓ La quantité d'eau contenant dans le superplastifiant  $0,70*8=5,60$
- ✓ De ce fait, la quantité d'eau qu'il faut ajoutée est  $200-5,60=194,4$
- Concernant les quantités des fibres nous avons utilisé 2% de fibres du volume du béton pour toutes les variantes.

Le tableau suivant mentionne les quantités correspondantes des constituants de toutes les variantes Pour un moule de  $(40*40*160)*3$

**Tableau IV.17** Composition du BFUP témoin

Constituants	Valeurs	Unités
Ciment	800	Kg/m <sup>3</sup>
Sable fin	766	Kg/m <sup>3</sup>
Adjuvant (T12)	8	Kg/m <sup>3</sup>
Eau totale	200	L
E/C	0,25	-

**Tableau IV.18** Composition de BFUP à base de différents pourcentages de briques réfractaires

Pour simplifier les écritures on a choisi une désignation de chaque type de notre BFUP comme suit :

- BT = BFUP+tempo12
- BBr<sub>10%</sub>+T12= BFUP avec ajout de 10% de déchet de brique réfractaire + tempo 12
- BBr<sub>15%</sub>+T12=BFUP avec ajout de 15%de déchet de brique réfractaire + tempo12
- BBr<sub>20%</sub>+T12=BFUP avec ajout de 20% de déchet de brique réfractaire + tempo12
- BBr<sub>10%</sub>+L= BFUP avec ajout de 10% de déchet de brique réfractaire + lignine
- BL = BFUP+lignine

	Ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Sable (Kg /m <sup>3</sup> )	Br. Réfractaire (Kg/m <sup>3</sup> )	Adjuvant Naturel (Kg/m <sup>3</sup> )	T.12 (Kg/m <sup>3</sup> )	Eau totale (Kg/m <sup>3</sup> )	E/C
BBr <sub>10%</sub> +T12	800	766	80	–	8,8	220	0,25
BBr <sub>15%</sub> +12	800	766	120	–	9,2	230	0,25
BBr <sub>20%</sub> +T12	800	766	160	–	9,6	240	0,25
BBr <sub>10%</sub> +L	800	766	80	0,286	–	185	0,25
BL	800	766	–	0,286	–	200	0,25

## II.2 Le malaxage

Le malaxage a été réalisé avec un malaxeur de laboratoire pour BFUP à deux vitesses lente et rapide, de capacité de 5 litres au sien de laboratoire de l'Habitat et de la Construction du Centre « L.N.H.C.C » unité de OUED SEMAR



**Figure IV.11** Malaxeur de BFUP

Le malaxage joue un rôle précieux dans la fabrication des BFUP, d'où son mode et son temps doivent être maîtrisés.

### II.2.1 Le mode de malaxage

- 1- Introduire le ciment puis granulat dans le bol ;
- 2- Mettre immédiatement le malaxage en marche à petite vitesse ;

- 3- Introduire 2/3 d'eau pendant 1mn ;
- 4- Arrêter le malaxeur pendant les premiers 30s;
- 5- Reprendre le malaxage et mettre 1/3 d'eau +2/3 d'adjuvant à grande vitesse pendant 2mn ;
- 6- A la fin ajouter 1/3 d'adjuvant à la même vitesse pendant 1mn.

### II.3 Le moulage, démoulage et conservation des éprouvettes

Des moules normalisés de 4x4x16 cm sont remplis avec le BFUP issu du malaxeur, vibrés sur une table de secousse puis conservés à l'air ambiant à température  $20 \pm 1C^0$  Après 24 heures, on procède au démoulage et la conservation dans un bain d'eau pour 28 jours. Les éprouvettes sont sorties de l'eau moins de 15 min avant l'essai



Figure IV.12 Moulage et démoulage des éprouvettes

## ❖ Troisième partie

### III. Caractéristiques physiques et mécaniques des BFUP

#### III.1 A l'état frais

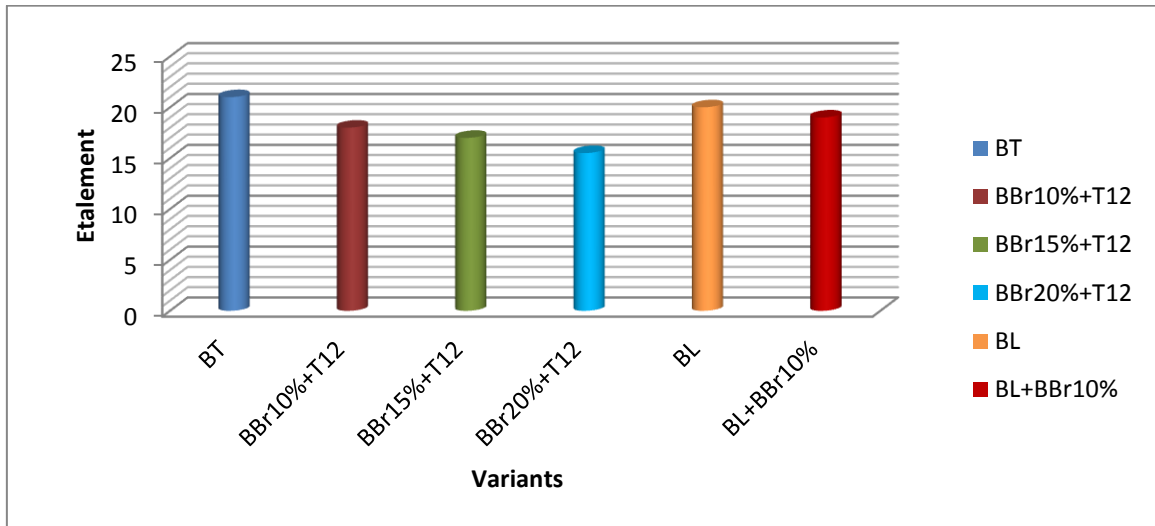
##### ➤ L'étalement au mini-cône

Les BFUP sont généralement autoplaçants. Cette propriété est vérifiée par un essai d'étalement qui consiste à remplir de BFUP un moule tronconique dont le diamètre inférieur et la hauteur sont de 50 mm, à retirer le moule puis à mesurer l'étalement du BFUP, qui est de l'ordre de  $20 \pm 2$  mm

Les résultats d'essais d'étalement de différentes variantes effectués sur le mini-cône sont donnés dans le tableau qui suit :

**Tableau IV.19** Etalement au mini cône des différentes variantes

	BT	BBr <sub>10%</sub> +T12	BBr <sub>15%</sub> +T12	BBr <sub>20%</sub> +T12	BL	BBr <sub>10%</sub> +L
Etaiement	21	18	17	15,5	20	19

**Figure IV.13** Etalement de différentes compositions

### Interprétation

D'après ce tableau on remarque que l'étalement diminue avec l'augmentation de la quantité de brique réfractaire à cause de l'absorption d'eau de la brique réfractaire qui est très élevée.

L'ajout de superplastifiant donne un étalement plus élevé grâce à son action qui améliore la fluidité du BFUP. On remarque aussi que les bétons élaborés avec l'adjuvant naturel (lignine) sont très fluides et représentent de bons étalements.

#### ➤ Masse volumique

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

$$Mv = [(masse \text{ du BFUP} / \text{volume de moule}) / 3]$$

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



**Tableau IV.20** La masse volumique à l'état frais

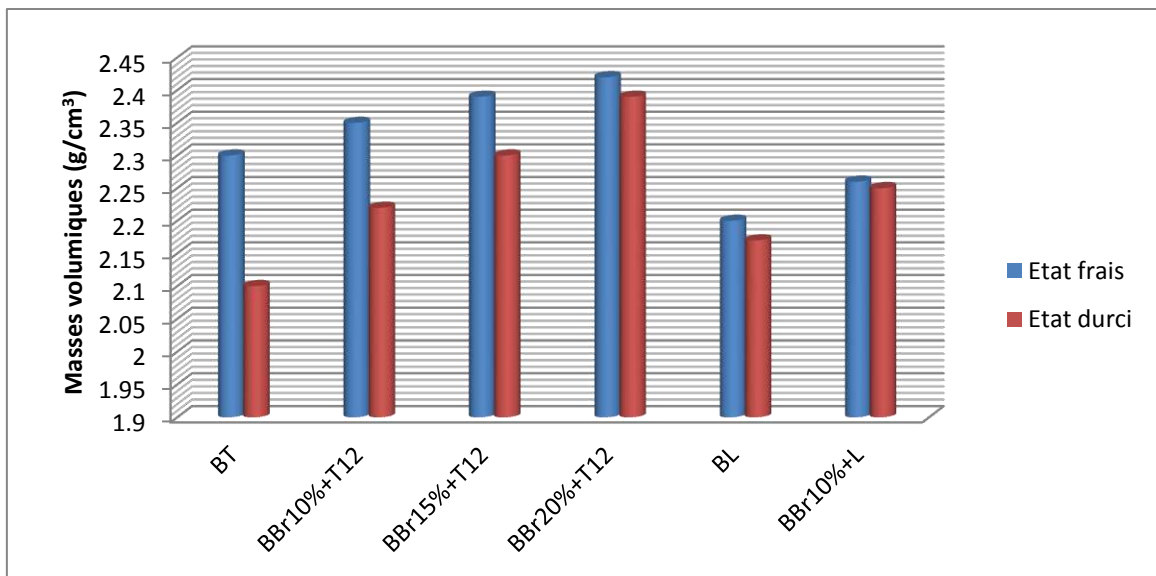
	BT	BBr <sub>10%</sub> +T12	BBr <sub>15%</sub> +T12	BBr <sub>20%</sub> +T12	BL	BL+ BBr <sub>10%</sub>
Masse volumique g/cm <sup>3</sup>	2,30	2,35	2,39	2,42	2,20	2,26

**III.2 L'état durci**

➤ **Masse volumique**

**Tableau IV.21** La masse volumique à l'état durci

	BT	BBr <sub>10%</sub> +T12	BBr <sub>15%</sub> +T12	BBr <sub>20%</sub> +T12	BL	BL+ BBr <sub>10%</sub>
Masse volumique g/Cm <sup>3</sup>	2,10	2,22	2,30	2,39	2,17	2,25



**Figure IV.14** Masses volumiques des BFUP à l'état frais et durci

### Interprétation

D'après les 2 tableaux (20 et 21) en remarque que les masses volumiques à l'état frais sont plus élevés par rapport à celles de l'état durci et augmentent avec l'augmentation de la quantité du déchet de brique réfractaire dans les bétons, ceci est dû à la masse volumique du déchet de brique.

#### ➤ La porosité & l'absorption

Afin de déterminer la porosité et l'absorption de ces bétons, nous avons procédé comme suit :

- 1- pesée les éprouvettes séchées M1 jusqu'à obtention de la masse constante
- 2- Immersion des éprouvettes dans l'eau pendant 48h.
- 3- essuyées superficiellement et pesées M2

#### ✓ La porosité

La porosité est le rapport du volume des vides et le volume total

$$\emptyset = \frac{V_{\text{vide}}}{V_{\text{totale}}}$$

Le volume des vides ce n'est que le volume de l'eau piégé dans les pores, il est calculé:

$$P = \frac{m}{V} \quad \Rightarrow \quad V = \frac{m}{\rho}$$

Avec :

m : la masse de l'eau, elle est calculé par la formule Mh- Ms

Mh : la masse humide

Ms : la masse sèche

#### ✓ L'absorption

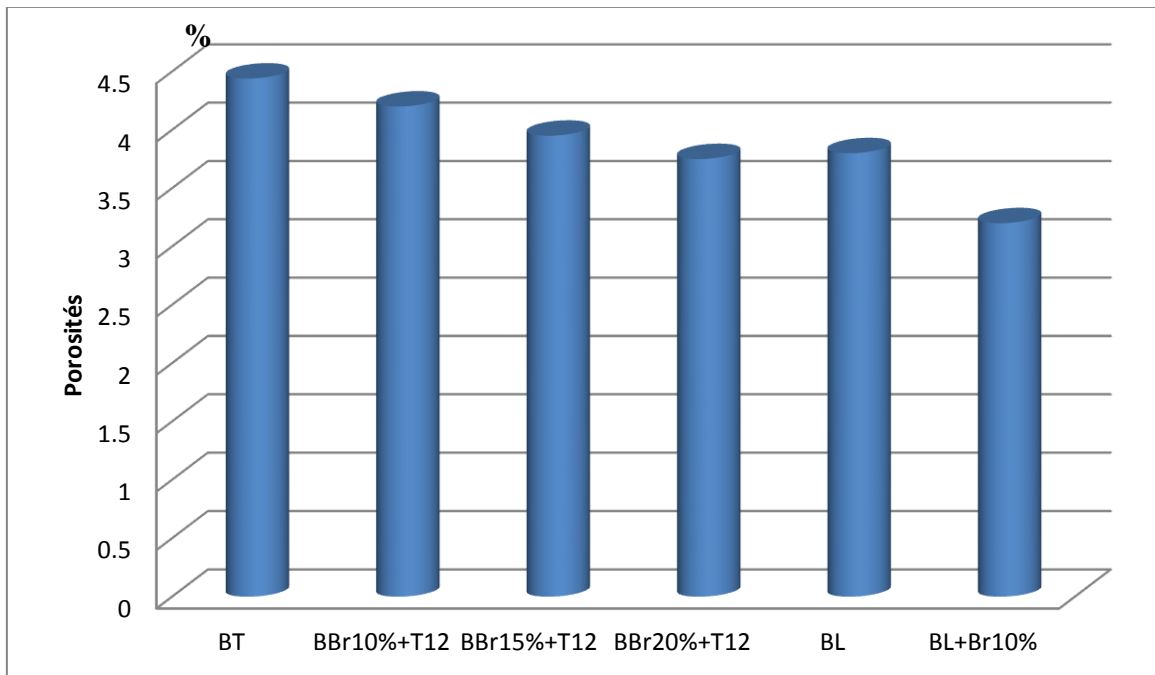
L'absorption se calcule selon la formule

$$Ab \% = \frac{M2 - M1}{M1} * 100\%$$

Les résultats sont dans résumés dans les tableaux suivants :

**Tableau IV.22** Porosités des différentes variantes

	BT	BBr <sub>10%</sub> +T12	BBr <sub>15%</sub> +T12	BBr <sub>20%</sub> +T12	BL	BL+BBr <sub>10%</sub>
Porosité %	4,44	4,20	3,95	3,75	3,80	3,20



### Interprétation

Le tableau (22) présente l'évolution de la porosité à l'âge de 28 jours des différents variantes de BFUP, D'après les résultats obtenus on remarque que :

Une diminution de porosité dans le Var 2,3, 4 et 5 à base de déchet de brique réfractaire par rapport à la porosité de BFUP témoin, cette diminution est probablement due au pourcentage des fines qui favorisent la compacité des BFUP.

**Tableau IV.23** Absorption des différentes variantes

	BT	BBr <sub>10%</sub> +T12	BBr <sub>15%</sub> +T12	BBr <sub>20%</sub> +T12	BL	BL+BBr <sub>10%</sub>
Absorption %	0,16	0,34	2,14	3,39	2,51	2,55

**Interprétation**

D’après le tableau (23), On remarque l’augmentation de l’absorption à base de déchet de brique réfractaire grâce à l’affinité entre l’eau et la brique réfractaire finement broyée

➤ **Les résistances mécaniques**

Les essais sont effectués au sein du laboratoire de LNHC l’oued Smar, sur trois appuis pour la flexion, puis les deux moitiés ont subi une charge de compression.



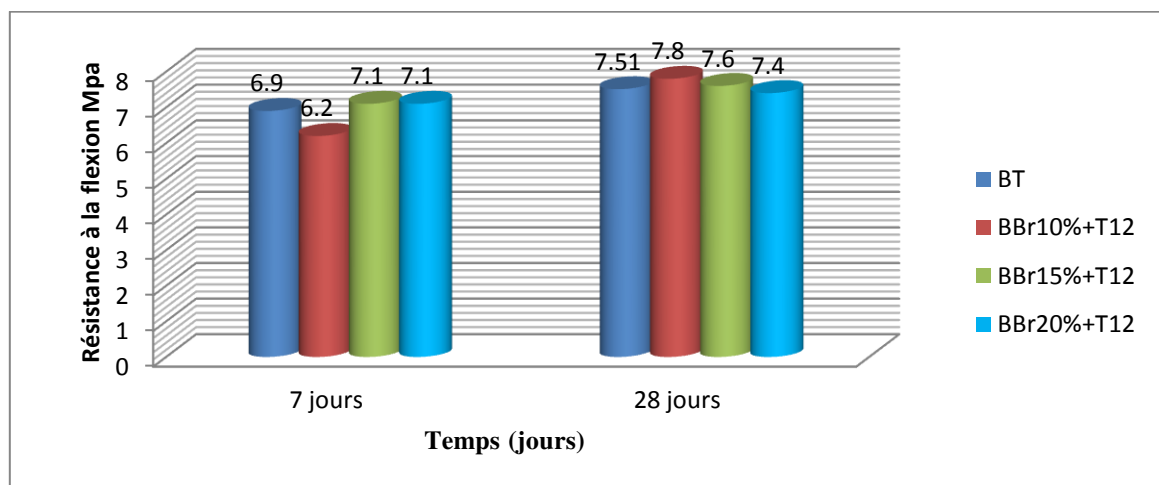
**Figure IV.15** Eprouvette subie à la flexion



**figure IV.16** Eprouvette subie à la compression

**Tableau IV.24** Résistances à la flexion à 7 et 28 jours en fonction de l’âge

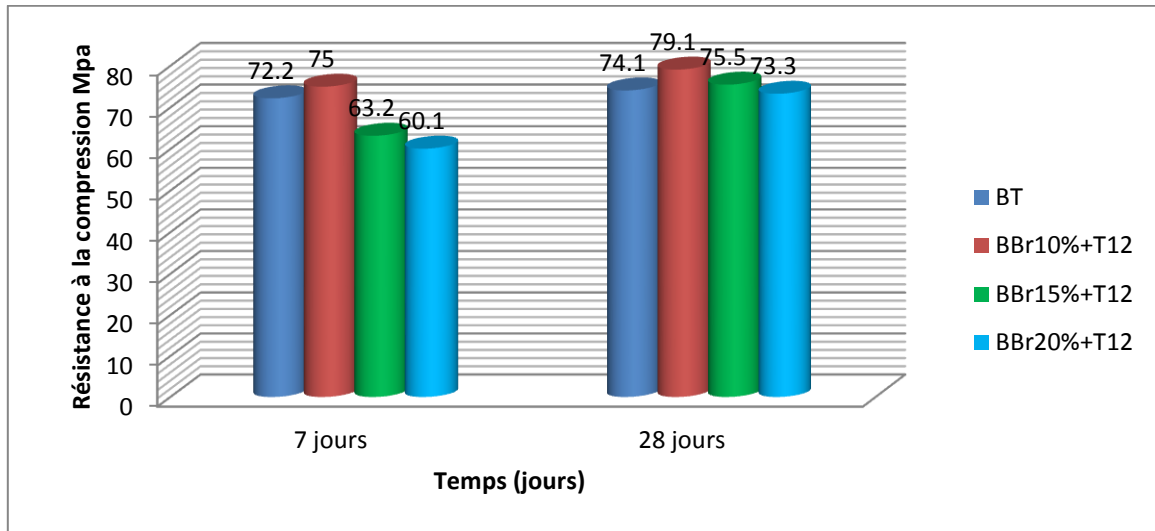
	7 jours	28 jours
BT	6,90	7,51
BBr <sub>10%</sub> +T12	6,20	7,80
BBr <sub>15%</sub> +T12	7,10	7,60
BBR <sub>20%</sub> +T12	7,10	7,40



**Figure IV.17** Résistances à la flexion

**Tableau IV.25** Résistances à la compression à 7 et 28 jours en fonction de l'âge

	7 jours	28 jours
BT	72,20	74,10
BBr <sub>10%</sub> +T12	75	79,10
BBr <sub>15%</sub> +T12	63,20	75,50
BBr <sub>20%</sub> +T12	60,10	73,30

**Figure IV.18** Résistances à la compression

### Interprétation

D'après ces résultats nous remarquons que les résistances à la compression et à la flexion augmentent pour BFUP10% et 15% de déchet de brique réfractaire par rapport au BFUP témoin. Pour voir l'effet de la nature de l'adjuvant sur les propriétés mécaniques, nous avons effectué les essais de flexion et de compression pour les variantes BT, BL, et BBr10%+T et BBr%+L.

**Tableau IV.26** Résistances à la flexion à 7 et 28 jours en fonction de l'âge

	7jours	28jours
BT	6,90	7,51
BBr <sub>10%</sub> +T12	6,20	7,80
BL	5,80	6,50
BBr <sub>10%</sub> +L	6,10	7,30

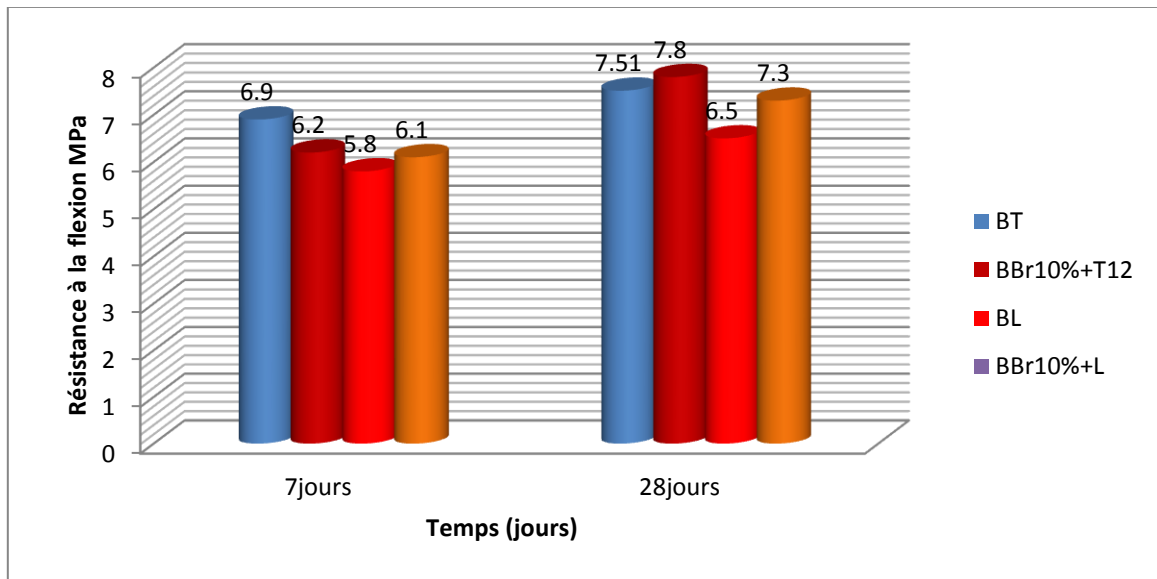


Figure IV.19 Résistance à la flexion en fonction de l'âge

Tableau IV.27 Résistances à la compression à 7 et 28 jours en fonction de l'âge

	7jours	28jours
BT	72,20	74,10
BBr <sub>10%</sub> +T12	75	79,10
BL	50,30	68
BBr <sub>10%</sub> +L	58,30	78,20

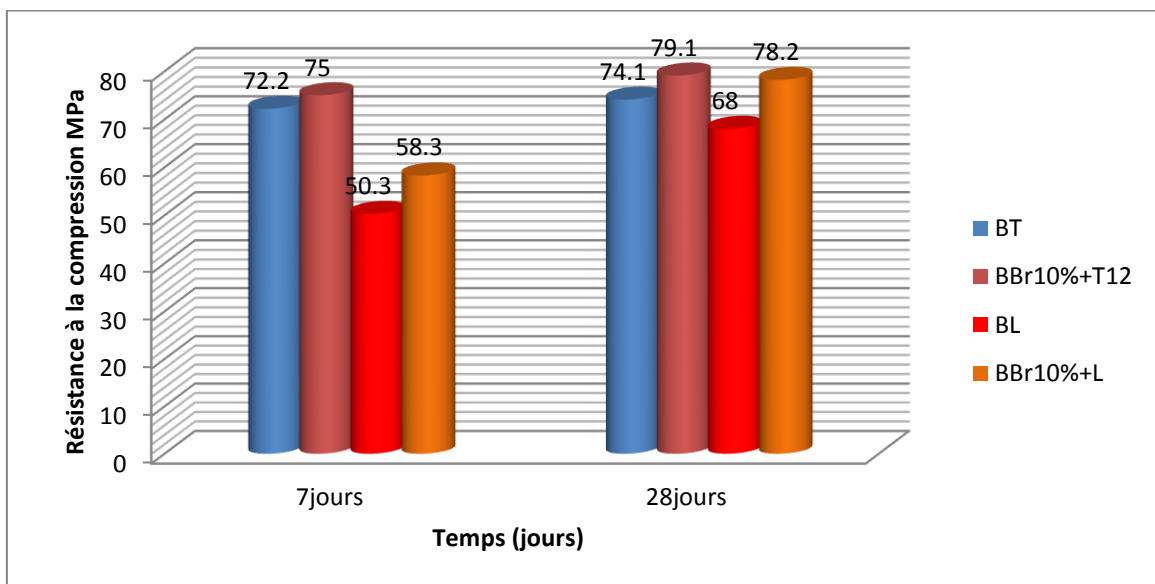


Figure IV.20 Résistances à la compression en fonction de l'âge

### Interprétation

D'après les résultats on remarque que les résistances à la flexion et à la compression augmentent lorsqu'on ajoute une quantité de déchet de brique réfractaire par rapport au BFUP témoin et l'action de l'adjuvant naturel est comparable à celle de l'adjuvant artificiel avec une quantité d'extrait sec très faible ( $=0,060g$ ), Donc les meilleures variantes sont BBr<sub>10%</sub>+T12 et BBr<sub>10%</sub>+L.

Après la caractérisation de tous les constituants et vérification de la meilleure variante, On a incorporé les fibres métalliques pour la variante BBr<sub>10%</sub>+T12

**Tableau IV.28** Composition de BFUP avec fibres métalliques

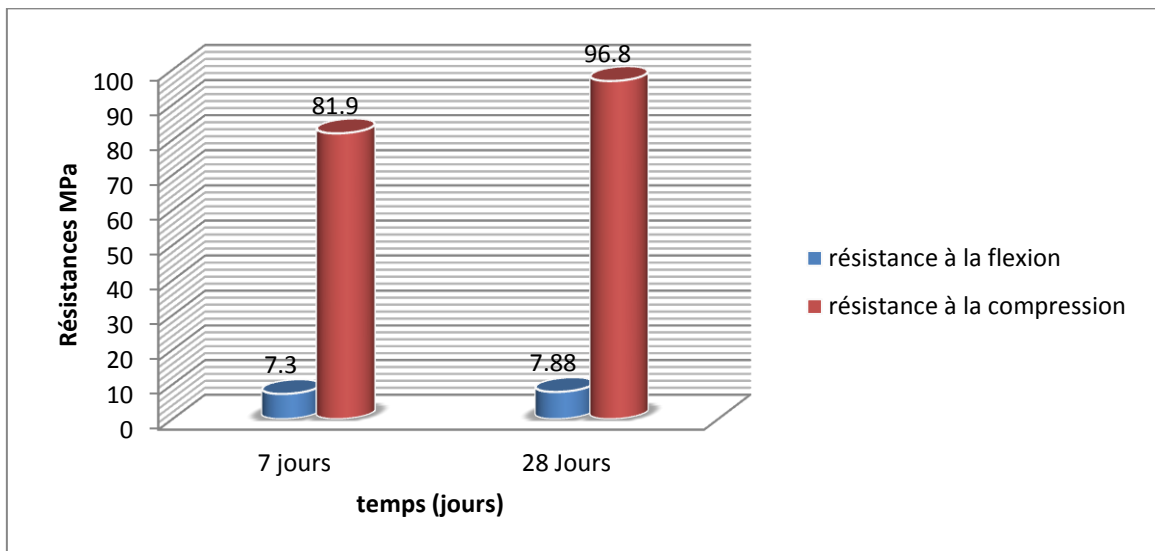
Constituants	Valeurs	Unités
Ciment	800	Kg/m <sup>3</sup>
Sable	766	Kg/m <sup>3</sup>
Br. Réfractaire	80	Kg/m <sup>3</sup>
Adjuvant	8,8	Kg/m <sup>3</sup>
FM	163,72	Kg/m <sup>3</sup>
Eau totale	220	L
E/C	0,25	–

**Tableau IV.29** Caractéristiques de BFUP avec fibres métalliques

	Valeurs	Unités
Etalement	20	Cm
M .volumique à l'état frais	2,33	g/m <sup>3</sup>
M. volumique à l'état durci	1,90	g/m <sup>3</sup>
La porosité	2,95	%
Absorption	2,02	%

**Tableau IV.30** Résistance à la flexion et à la compression en fonction de l'âge

	7jours	28jours
flexion MPa	<b>7,30</b>	<b>7,88</b>
Compression MPa	<b>81,90</b>	<b>96,80</b>

**Figure IV.21** Résistances à la flexion et à la compression en fonction de l'âge

### Interprétation

Nous constatons que les fibres apportent leur contribution et améliorent les performances mécaniques de l'ordre de 15 % pour la résistance à la compression et de 05 % pour la flexion. Il est donc nécessaire d'incorporer ce type de fibres aux bétons BFUP pour son éventuelle utilisation dans les ouvrages spécifiques.



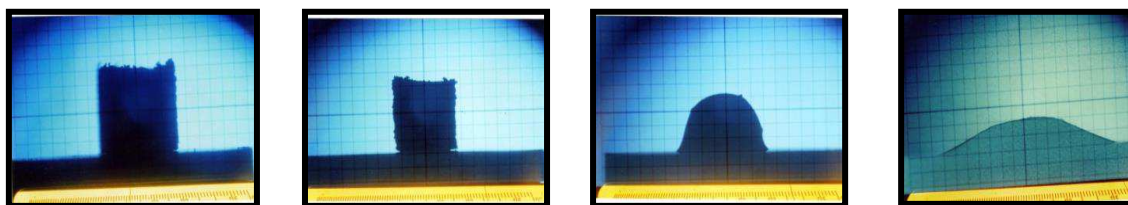
## ❖ Quatrième partie

**IV. Caractérisation Thermique des BFUP à base de déchet de brique réfractaire****IV.1 But**

Des modifications des composants de notre BFUP (pâte de ciment, sable, déchets de brique et l'adjuvant) ainsi que sa structure peuvent être la cause de l'effet de la température. D'un point de vue macroscopique, il en résulte une modification des propriétés structurales et thermiques.

**IV.2 Essai de microscope de chauffe**

Cette essai à été réalisé sur un petit cube de dimension 4x4x4 mm de chaque mélange qui est introduit dans le microscope de chauffe afin d'estimer le comportement à hautes températures des différentes formulations.

**1- Réf1 (témoin)**

20 °C : état initial

1270°C : retrait

1330°C: début de fusion

1340°C: fusion totale

**Figure IV.22** Résultats de microscope de chauffe pour BFUP témoin**Tableau IV.31** Résultats de microscope de chauffe pour BFUP témoin

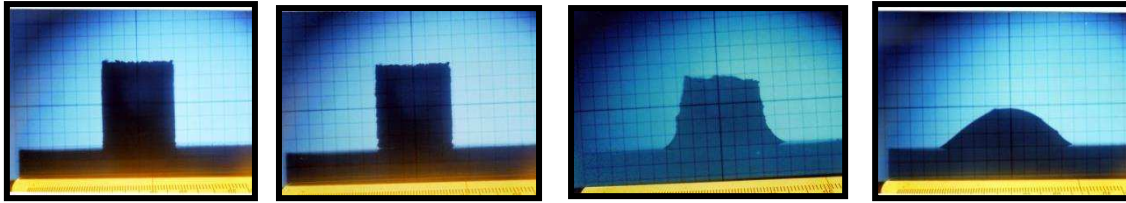
Température (C°)	Etat du produit
20	Etat initial
1250	Aucun changement d'état
1260	Début de retrait
1270	Retrait
1330	Début de fusion
1340	Fusion totale

**Commentaire**

Réf1 montre l'observation au microscope de chauffe de l'échantillon témoin, donc le retrait de l'échantillon testé vers 1270°C et l'échantillon commence à changer de forme, le

début de fusion est testé vers 1330°C et puis fond complètement à 1340°C (c'est la fusion totale).

## 2- Réf2 (BB<sub>20%</sub>+T12)



20 °C : état initiale      1330°C : retrait      1340°C: début de fusion      1360°C: fusion totale

**Figure IV.23** Résultats de microscope de chauffe pour BB<sub>20%</sub>+T12

**Tableau IV.32** Résultats de microscope de chauffe pour BB<sub>20%</sub>+T12

Température (C°)	Etat du produit
20	Etat initial
1270	Aucun changement d'état
1280	Début de retrait
1270	Retrait
1330	Début de fusion
1360	Fusion totale

### Commentaire

Réf 2 montre que le retrait, le début de fusion et la fusion totale sont élevée par rapport au Réf 1. Donc on peut conclure que l'échantillon à base de déchet de brique réfractaire présente une résistance thermique très importante (résiste jusqu'à 1400°C et plus), le sable contenu dans les deux échantillons confère au béton témoin une résistance thermique comparable à celui qui contient 10% de déchet de briques réfractaires.

## Conclusion générale

---

Les bétons fibrés ultra performance (BFUP) sont des bétons modernes constitués principalement d'une quantité remarquable en liant, du sable fin, des ultrafines, d'adjuvant, et éventuellement de fibres métalliques.

Grâce aux ultrafines, qui remplissent les vides entre les grains, on peut avoir un béton compact, et par l'utilisation des adjuvants qui réduisent la quantité d'eau et augmentent la fluidité, on aboutit à un béton moins poreux ce qui implique une augmentation des résistances.

La présente étude porte sur l'élaboration et la caractérisation des BFUP en incorporant des déchets de briques réfractaires comme ultrafines et en utilisant deux superplastifiants naturel (Lignine extraite par la méthode organosolv) et artificiel (Tempo12 de SIKA de type Polycarboxylates) Ces bétons offrent des performances exceptionnelles :

- Une très grande ouvrabilité ;
- Des résistances caractéristiques à la compression à 28 jours très élevées, ainsi qu'à la traction par flexion ;
- Une compacité très importante ;
- Une grande résistance à l'abrasion et aux chocs ;
- Une faible perméabilité ;

D'après les résultats de cette étude, on peut tirer les conclusions suivantes :

- l'étalement diminue avec l'augmentation de la quantité de brique réfractaire à cause de l'absorption d'eau de la brique réfractaire qui est très élevée. L'ajout de superplastifiant naturel ou artificiel donne un étalement plus élevé grâce à son action qui améliore la fluidité du BFUP. On remarque aussi que les bétons élaborés avec l'adjuvant naturel (lignine) sont très fluides et représentent de bons étalements.
- les masses volumiques à l'état frais sont plus élevées par rapport à celles de l'état durci et augmentent avec l'augmentation de la quantité du déchet de brique réfractaire dans les bétons, ceci est dû à la masse volumique du déchet de brique.
- la diminution de porosité dans le Var 2,3, 4 et 5 à base de déchet de brique réfractaire par rapport à la porosité de BFUP témoin, cette diminution est probablement due au pourcentage des fines qui favorisent la compacité des BFUP.
- l'augmentation de l'absorption à base de déchet de brique réfractaire grâce à l'affinité entre l'eau et la brique réfractaire finement broyée.

## Conclusion générale

---

- les résistances à la compression et à la flexion augmentent pour BFUP10% et 15% de déchet de brique réfractaire par rapport au BFUP témoin.
- les résistances à la flexion et à la compression augmentent lorsqu'on ajoute une quantité de déchet de brique réfractaire par rapport au BFUP témoin et l'action de l'adjuvant naturel est comparable à celle de l'adjuvant artificiel avec une quantité d'extrait sec très faible (=0,060g) 32 fois moins faible que celle de l'adjuvant commerciale. Donc les meilleures variantes sont BBr10%+T et BBr%+L.
- les fibres apportent leur contribution et améliorent les performances mécaniques de l'ordre de 15 % pour la résistance à la compression et de 05 % pour la flexion. Il est donc nécessaire d'incorporer ce type de fibres aux bétons BFUP pour son éventuelle utilisation dans les ouvrages spécifiques.
- Toutes les éprouvettes élaborées à base de déchet de brique réfractaire et de sable des dunes présentent des résistances thermiques importantes (Début de retrait à 1270 pour le témoin et 1330 C° pour le BBr 10 %).
- Les déchets de briques réfractaires et le sable des dunes (riche en silice) finement broyés conviennent bien pour les bétons réfractaires, qui sont, en général, utilisés pour la confection d'ouvrages soumis à des températures élevées tels que revêtements des chaudières, cheminées, conduites de fumées, sols d'usines sidérurgiques, parties de fours,...

Cette étude a plusieurs objectifs :

- 1- Economique : amélioration des performances des bétons avec une diminution du dosage en quantité du clinker.
- 2- Ecologique : recyclage de déchets de briques réfractaires et diminution de la quantité de CO2 dégagée dans l'atmosphère.
- 3- Technico-mécanique : amélioration des propriétés physico-mécaniques et thermiques de ces bétons.

Pour compléter cette étude, il est recommandé de faire une analyse ATD-ATG à une température allant jusqu'à 1500 C° à 2000 C° avec une vitesse lente de 5 C°/Min afin de faire apparaître les différentes transitions endothermiques et exothermiques qui peuvent être mises en jeu.

*Références*  
*Bibliographies*

## Bibliographie

---

- [1] CEMBETON, fiche technique TOM2. G11 « les bétons, formulations, fabrication et mise en œuvre ».
- [2] PDF sur « les bétons fibrés à ultrahauts performance»
- [3] Thèse de doctorat, Elsa Nguyen phuong aman jean, « développement de béton fibrés ultra performantes pour la réalisation d'éléments de structure préfabriqués» 1décembre 2015
- [4] Akartuna I., Studart A.R., Tervoort E., Gauckler L.J., « Macroporous ceramics from Particle Stabilized Emulsions », Adv. Mater., 20, 4714-4718.2008
- [5] PIERRE Rossi, directeur de la recherche au L.C.P.C « bétons de fibres métalliques » conférence 6
- [6] THESE de doctorat, fritih youcef « apport d'un renfort de fibre sur le comportement des éléments en BAP » 2009
- [7] CEMBETON, FICHES TECHNIQUES TOM I « les constituants des bétons et des mortiers»
- [8] JEAN –LUC-wertz avec la collaboration du Pr Aurore Richel(1) et du Patrick Gerin(2) 2015 « molécules issues de la valorisation de la lignine »
- [9] THESE de doctorat « extraction, dépolymérisation et valorisation de la lignine kraft de la liqueur noire» présenté par AMADOU DIOP ,université du Québec mars 2014
- [10] Robert E1989, la pointe « précis de chimie de la cellulose (CEGEP) de trois –rivières » chapitre I, p36
- [11] Maya j .j Rajesh . DA(2008) « recent developments in chemical modification and characterization of natural fibre-reinforced composites » Polymer composites 29(2) . 187-207
- [12] Browing B .L 1967 ,methode ofwood chemistry vol2 intercience publishers, john wiley et sons , new york
- [13] H. HATAKEYAMA, Chemical Modification, Properties and Usage of Lignin, T.Q. HU Ed., 2002
- [14] <http://www.carbonfiberworkshop.com>
- [15] J.G. LINGER, D.R. VARDON, M.T. GUARNIERI, E.M. KARP, G.B. HUNSINGER, M.A. FRANDEN, C.W. JOHNSON, G. CHUPKA, T.J. STRAHMANN, P.T. PIENKOS and G.T. BECKAM, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 111, 12013, 2014 disponible sur <http://www.pnas.org/content/111/33/12013.full>

## Bibliographie

---

- [16] J.E. HOLLADAY, J.F. WHITE, J.J. BOZELL, D. JOHNSON, Pacific Northwest National Laboratory, Top Value Added Chemicals from Biomass – Volume II: Results of screening for Potential Candidates from Biorefinery Lignin, 2007 disponiblesur <http://www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/pnml-16983.pdf>
- [17] Innventia disponible sur <http://www.innventia.com/en/Our-Expertise/Chemical-Pulping-and-Bleaching/Biorefinery-products/Biorefinery-separation-processes/LignoBoost>
- [18] PrEN 934-2, «Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Partie 2: Adjuvants pour bétons Définitions, spécifications et critères de conformité» (1992).
- [19] «Chemical admixtures for concrete», ACI Manual of Concrete Practice, Part 1-1994, pages 212.3R-1 à 212.3R-31.
- [20] Norm SIA 162, «Ouvrages en béton» (1993).
- [21] PDF SUR LES CIMENT ET BETON B51CIM –BETON (CENTRE D’INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATION )
- [22] PDF « SCIENCE DES MAT2RIAUX DE CONSTRUCTION TRAVAUX PRATIQUE » préparé par M GHOMARI . F et BENDI ouisa
- [23] Jacques lachnitt les matériaux réfractaires Que sais –je ? presses universitaires de France Paris 1983, 128 pages ISBN2130379427
- [24] Aurélien Mazzoni , thèse de doctorat (comportement thèrmomécanique d’un béton réfractaire effet du renforcement par des fibres minérales )
- [25] DJIRAGBOU N.B.R , BOFFOUE M.O , KOUADIOK.C. , KOUAKOU C.H, EMERUWA E « Application de l’ultrason a l’étude de l’homogénéité des briques réfractaire », l’aboratoire de géomatériaux et des technologie de l’habitat, université FELIX HOUPHOUET BOIGNY Abidjan, ABIDJAN
- [26] Frédéric THUMMEN thèse de doctorat l’institut national des sciences appliquées de lyon pour obtenir le grade de docteur
- [27] Références .jean peyrox [ ARTS et METIERS ] , dictionnaire des mots de la technique et des métiers , librairie BLANCHARD paris 1985

## Bibliographie

---

[28] A. NOUMOWE NCHAMBOU, thèse de doctorat « effet de hautes températures (20-600C°) sur le béton cas particulier du béton à haut performances » institut national des sciences appliquées de lyon1995, 232 pages

[29] M.j RIBEIRO, A BRINCHA « Properties of sintered mulite and cordierite pressed bodies manufactured using Al-rich anodizing sludge » ceramics international

34(2008) 593-597

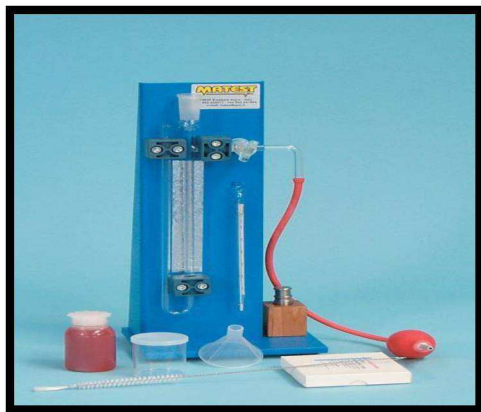


# *Annexes*

## ***I .Essais sur ciment***

### **I.1 La surface spécifique de Blaine SSB (NF P 15-471)**

La surface spécifique d'un liant est calculée en fonction du temps que met un volume d'air constant, sous une pression déterminée et la température connue, à traverser une couche tassée de liant.



**Figure:** Perméabilimètre de Blaine

L'appareil de Blaine se compose d'une cellule de mesure, d'un piston et une grille en métal inoxydable, ainsi que d'un tube en verre en forme de U l'appareil est étalonné avec une poudre d'étalonnage.

Ce que l'on mesure, c'est le temps que met l'air, filtrant à travers la couche de ciment tassé pour que le niveau d'un liquide non volatile de faible densité mis préalablement en dépression jusqu'à un repère supérieur de tube manométrique, redescende jusqu'au niveau d'un repère inférieur de ce tube

#### **1.1.2 Mode d'opérateurs**

La surface spécifique est déterminée avec le perméabilimètre de Blaine.

- On place un papier filtre sur la plaque inférieure de la cellule.
- On introduit l'échantillon de ciment et on l'égalise en secouant légèrement la cellule.
- On place ensuite un papier-filtre au-dessus de l'échantillon et on comprime ce dernier en tournant légèrement le piston jusqu'à ce que son col soit supporté par le bord supérieur de la cellule.
- Après compression de l'échantillon dans la couche soumise à l'essai et le papier filtre.

# ANNEXES

---

- On relie la cellule du tube du manomètre et on s'assure de la parfaite étanchéité du raccord.
- On ferme le robinet monté sur le tube manomètre, on comprime la poire on caoutchouc.
- Le relâchement simultané de la pression sur la poire et l'ouverture du robinet d'aspiration ont pour effet, l'air est lentement aspiré du tube du manomètre et le liquide est refoulé vers le haut, lorsque le niveau du liquide atteint le repère supérieur.
- On ferme le robinet on met le chronomètre en marche lorsque la surface inférieure du ménisque franchisse le 2<sup>ème</sup> trait annulaire depuis le sommet du tube.
- On arrête le chronomètre.

La surface spécifique est calculée par la formule suivante :

$$SSB = K \frac{\sqrt{e^3 T}}{P(1 - e) \cdot \sqrt{\eta}}$$

Dans laquelle :

**S** : surface spécifique (cm<sup>2</sup>/g).

**K** : constante de l'appareil égale à 28,26.

**e** : porosité de la couche tassée égale à 0,5.

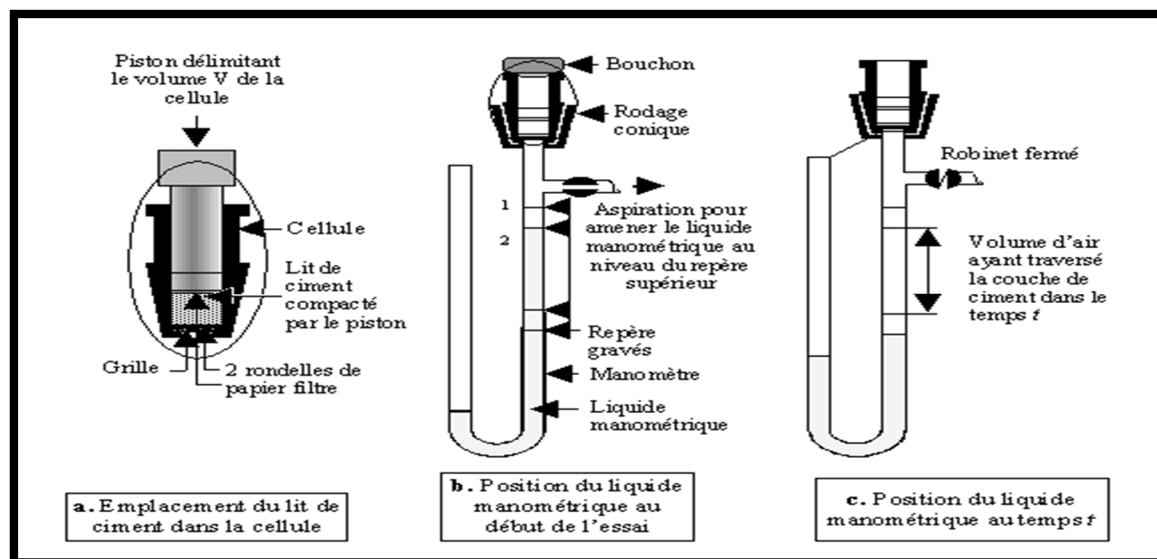
**T** : temps mesuré en secondes.

**ρ** : masse volumique de grains g/cm<sup>3</sup>.

**η** : viscosité de l'air à la température d'essai (en poise) = 0,0001798.

Cet appareil est montré par la figure ci-dessous :

# ANNEXES



## « APPAREIL DE BLAINE »

### I.2 Détermination de la consistance normale :

#### I.2.1 Mode opératoire :

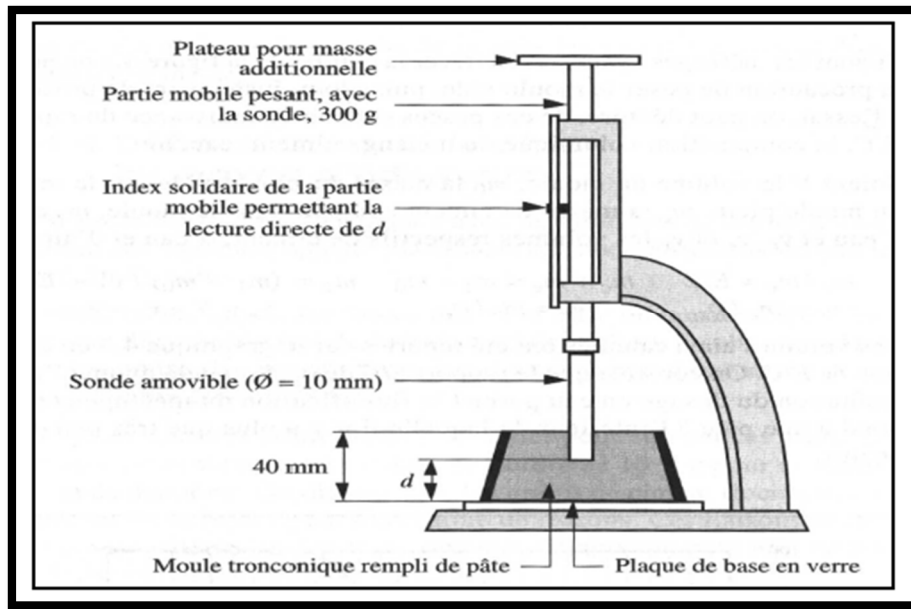
- La quantité de ciment qui doit être pesé est de 500g, une certaine quantité d'eau, par exemple 125g doit être introduite à partir d'un verre gradué.
- Ajouter les 500g de ciment pesé à l'eau et ceci soigneusement afin d'éviter toute perte d'eau ou de ciment.
- La durée de cette opération ne doit pas être inférieure à 5min ni supérieure à 10min.
- Mettre le malaxeur en route immédiatement à vitesse lente pendant 60 secondes.
- Tourner à vitesse rapide pendant 2 minutes, au bout de 3 minutes arrêter la machine pendant 15 secondes racle la pâte adhérente à la cuve. Remettre alors la machine à vitesse rapide.
- Introduire la pâte malaxée dans le moule tronconique (préalablement placé sur une plaque de verre légèrement graissée).
- Régler préalablement l'appareil de VICAT muni de la sonde.
- Abaisser la sonde avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive contact de la pâte, observer une pose de 01 à 02 secondes à cette position de manière à éviter une vitesse initiale ou une accélération forcée des parties mobiles.
- Lâcher alors rapidement les parties mobiles, la sonde doit pénétrer verticalement au centre de la pâte. Lâcher la sonde de 4 minutes après l'instant (zéro) effectuer la

# ANNEXES

lecture de l'échelle à la fin de la pénétration ou 30 secondes après la libération de la sonde.

La consistance normale est donnée par la formule suivante :

$$CN = \frac{Ve}{Pc}$$



« Appareil de Vicat »

## I.3- Essai de prise (en 196-3)

### I.3.1 Principe d'essai

Remplir le moule de l'appareil de VICAT de pâte de consistance normale et arasé, abaisser l'aiguille avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte, lâcher alors rapidement la partie mobile, l'aiguille doit pénétrer verticalement dans la pâte répéter l'essai de pénétration sur la même éprouvette à des positions convenablement espacées à plus de 10 mm du bord de moule

### I.3.2 Début de prise

L'aiguille de VICAT descendue perpendiculairement à la surface de la pâte est immobilisée pendant un court arrêt quand elle entre en contact avec cette surface est abandonnée à elle-même sans vitesse initiale.

Le temps mesuré, depuis l'instant 0, au bout duquel la distance entre l'aiguille et la plaque de base est entre 0 et 1 mm est le temps de début de prise de ciment.

## I.3.3 Fin de prise

C'est le temps, mesuré depuis l'instant 0, au bout duquel l'aiguille ne pénètre plus la l'ère fois qu'à 1mm dans l'éprouvette.

**REMARQUE**

Pour la détermination de temps de prise on utilise le même appareil utilise pour la détermination de la consistance normal « appareil de VICAT » sauf on remplace la sonde par une aiguille de 1 mm.

## II Essais sur sable

### II.1 Masses volumiques

La masse volumique d'un matériau est la masse de ce matériau par unité de volume.son symbole est désigné par  $M_v$ , comme on distingue le volume absolu et le volume apparent.

#### II.1.1 Détermination de la masse volumique absolue :

##### A- Définition :

La masse volumique absolue  $\rho_s$  est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Les masses volumiques s'expriment en  $t/m^3$ , en  $kg/dm^3$ , ou en  $g/cm^3$ . La masse volumique absolue moyenne des granulats silico-calcaires est prise égale, en première approximation, à  $2,65 t/m^3$  ou  $2,65 g/cm^3$ .

##### B- But de l'essai

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

##### C- Méthode de l'éprouvette graduée

Cette méthode est très simple et très rapide. Elle utilise du matériel très courant de laboratoire. Toutefois sa précision est faible.

1. Remplir une éprouvette graduée avec un volume  $V_1$  d'eau.

# ANNEXES

2. Peser un échantillon sec M de granulats (environ 300 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.

3. Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V2.

La masse volumique est alors:

$$P_s = \frac{M}{v_2 - V_1}$$

Pour opérer dans de bonnes conditions, utiliser une éprouvette graduée en verre de 500 cm<sup>3</sup> de volume. La lecture des niveaux V1 et V2 doit se faire en bas du ménisque formé par l'eau. En effet, celle-ci a tendance à remonter sur les bords de l'éprouvette sur une hauteur de 1 à 2 mm, ce qui fausse bien sûr la lecture des volumes si la lecture est effectuée en haut du ménisque

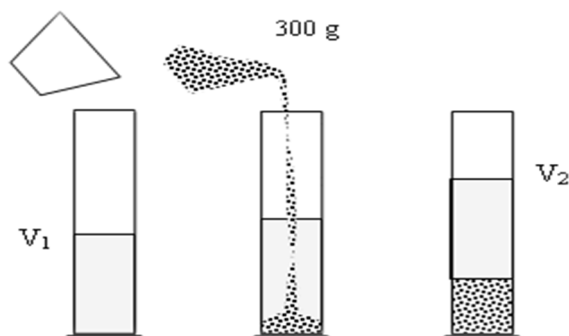


Figure IV. Méthode de l'éprouvette

## II.1.2 Détermination de la masse volumique apparente

### A- Définition

Elle est définie comme le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume occupé par la matière y compris les vides contenus.

### B- Principe de la méthode

A l'aide d'un récipient, de masse et de volume bien déterminé, on prend le sable (exemple), en remplissant le récipient à travers de deux mains, qui sont tendus formant un entonnoir à 10 cm environ au-dessus de niveau de récipient. On laisse tomber ce sable, ni trop vite, ni trop lentement. Verser ainsi le corps, ce matériau doit s'effectuer au centre de ce récipient, jusqu'il déborde tout autour en formant un cône.

Araser à l'aide d'une réglette l'excès par rapport au niveau de récipient. Peser le contenu.

# ANNEXES

---

$$M_{vap} = \frac{M_s}{V_r}$$

Donc, la masse de sable et le volume de récipient :

$M_s$  : masse de sable

$V_r$  : volume de récipient

## II .2 Mesure la propreté de sable (NF EN 933-8)

La propreté des granulats peut s'apprécier de différentes façons telles que l'essai au bleu de méthylène, d'équivalent de sable à 10 % de fines etc., mais dans ce cours, on va présenter seulement l'essai d'équivalent de sable.

### II.2.1 But de l'essai

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les flocules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

### II.2.2 Principe de l'essai

On agite une quantité de sable dans une solution lavant dans un récipient, on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- ✓ hauteur  $h_1$  : sable propre + éléments fins,
- ✓ hauteur  $h_2$  : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention est (a). L'essai dit d'équivalent de sable - permet de déterminer le degré de propreté du sable :

$$E_s = \frac{h_1}{h_2} 100\%$$

Selon que la hauteur  $h_2$  est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine **ESV** (équivalent de sable visuel) et **ES** (équivalent de sable au piston)



# ANNEXES

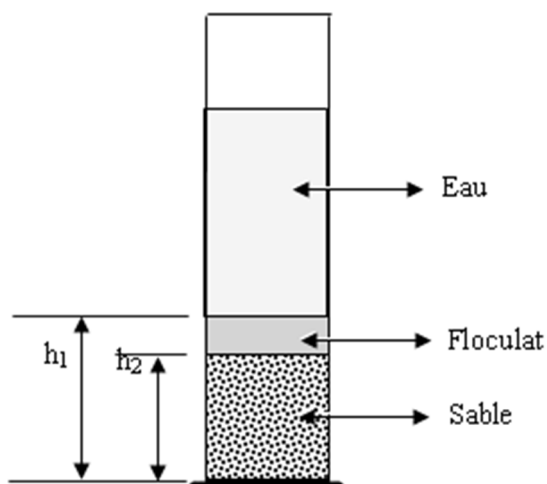


Figure Définition de l'équivalent de sable

## II.3 Essai micro –Deval (NF P 18-576)

### II.3.1 Principe

L'essai consiste à introduire un échantillon dans des cylindres en rotation, en présence d'une charge abrasive afin de mesurer l'usure des granulats.

### II.3.2 Préparation de l'échantillon

L'essai doit être effectué sur un lot de granulats ayant une granularité conforme à l'une des deux classes granulaires suivantes :

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
0.2-2	2500±4
0.2-04	2500±4

Pour effectuer un essai sec ou un essai en présence de l'eau :

- Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105° C jusqu'à obtention d'une masse constante.
- Tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie.
- La masse de l'échantillon pour essai sera de 500g ± 2g.

### II.3.3 Modes Opératoires

Introduire dans le cylindre d'essai, disposé ouverture vers le haut, la charge abrasive puis les 500 g de matériau préparé.

# ANNEXES

Pour effectuer un essai en présence d'eau on ajoutera 2.5 litre.

Mettre les cylindres en rotation à une vitesse de  $(100 \pm 5)$  tr/min pendant 2 heures ou 12000 tr.

- ✓ Après essai, recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac en ayant soin
- ✓ d'éviter les pertes de granulat. Laver soigneusement l'intérieur de cylindre.
- ✓ Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 0.1 mm.
- ✓ Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive.
- ✓ Sécher le refus à 1.6mm à 105°C jusqu'à masse constante.
- ✓ Peser ce refus au gramme près ; soit  $m_0$  le résultat de la pesée.

## II.3.4 Expression des résultats

Le coefficient Micro Deval est par définition le rapport  $100 \frac{m}{500}$

Où :

$m = 500 - m_0$  : est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 0.1mm.

On a donc : le coefficient Micro Deval =  $\frac{500 - m_0}{500} 100$



« Photo de la machine de Micro-Deval »

## III LES ESSAIS MECANIQUES

### III.1 Résistance mécanique a la flexion

#### III.3.1 Définition

L'éprouvette utilisée dans l'essai de flexion est une éprouvette prismatique  $4 \times 4 \times 16$  en BFUP La rupture est effectuée sous charge concentrée dans une machine munie d'un dispositif à trois rouleaux

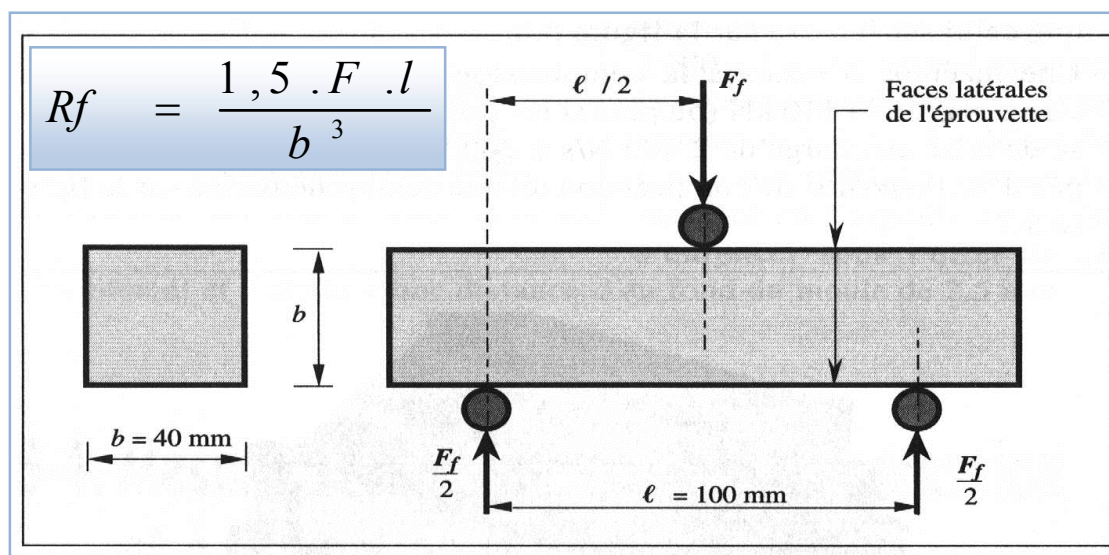
# ANNEXES

## III.3.2 Dispositif de l'essai

Le dispositif de flexion comporte deux appuis à rouleau de 10 mm de diamètre, distant de 100 ou de 106,7 mm, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une face latérale de moulage, et un troisième rouleau de même diamètre, équidistant des deux premiers, et transmettant la charge  $F$ .

Pour transmettre une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, deux rouleaux doivent pouvoir osciller légèrement de leur centre dans le plans vertical perpendiculaire au grand axe

de l'éprouvette.



## III.2 Résistance mécanique à la compression (NF P 15-471)

### III.2.1 Définition

L'essai de compression est exécuté sur une presse pour matériaux durs, sur les demi-éprouvettes provenant de l'essai de flexion. Si la compression a lieu plus de 20mm après celui de la flexion, il faut conserver les demi éprouvettes dans l'armoire humide.

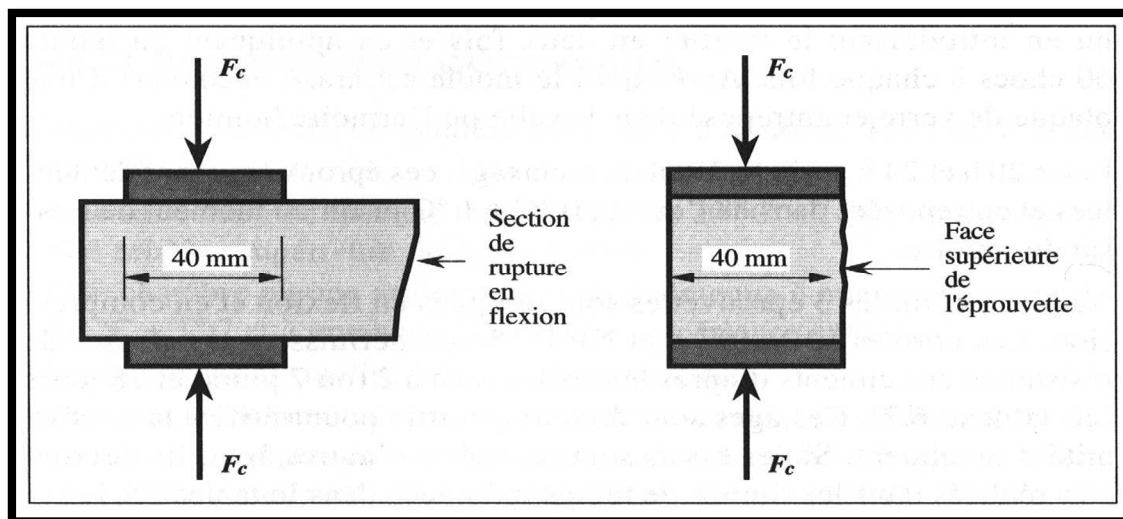
### III.2.2 Dispositif de l'essai

Chaque demi prisme est essayé en compression sur ses faces de moulage, sous une section de  $40 \times 40$  mm, entre deux plaques de métal dur d'au moins 10mm d'épaisseur, de  $40 \pm 0,1$ mm de largeur, de longueur supérieur à 40mm et dont la tolérance de plénitude est de 0,01mm.

# ANNEXES

Ces plaques sont en acier dur d'une dureté Vickers d'au moins 600, ou de préférence en carbure de tungstène.

Le demi-prisme est placé entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'environ 1cm.



$$Rf = \frac{F_c}{b^2}$$

L'ensemble du dispositif et de l'éprouvette est placé entre les plateaux d'une presse répondant aux spécifications du fascicule de documentation FD P n°18-308 « Spécification de construction, d'emploi et de contrôle des presses destinées à l'essai de compression des matériaux durs ».

### III.2.3 Contrainte de rupture à la compression

La charge doit croître jusqu'à la rupture à une vitesse telle que l'accroissement de contrainte soit compris entre 10 et 20 bars /s. Toutefois, jusqu'à la moitié de la charge de rupture présumée, la charge peut croître rapidement. La contrainte de rupture par compression, la valeur retenue pour chacune des épreuves est la médiane des résultats élémentaires.

**Notice produit**  
Edition 06/ 2010  
Numéro 2.11  
Version n°2010.087  
SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

## 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.



**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 autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplaçants, 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.
- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet de réduire significativement le rapport E/C ce qui améliore la durabilité du béton durci (diminution de la perméabilité, augmentation des résistances mécaniques, diminution du retrait).

**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.



### 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** 4,5 à 6,5

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

**Extrait sec** 28,0 à 31,0 %

<b>Teneur en ions Cl<sup>-</sup></b>	≤ 0,1 %
<b>Conditions d'application</b>	
<b>Dosage</b>	Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.
<b>Mise en œuvre</b>	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
<b>Précautions d'emploi</b>	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité sur Internet <a href="http://www.sika.fr">www.sika.fr</a>
<b>Mentions légales</b>	Produit réservé à un usage strictement professionnel Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA® a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»