

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES**



**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**  
**Département de Génie Des Matériaux**

## **Mémoire**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de Master**

**Spécialité : Génie des matériaux**

**Option : science des matériaux pour la construction durable**

## **THEME**

---

**L'influence de la nature du superplastifiants sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques des BFUP à base de déchet de briques réfractaires**

---

**Réalisé Par :**

**Bouزيد Radouane**  
**Bansir Zakaria**

**Suivi par :**

**Mr :M.SAIDI**  
**M<sup>elle</sup>:I.DJEFOUR**

**Boumerdes 2016/2017**

## REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, nous remercions Dieu le Tout Puissant de nous avoir donnés la volonté et le courage pour accomplir ce travail.*

*Nous remercions vivement nos promoteurs Mr M.SAIDI, M<sup>elle</sup> I.DJEFOUR, tous les enseignants du Département matériaux, les techniciens et les ingénieurs du laboratoire (LNHC) en particulier messieurs Belhadj, Moustafa, ami Arezki, qui nous ont aidé et qui n'ont ménagé aucun effort pour la réalisation de ce modeste travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre sincère reconnaissance.*

*Une pensée pleine de reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribués à notre formation pendant toute la durée de nos études , afin d'acquérir ce modeste travail.*

*Nombreuses sont les personnes qui nous ont apporté leur aide et leur soutien, nous tenons à citer nos camarades qui nous ont beaucoup aidé dans notre travail sans mentionner leurs noms, nous tenons à leurs présenter nos remerciements les plus sincères.*

*Nous remercions les membres du jury qui ont accepté de juger ce travail*

*Enfin, nous remercions nos parents de nous avoir élevé, instruit, pour tous leurs sacrifices, ... les mots s'épuisent sans doute, mais vous comprendrez que tout un univers de paroles ne pourrait suffire pour vous dire merci, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre réussite MERCI.*

*RADOUANE ET ZAKARIA*

# « Dédicaces »

*Je dédie ce modeste travail :*

*A celle qui m'a donné la vie et l'envie de vivre, à celle  
qui m'a entouré de sa tendresse, à celle qui a attendu*

*avec patience les fruits de sa bonne éducation,*

*à ma très chère Mère, et merci pour avoir veillé sur moi.*

*Mon très cher père, conscient de tous les sacrifices, les efforts et la  
gentillesse qu'il m'a toujours apporté.*

*Mes très chers frères et*

*A ma sœur et ses enfants*

*Ainsi qu'à toute la famille : BANSIR*

*Tous mes amis (Zouheir, Hichem, Adel, Mohamed, Hamza,  
Mohamed, Brahim, Ziyade et .....).*

*Tous mes amis de la fac (Zino, Malek, Mohamed, Faras, .....).*

*Toute la promotion de Génie des matériaux*

*Sans oublier la famille de mon binôme Bouzid.*

*Zakaria*

## « Dédicaces »

*Je dédie ce modeste travail :*

*A celle qui m'a donné la vie et l'envie de vivre, à celle qui m'a entouré de sa tendresse, à celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation, à ma très chère mère, et Merci pour avoir veillé sur moi. Mon très cher père, conscient de tous les sacrifices, les efforts, et la gentillesse qu'il m'a toujours apporté.*

*Mes très chers frères et*

*A mes sœurs*

*Ainsi qu'à toute la famille : Bouzid*

*A tous mes amis (e) : Abdo, Nasro, Malek, Mohamed, Salami*

*A mon très cher binôme : Zakaria et sa famille*

*A toute la promotion de MCD, MCQ et MCM A tous ceux, qui ont participé, de près ou de loin à la réalisation de ce*

*Travail.*

**RADOUANE**

## Résumé

Ce travail consiste à étudier les effets de différents superplastifiants (TEMPO 12 et SIKAFUID) sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques des BFUP à base de déchets de brique réfractaire et de sable des dunes, introduits par substitution au ciment avec différents pourcentages. La valorisation et l'utilisation des déchets de briques réfractaires comme ajouts dans le mortier et béton peuvent contribuer à surmonter le déficit en agrégats et à améliorer leurs caractéristiques notamment à des températures élevées. Les résultats montrent que :

- La substitution de ciment par le déchet de brique réfractaire et par le sable des dunes influence négativement sur les caractéristiques mécaniques (diminue la résistance) des BFUP jusqu'à un certain seuil, dans notre cas la substitution de 10% par le déchet et le sable riche en silice donne de bonnes résistances mécaniques. L'emploi de ces ajouts minéraux par substitution au ciment dans les BFUP a permis également d'améliorer les résistances du béton, grâce à sa grande finesse qui contribue à une grande compacité (substitution autour de 10 à 15% de la quantité du ciment).
- Les fibres alfa extraites par traitement chimique apportent une amélioration des performances de ces BFUP et contribuent à une meilleure ductilité.
- Toutes les éprouvettes élaborées à base de déchet de brique réfractaire et de sable des dunes présentent des résistances thermiques importantes (début de fusion à 1340 et 1310 C°).

**Mots Clés :** BFUP, sable des dunes, déchet de briques réfractaires, fibres alfa, propriétés thermo-mécaniques.

## **Abstract**

This work consists of studying the effects to various superplasticizers (TEMPO 12 and SIKSAFLUID) on the physico-mechanical and thermal properties of BFUP based on refractory brick waste and dune sand, introduced by cement substitution with different percentage. The recovery and use of waste refractory bricks as additions in mortar and concrete can help to overcome the deficit in aggregates notably at high temperatures. The results show that:

- The substitution of cement by refractory brick waste and dune sand negatively affects the mechanical characteristics (decreases the resistance) of the BFUP up to a certain threshold, in our case the substitution of 10% by the waste and the sand rich in silica gives good mechanical strengths. The use of these mineral additions by substituting cement in the BFUP also made it possible to improve the strength of the concrete, thanks to its great fineness which contributes to a great compactness (substitution around 10% to 15% of the quantity of the cement).
- The Alfa fibers extracted by chemical treatment bring an improvement in the performances of these BFUP and contribute to a better ductility.
- All the specimens produced from refractory brick waste and dune sand have significant thermal resistance (early melting).

### **Keywords:**

BFUP, sand dunes, refractory brick waste, fibers alfa, thermo-mechanical properties.

## ملخص

هذا العمل هو دراسة تأثيرات مختلف المدنات المتفوقة (توميو12 وسيكافلويد) في الخصائص الفيزيائية الكيميائية والحرارية لخرسانة عالية الأداء معززة بألياف على أساس الاجر المقاوم للحرارة المستعمل ورمل الصحراء. يقدم كاستبدال للإسمنت بمختلف النسب. تطوير واستخدام نفايات الاجر المقاوم للحرارة كإضافات في الملاط والخرسانة يمكن ان تساعد التغلب على العجز وتحسين خصائصهم الخاصة في درجات حرارة مرتفعة. أظهرت النتائج ان:

استبدال الاسمنت بنفايات الاجر المقاوم للحرارة المستعمل ورمل الصحراء تؤثر سلبا على الخصائص الميكانيكية (يقال المقاومة) في خرسانة عالية الأداء معززة بألياف حتى تصل الى عتبة معينة وفي حالتنا استبدال 10% بنفايات الاجر والرمل الغني بالسليكا يعطي مقاومة ميكانيكية جيدة. استخدام هذه المضافات المعدنية لاستبدال الاسمنت في الخرسانة عالية الأداء المعززة بالألياف يسمح أيضا في زيادة مقاومة الخرسانة وبفضل دقة عالية للمساهمة في ضغط كبير (حول استبدال 10% الى 15% من كمية الاسمنت).

الياف الحلفة المستخرجة بواسطة المعالجة الكيميائية توفر أداء محسنا لخرسانة عالية الأداء معززة بألياف والمساهمة في تحسين الليونة.

جميع العينات المتطورة القائمة على الاجر المقاوم للحرارة المستعمل ورمل الصحراء يعرض مقاومات حرارية مهمة (بداية الانصهار بين 1310 و 1340 درجة).

### كلمات مفتاحية:

خرسانة عالية الأداء معززة بألياف، رمل الصحراء، نفايات الاجر المقاوم للحرارة، الياف الحلفة، الخصائص الحرارية الميكانيكية.

## SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

### CHAPITRE I : Généralités sur les bétons

I. Généralités sur les bétons : .....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. définitions de béton.....	3
I.3. Constitutions des bétons .....	3
I.3.1. Ciment.....	4
I.3.2. Les granulats .....	4
I.3.2.1. les différents types des granulats .....	5
I.3.3. Les fibres.....	7
I.3.4. Les adjuvants .....	8
I.4.5.1. présentation et conditionnement des adjuvants.....	9
I.3.5. Additifs .....	12
I.3.6. Eau de gâchage .....	12
I.5. Principaux avantages et inconvénients du béton .....	13
I.5.1. Avantages du béton :.....	13
I.5.2. Inconvénients du béton .....	13
I.5. Classification du béton.....	14
I.6. les différents types des bétons .....	14
I.6.1. Béton armé .....	14
I.6.2. Béton léger de charpente et béton léger isolant .....	15
I.6.3. Béton lourd.....	15
I.6.4. Béton projeté.....	16
I.6.5. Béton réfractaire.....	16
I.6.5.1. Les catégories de béton réfractaire.....	16
I.6.5.2. Les familles de béton réfractaire .....	17
I.6.6. Béton Autoplaçants (BAP) .....	18
I.6.7. Bétons à hautes performances (BHP) .....	18
I.6.7.1. Les BHP se caractérisent par .....	18
I.6.7.2. Leurs principales propriétés sont .....	19
I.7. Propriétés du béton .....	19
I.7.1. A l'état frais .....	19

I.7.2.A L'état durci .....	20
I.8.Conclusion : .....	21

## **CHAPITR II : Béton Fibré Ultra Haute performance**

II.1.Introduction .....	22
II.2.Historique sur le BFUHP.....	22
II.3.Bétons fibrés a ultra hauts performances(BFUHP).....	23
II.4.Formulation des BFUHP .....	24
II.4.1.Constituants .....	24
II.5.Etude sur les constituants des BFUHP .....	27
II.5.1.Introduction .....	27
II.5.2.le ciment .....	27
II.5.2.1.Constitution des ciments.....	27
II.5.2.2.Fabrication du ciment .....	27
II.5.3.Sable fin.....	28
II.5.3.1.Origine des sables .....	29
II.5.3.2.Différents types de sable.....	29
II.5.3.3.Caractérisation du sable.....	30
II.5.4.Fumée de silice .....	31
II.5.5.Quartz broyé .....	31
II.5.6.Les fibres .....	32
II.5.6.1.Rôles des fibres dans le béton.....	32
II.5.6.2.Déférent types de fibres .....	33
II.5.6.3.Proportion des constituants.....	33
II.5.6.4.Influence des fibres sur la mise en œuvre des BFUHP .....	34
II.5.7.Adjuvants.....	35
II.5.8.Eau de gâchage .....	35
II.6.Caractéristique des BFUHP.....	35
II.6.1.Caractéristiques à l'état frais .....	35
II.6.1.1.Essai d'étalement.....	35
II.6.1.2.Mesure de la masse volumique à l'état frais.....	36
II.6.2.Caractéristiques instantanées à l'état durci.....	36
II.6.2.1.Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité.....	36
II.6.2.2.Propriétés mécaniques .....	37

II.6.2.3.Traitement thermique .....	39
II.7.Comportement en feu .....	39
II.8.Domaines d'applications des BFUP .....	39
II.9.Conclusion .....	40

### **CHAPITRE III : valorisation des déchets**

III. La valorisation des déchets .....	41
III.1.Pourquoi valoriser les déchets ? .....	42
III.2. Valorisation des déchets en Algérie .....	42
III.2.1. Des métiers de l'environnement à apprendre .....	42
III.2.2. La part de responsabilité des industriels .....	43
III.2.3.1. Matériaux autorisés .....	44
III.2.3.2. Matériaux interdits .....	44
III.2.3.3. Le recyclage .....	45
III.3. Généralités.....	45
III.3.1. Définitions des matériaux réfractaires.....	46
III. 4. Les différentes familles des produits réfractaires.....	46
III .4.1. Réfractaires façonnés .....	46
III.4.2. Réfractaires non façonnés ou monolithiques.....	47
III.5. Différents critères de classification .....	47
III.5.1. Réfractaires a` base d'oxydes.....	48
III.5.2. Réfractaires à base de non-oxydes .....	48
III.5.3. Réfractaires mixtes .....	48
III.5.5. Les réfractaires isolants .....	49
III.6. Caractérisation des produits réfractaires .....	49
III.6.1. Propriétés physiques.....	49
III.6.2. Propriétés thermiques .....	49
III.6.3.Propriétés thermiques.....	50
III.7. Les différentes catégories des matériaux réfractaires .....	50
III.8. La classification des produits réfractaires .....	50
III.8.1. Selon la structure .....	50
III.8.3. Selon la fabrication.....	51
III.9. Ciment alumineux fondu (réfractaire).....	51
III.9.1. Introduction .....	51

III.9.2. Composition chimique .....	51
III.9.3. Matières premières pour la fabrication du Ciment Alumineux .....	51
III.9.4. Procédé de fabrication.....	52
III.10. Brique réfractaire.....	53
III.10.1. Définition .....	53
III.10.2. Déchet de briques .....	54
III .10.2.Caractéristique.....	54
III .10.2.1.Liaison thermique ou chimique.....	54
III.10.3. Effet d'une source de chaleur sur les briques réfractaires.....	55
III.10.4. Principe de fabrication des briques réfractaires .....	55
III.10.5. Les principaux types de briques réfractaires .....	56
III.10.6. Domaines d'utilisation .....	58

## **PARTIE PRATIQUE IV**

<b>PREMIER PARTIE</b> .....	60
IV. Méthodologie et objectif du travail pratique : .....	60
IV.1. Analyse physico-chimiques et mécanique des constituants :.....	61
IV.1.1.Caractérisation des matériaux utilisés :.....	61
IV.1.1.1.Le ciment CPJ-CEM II/A 42.5 conformément à la norme NA 442 édition 2000 :	61
IV.1.1.2. Sable :.....	65
IV.1.1.3.Sable broyé.....	68
IV.1.1.4. Les briques réfractaires .....	69
IV.1.1.4.1.Caractéristiques .....	69
A) Les caractéristiques chimiques de la brique avant son utilisation dans le four.....	69
IV.1.1.4.2. Les déchets de briques réfractaires.....	69
IV.1.1.4.3.préparation.....	70
IV.1.1.4.4.Caractéristiques .....	71
A) Caractéristiques chimiques de déchets de brique réfractaire apres son utilisation dans le four .....	71
B) Caractéristiques physiques du déchets de brique réfractaire .....	73
IV.1.1.5. Fibre Alfa.....	73
IV.1.1.5.1. Extraction chimique .....	74
IV.1.1.6. Eau de gâchage.....	75

IV.1.1.7. Adjuvants (Superplastifiants) .....	75
IV.1.1.7.1.Sika viscoconcrete tempo 12.....	75
IV.1.1.7.2.SIKAFLUID.....	77
IV.1.1.8.Conclusion.....	79
<b>DEUXIEME PARTIE</b> .....	79
IV.1. formulation et confection des différentes compositions de BFUP .....	79
IV.1.1.Formulations.....	79
IV.1.2. Calcul de la composition du BFUP .....	79
IV.1.3.Détermination de la masse de chaque constituant pour 1m <sup>3</sup> :.....	80
IV.1.4.Formulation du BFUP .....	83
IV.1.5.Le Malaxage .....	85
IV.1.6.Le mode de malaxage.....	85
IV.1.7.Le moulage, démoulage et conservation des éprouvettes .....	86
IV.2.Caractéristiques physiques et mécaniques du BFUHP.....	86
IV.2.1. L'étalement.....	86
IV.2.2.Masse volumique.....	87
IV.2.3.La porosité & l'absorption .....	88
IV.3.Characteristiques Mécaniques des Mortiers Confectionnés .....	91
IV.3.1.Sans Fibre.....	91
IV.3.1.1.Résistance de flexion.....	91
IV.3.1.2.Résistance compression.....	95
IV.3.2.Avec les fibres .....	99
IV.3.2.1. Traction des fibres alfa : .....	99
IV.3.2.2.Fibre alfa traité chimiquement : .....	100
IV.3.2.3. Résistance de flexion.....	101
IV.3.2.4. Résistance compression.....	102
<b>TROISIEME PARTIE</b> .....	104
IV. Traitement thermique.....	104
IV.1.But du traitement thermique.....	104
<b>Conclusion Générale</b> .....	107
Présentation de l'unité LHCC	
Annexe	
Bibliographie	



# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE I

<b>Tableau.I.1</b> : Dimensions et caractéristique des familles de granulats .....	6
<b>Tableau.I.2</b> : Teintes des granulats en fonction de leur nature minéralogique.....	6
<b>Tableau.I.3</b> : Caractéristiques des fibres utilisées dans les bétons. ....	8
<b>Tableau.I.4</b> : Adjuvants normalisés modifiant la prise et le durcissement, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise .....	11
<b>Tableau.I.5</b> : La teneur des constituants de béton en poids et en volume.....	12

## CHAPITRE II

<b>Tableau II.1</b> : Exemple de formulation d'un BFUP .....	25
<b>Tableau II.2</b> : Compositions et propriétés de quelques bétons .....	26
<b>Tableau II.3</b> : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par Dreux .....	30
<b>Tableau II.4</b> : Caractéristiques générales de la fumée de silice.....	31

## CHAPITRE III

<b>Tableau III 1</b> : Les différents types de produits réfractaires. ....	50
<b>Tableau III.2</b> : la composition chimique de ciment alumineux.....	51

## PARTIE PRATIQUE IV

<b>Tableau IV.1</b> : Caractéristiques physiques du ciment CPJ-CEM II/A 42.5 .....	61
<b>Tableau IV.2</b> : La composition chimique ciment CPJ-CEM II/A 42.5 .....	62
<b>Tableau IV.3</b> : Caractéristiques mécaniques ciment CPJ-CEM II/A 42.5 .....	63
<b>Tableau IV.4</b> : Compositions minéralogiques et chimiques de clinker .....	64
<b>Tableau IV.5</b> : Composition minéralogique de clinker .....	64
<b>Tableau IV.6</b> : Caractéristiques physiques .....	65
<b>Tableau IV.7</b> : La composition chimique de sable oued souf.....	66
<b>Tableau IV.8</b> : Analyse granulométrique (NF P 18-560) .....	67
<b>Tableau IV.9</b> : Caractéristiques physiques de sable broyé (sable d'Oued Souf).....	68

<b>Tableau IV.10</b> : Analyse chimique de la brique réfractaire (à base de zircon-corindon électro fondu) avant son utilisation dans le four .....	69
<b>Tableau IV.11</b> : Granulométrie de déchet de brique réfractaire .....	70
<b>Tableau IV.12</b> : Analyse chimique du déchet de brique réfractaire par FX .....	72
<b>Tableau IV.13</b> : Caractéristiques physiques de déchet de brique réfractaire (à base de zircon-corindon) .....	73
<b>Tableau IV.14</b> : Dosage des constituants selon AFGC (pour 1m <sup>3</sup> ) .....	80
<b>Tableau IV.15</b> : Formulation à base de TEMPO 12 .....	83
<b>Tableau IV.16</b> : Formulation à base de SIKAFUID.....	84
<b>Tableau IV.17</b> :Formulation à base de mélange(TEMPO 12/SIKAFUID).....	84
<b>Tableau IV.18</b> :Formulation avec fibre alfa a base de mélange(TEMPO12/SIKAFUID ....	85
<b>Tableau IV.19</b> : Résultats de l'essai d'étalement des déferents adjuvants .....	87
<b>Tableau IV.20</b> : Masse volumique à l'état frais et durcis des différentes formulations .....	88
<b>Tableau IV.21</b> : Porosité de BFUHP a basz des différentes adjuvantes .....	89
<b>Tableau IV.22</b> : Résultats de L'absorption(%) à base de déferents adjuvants.....	90
<b>Tableau IV.23</b> : Résistance à la flexion de déferentes formulations à base de TEMPO 12 ..	92
<b>Tableau IV.24</b> : Résistance à la flexion des différentes formulations à base de SIKAFUID .....	93
<b>Tableau IV.25</b> : Résistance à la flexion des différentes formulations à base de mélange de TEMPO 12+SIKAFUID (50/50)% .....	94
<b>Tableau IV. 26</b> : Résistance à la compression des différentes formulations à base de TEMPO 12.....	96
<b>Tableau IV.27</b> : Résistance à la compression des différentes formulations à base de SIKAFUID.....	97
<b>Tableau IV.28</b> : Résistance à la compression des déferents formulations à base de TEMPO 12+SIKAFUID (50 / 50)% .....	98
<b>Tableau IV.29</b> : Propriétés mécanique de la fibre alfa traité chimiquement .....	100
<b>Tableau IV.30</b> : Résistance à la flexion des déferents formulation à base de TEMPO 12+SIKAFUID (50 / 50)% +0.5% $\alpha$ .....	101

<b>Tableau IV.31</b> : Résistance à la compression des différents formulations à base de TEMPO 12+SIKAFLUID (50 / 50)% +0.5% $\alpha$ .....	102
<b>Tableau IV.32</b> : Analyse thermique sur la microscopie de chauffe(ECHANTILLON 01 :BFUP T +0.5% $\alpha$ ) .....	105
<b>Tableau IV.33</b> : Analyse thermique sur la microscopie de chauffe(ECHANTILLON 01 :BFUP 30%BR +0.5% $\alpha$ ) .....	105

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I

<b>Figure I.1</b> : Photo de ciment portland. ....	4
<b>Figure I.2</b> : Photo des granulats.....	4
<b>Figure.I.3</b> : Préparation de béton.....	13
<b>Figure.I.4</b> : Béton armé .....	15
<b>Figure.I.5</b> : Béton léger de charpente et béton léger isolant .....	15
<b>Figure.I.6</b> : Béton lourd.....	16
<b>Figure.I.7</b> : Réparation d'un pont grâce à l'utilisation du béton projeté .....	16
<b>Figure.I.8</b> : Béton réfractaire.....	16

### CHAPITRE II

<b>Figure II.1</b> : Image correspond au développement des bétons au cours des années.....	23
<b>Figure II.2</b> : Exemples de béton.....	24
<b>Figure II.3</b> : Schéma de fabrication du ciment.....	28
<b>Figure II.4</b> : Mesure de l'équivalent de sable .....	30
<b>Figure II.5</b> : Rôles des fibres dans le béton .....	32
<b>Figure II.6</b> : Comportement de charge-déformation de béton avec fibres et béton sans fibres .....	33
<b>Figure II.7</b> : Essai d'étalement au cône à mortier.....	36
<b>Figure II.8</b> : Comportement en compression d'un BFUP.....	38
<b>Figure II.9</b> : Passerelle de Seonyu, Séoul, Corée du sud, réalisation en Ductal® (Architecte : Ricciotti Rudy –Photographe : Rouault Philippe – Source : Médiathèque Lafarge).....	40

### CAPITRE III

<b>Figure III.1</b> : Comment marche la valorisation des déchets.....	41
<b>Figure III.2</b> : Les déchets inertes .....	44
<b>Figure III.3</b> : Recyclage .....	45
<b>Figure III.4</b> : Températures de fusion des composés réfractaires.....	46

<b>Figure III.5</b> : Schéma de fabrication de ciment alumineux. ....	<b>52</b>
<b>Figure III.6</b> : Brique réfractaire de four welko .....	<b>53</b>
<b>Figure III.7</b> : Transfert de chaleur entre les parois. ....	<b>55</b>
<b>Figure III.8</b> : Schéma de la fabrication des Briques .....	<b>56</b>
<b>Figure III.9</b> : Brique d'alumine .....	<b>56</b>
<b>Figure III.10</b> : Brique de silice .....	<b>57</b>
<b>Figure III.11</b> : Brique de magnésie.....	<b>57</b>
<b>Figure III.12</b> : Brique de zircon.....	<b>58</b>
<b>Figure III.13</b> : Four de ciment .....	<b>59</b>
<b>Figure III.14</b> : Four de verre .....	<b>59</b>

## **PATRIE PRATIQUE IV**

<b>Figure IV.1</b> : La composition chimique ciment CPJ-CEM II/A 42.5.....	<b>62</b>
<b>Figure IV.2</b> : Caractéristiques mécaniques ciments CPJ-CEM II/A 42.5 acompression et flexion.....	<b>63</b>
<b>Figure IV.3</b> : Composition minéralogique de clinker .....	<b>64</b>
<b>Figure IV.4</b> : Courbe granulométrique par tamisage nf 18-560.....	<b>68</b>
<b>Figure IV.5</b> : Brique réfractaire.....	<b>69</b>
<b>Figure IV.6</b> : Déchet de brique réfractaire .....	<b>69</b>
<b>Figure IV.7</b> : Analyse granulométrique par tamisage .....	<b>71</b>
<b>Figure IV.8</b> : Composition chimique de déchet de brique réfractaire.....	<b>73</b>
<b>Figure IV.9</b> : Alfa a l'état brut .....	<b>74</b>
<b>Figure IV.10</b> :procédé d'extraction d'alfa.....	<b>75</b>
<b>Figure IV.11</b> : Maaxeure de mortier .....	<b>85</b>
<b>Figure IV.12</b> : Préparation du BFUP dans le moule de prismatique <b>4×4×16 cm</b> .....	<b>86</b>
<b>Figure IV.13</b> : L'étalement à mini conne .....	<b>87</b>
<b>Figure IV.14</b> : La masse volumique à l'état frais et durcis des déférents mortiers.....	<b>88</b>
<b>Figure IV.15</b> :L'appareil de flexion .....	<b>91</b>

<b>Figure IV.16</b> : Résistance à la flexion des différentes formulations à base de TEMPO12.....	92
<b>Figure IV.17</b> : Résistance à la flexion des différentes formulations à base de SIKAFUID 93	
<b>Figure IV.18</b> : Résistance à la flexion des différentes formulations à base de mélange de TEMPO12/SIKAFUID (50/50)% .....	94
<b>Figure IV.19</b> : L'appareil de compression .....	95
<b>Figure IV.20</b> : Résistance à la compression des différentes formulations à base de TEMPO12 .....	96
<b>Figure IV.21</b> : Résistance à la compression des différentes formulations à base de SIKAFUID.....	97
<b>Figure IV.22</b> : Résistance à la compression des différentes formulations à base de à base de mélange de TEMPO12/SIKAFUID (50/50)% .....	98
<b>Figure IV.23</b> : Appareil mesure d'épaisseur de fibre de alfa.....	99
<b>Figure IV.24</b> : Appareil de traction de la fibre.....	100
<b>Figure IV.25</b> :Variation de la contrainte en fonction de l'allongement de fibre alfa traité chimiquement .....	101
<b>Figure IV.26</b> : Résistance à la flexion des différentes formulations à base de TEMPO12/SIKAFUID (50/50)% .....	102
<b>Figure IV.27</b> : Résistance à la compression des différentes formulations à base de à base de mélange de TEMPO12/SIKAFUID (50/50)% .....	103

## 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 maitrise 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-terraines ou pour les risques Natural (falaises, glissement de terrains, gravitées 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 :

- ✓ 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).

### **5. Contrôle des chantiers :**

#### **Route :**

- ✓ Contrôle des matériaux (classification GTR, comportement mécaniques et physique)
- ✓ Contrôle de compactage (essai à la plaque et dîna 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

### Introduction générale

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son faible prix de revient et les performances mécaniques et de durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser des ouvrages les plus divers, notamment des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires,.... etc.

Les Bétons fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUHP), bétons issus de recherches récentes (années 1980) et encore non développés en Algérie. Or, ces bétons présentent des propriétés mécaniques et de durabilité remarquables qui permettaient certaines utilisations spécifiques, que ce soit dans le domaine du bâtiment et de génie civil.

Les BFUHP résultent de recherches fondamentales sur l'arrangement granulaire et la structure cristalline. La matrice des BFUHP est constituée de ciment, de fumée de silice, de sable siliceux bien sélectionné ( $d_{\text{moy}} = 250 \mu\text{m}$ ), ainsi que des fibres, superplastifiant et d'eau.

Les BFUP se distinguent des bétons à hautes et très hautes performances par :

- Leur résistance en compression, systématiquement supérieure à 150 MPa,
- L'emploi systématique de fibres, qui assurent la non-fragilité du matériau et modifient le recours classique aux armatures actives ou passives,
- Leur fort dosage en liant et la sélection particulière dont les granulats font l'objet.

Dans ce contexte, les laboratoires de recherche sur les matériaux travaillent sur le développement de nouveaux composites cimentaires à base des déchets, dans le but économique (réduire le coût de réalisation), écologique (éliminer ces déchets de l'environnement) et technique (améliorer les propriétés mécaniques, physiques et thermiques des mortiers ou des bétons).

Les déchets peuvent être transformés en granulats ou en poudres recyclés pour être utilisés, parmi ces déchets, les déchets de briques réfractaires peuvent être broyés et utilisés comme ajouts pour la fabrication des BFUP.

Les briques réfractaires sont des briques qui conservent leurs propriétés mécaniques à très haute température c'est-à-dire les produits réfractaires résistant, par nature, aux températures élevées. Ces dernières sont de différentes qualités qui répondent aux besoins des

## Introduction générale

---

industries cimentières, céramique, sidérurgique, métallurgique, de la construction (Fumisterie), etc. Ce travail consiste à étudier les effets de différents superplastifiants (TEMPO 12 et SIKAFUID) sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques des BFUP à base de déches de brique réfractaire, introduits par substitution au ciment avec différents pourcentages.

L'étude expérimentale a été partagée en 3 parties :

- Caractérisation des constituants à savoir : sable, ciment, ajout (brique réfractaire), fibres naturelles (alfa), superplastifiants.
- Formulation et caractérisation physico-mécaniques des échantillons élaborés.
- Analyse thermique par microscope de chauffe.

## I. Généralités sur les bétons :

### I.1. Introduction

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son faible prix de revient et les performances mécaniques et de durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser des ouvrages les plus divers, notamment des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires,.... etc.

Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué mais, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées ont été réalisées qui lui menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, qui ont donné naissance à des nombreux types de béton en particulier avec les bétons à hautes performances (BHP). D'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme les bétons autoplaçants les bétons de fibres (BF) les bétons à très hautes performances (BTHP), et les bétons fibres ultra haute performance (BFUP).

### I.2.définitions de béton

Le Béton est le matériau de construction reconstituant artificiellement la roche, composé de granulats, de sable, de ciment et éventuellement d'adjuvants pour modifier les propriétés. C'est le matériau de construction le plus utilisé au monde, que ce soit en génie civil ou en travaux publics.

L'étude de la composition du béton a donc été scindée en deux parties :

- La première traitant des ciments de leurs propriétés et l'emploi qui différent selon la nature de leurs constituants et de leurs conditions de fabrication.
- La seconde traitant des autres composants qui sont les granulats, les adjuvants et l'eau.

### I.3.Constitutions des bétons

Le béton prêt à l'emploi est un mélange (granulats, ciment, adjuvants et eau) qui durcit pour former le matériau de construction le plus couramment utilisé dans le monde. Sa résistance à la traction et à la pression, sa durabilité, ses temps de prise, sa facilité de pose, son esthétique, sa maniabilité sous différentes conditions climatiques et de construction ainsi que son impact environnemental sont les principales caractéristiques prises en compte lors de la formulation, les principales constitutions des bétons sont :

## I.3.1.Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, matériau inorganique finement broyé, lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, il forme une pâte qui fait prise, durcit et conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment ordinaire anhydre est constitué de clinker Portland, de gypse et éventuellement d'additions telles que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, la fumée de silice, pouzzolanes naturelles..., etc.

Une notation cimentière a été établie pour simplifier l'écriture des phases solides. Les équivalences sont les suivantes :  $\text{CaO} = \mathbf{C}$  ;  $\text{SiO}_2 = \mathbf{S}$  ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = \mathbf{A}$  ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \mathbf{F}$  ;  $\text{SO}_3 = \mathbf{s}$  ;  $\text{H}_2\text{O} = \mathbf{H}$



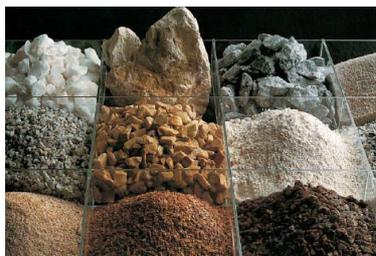
**Figure I.1** : photo de ciment portland.

## I.3.2.Les granulats

Les granulats sont des grains minéraux appelés fillers, sablons, sables, graves ou gravillons.

Ils sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origines alluvionnaires terrestres ou marines, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par recyclage de produits tels que les matériaux de démolition.

Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origines alluvionnaires (granulats roulés ou semi concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés). [2]



**Figure I.2** : photo des granulats.

La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

La granulométrie ou Analyse Granulométrique est la méthode d'essai qui a pour but de déterminer la granularité. Elle permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes classes granulaires constituant l'échantillon. [3]

Le granulat est désigné par sa classe granulaire d/D ou O/D avec :

- d : dimension inférieure du granulat
- D : dimension supérieure du granulat

### I.3.3.les différents types des granulats

Pour obtenir un béton de bonne résistance mécanique d'autres critères sont étudiés. Le sable et le gravier doivent être choisis de telle sorte qu'ils soient siliceux, ou calcaires de porosité faible, inférieure à 3% et non friable, ni tendre et surtout inerte vis-à-vis du ciment. Il faut exclure tout granulat altérable, nocif.

Les sables qui se décomposent lentement à l'air et à l'eau, les calcaires tendre doivent être éliminés. On a :

#### A- les granulats courants

On désigne par granulat courant celui qui présente une masse volumique  $> 2T/m^3$  généralement en utilise des matériaux alluvionnaires : sable et gravier, quand ils se raréfient on utilise des roches éruptives ou sédimentaires en granulat par concassage :

- ✓ **Silex, calcaire dur, silico calcaire** : constituent les matériaux alluvionnaires les plus importants .la densité va de 2,5 à 2,7.
- ✓ **Basalte** : est une roche volcanique avec une densité de 2,3 à 30
- ✓ **Grès** : sont des grains de silice plus au moins agglomères les grès durs de bon qualité peuvent être utilisé comme granulat.
- ✓ **Le granite** : ils se composent à l'air humide surtout si la teneur en mica est importante.
- ✓ **Laitier** : le laitier dans de granulat de bonne qualité .le laitier est obtenu par refroidissement brusque dans l'eau, il peut être utilisé comme sable mais il manque de fins et un broyage amélioré ses qualités. sa densité est de 2,6

## B- les granulats lourds

Ils sont utilisés dans les bétons lourds utilisés dans la construction d'ouvrage nécessitent une protection particulière. On cite le cas des accélérateurs et piles atomiques, la protection est plus efficace avec l'épaisseur, La barytine (sulfate de baryum) de densité 4,5 ; la magnétite c'est un oxyde de fer de densité 4,5 ; la grenaille de fonte avec une densité de 7,5.

## C- les granulats légers

Ils sont utilisés dans les bétons légers pour les constructions légères telles que la préfabrication l'isolation. On cite les suivants :

- ✓ **Argile expansée** : Est constitué de l'argile grasse introduite dans un four et ressort après séchage, expansion et cuisson et sous forme de modules arrondis à texture interne alvéolaire c'est un granulats prêt à l'emploi, sa densité est faible de 400à800Kg/m<sup>3</sup>.
- ✓ **Pierre ponce** : c'est une lave volumique alvéolée de couleur gris- clair.
- ✓ **Vermiculite** : obtenu par refroidissement brusque de silicate genre mica. Elle présente des propriétés ignifuges, donc utilisée dans les bétons contre le feu.

**Tableau.I.1** : Dimensions et caractéristique des familles de granulats. [4]

Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	D < 2 mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	d = 0 et D ≤ 4 mm
Graves	0/D	D ≥ 6,3 mm
Gravillons	d/D	d ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm
Ballasts	d/D	d = 31,5 mm et D = 50 ou 63 mm

**Tableau.I.2** : Teintes des granulats en fonction de leur nature minéralogique. [5]

Nature minéralogique des granulats	Teintes
Calcaires durs	Noir, bleu, rose, beige, blanc, vert
Granites	jaune, rose, gris, vert
Basaltes	Noir ou bleu-noir
Grès	Gris, rouge, beige
Diorites	Bleu ou rose
Quartzites	Rose, gris, blanc
Silex	Beige ou bistre

## I.3.4. Les fibres

Les fibres sont ajoutées aux matériaux cimentaire afin d'améliorer l'ours caractéristique à l'état durci. Les fibres utilisées dans la confection des bétons sont classées en quatre grandes familles caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques :

- Fibres minérales : verre, cabrons
- Fibres métalliques : acier, inox, fonte
- Fibres organiques : polypropylène, acrylique
- Fibres naturelles : alpha, hévéa, sisal.
- Chaque type de fibres présentes des caractéristiques et propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur.....) ; formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée.....) résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibres. [6]

### -Choix du type de fibre

- Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leur nature ou leur géométrie.
- Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont effectuées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins.
- Le choix des fibres dans la matrice peuvent être expliqués par leur nature, leur longueur, leur diamètre, leur forme et leur dosage.
- Le choix des fibres est aussi conditionné par un module d'élasticité très élevé, afin que les fibres soient.
- Le tableau (3) présente les caractéristiques de certaines fibres appropriées aux bétons et disponibles sur le marché.

Tableau.I.3 : Caractéristiques des fibres utilisées dans les bétons.

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>					
<b>E</b>	2,54	8-15	2000-4000	72000	3,0-4,8
<b>RA</b>	2,70	12-20	1500-3700	80000	2,5-3,6
<b>Synthétique</b>					
<b>Acrylique</b>	1,18	5-17	200-1000	17000-19000	28-50
<b>Aramide</b>	1,44	10-12	2000-3100	62000-120000	2-3,5
<b>Carbone</b>	1,90	0-8	1800-2600	230000-380000	0,5-1,5
<b>Nylon</b>	1,14	23	1000	5200	20
<b>Polyester</b>	1,38	10-80	290-1200	10000-18000	10-50
<b>Polyéthylène</b>	0,96	25-300	80-600	5000	12-100
<b>Polypropylène</b>	0,90	20-200	450-700	3500-5200	6-15

### I.3.5. 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 œuvre, provoque les modifications recherchées de telle ou telle de leurs propriétés, à l'état frais ou durci.

Sont donc exclus du domaine des adjuvants au sens de la norme les produits ajoutés au moment du broyage du clinker ou les produits dont le dosage dépasserait 5% du ciment (poudre pouzzolaniques par exemple)

On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants :

-Ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton : plastifiants-réducteurs d'eau, superplastifiants (anciennement fluidifiants) :

- ceux qui modifient la prise et le durcissement : accélérateurs de prise, accélérateur de durcissement, retardateurs de prise :

- ceux qui modifient certaines propriétés particulières : entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse.

Il faut y ajouter les produits de cure, qui ne sont pas à proprement parler des adjuvants et dont la fonction est de protéger de la dessiccation durant son durcissement.

### **I.3.5.1. présentation et conditionnement des adjuvants**

Les adjuvants se présentent le plus souvent sous forme liquide, cependant quelques-uns sont livrés en poudre et exceptionnellement en pâte ou liquide très visqueux. [7]

#### **A- les adjuvants sous forme liquide**

Les adjuvants sous forme liquide sont les plus répandus, néanmoins avec certains d'entre eux, il peut se produire une sédimentation après un temps plus ou moins long de conservation ; il convient alors de les remuer et de les homogénéiser avant emploi. Certains adjuvants liquides, à basse température, peuvent flocculer ou même geler, d'où la nécessité de les conserver à une température supérieure à 0 °C. D'autres, conservés trop longtemps dans des fûts métalliques provoquent une corrosion des fûts et leur éclatement (produits acides, fermentation).

En principe, les adjuvants vieillissent peu et sont utilisables d'une année à l'autre, sauf ceux contenant des résines (le délai raisonnable d'utilisation est de 6 mois).

- En berlingots de plastique d'une contenance de 200 à 1000g ;
- En flacons de 1 à 2L ;
- En bidons métalliques ou plastiques 2 à 30L ;
- En fûts métalliques de 50, 100, 200, 220, 250, et 300 litres ; - En citernes (vrac, plusieurs milliers de litres).

## **B- les adjuvants sous forme pulvérulente**

Les adjuvants sous forme pulvérulente sont souvent difficiles à mélanger en petite quantité (inférieure à 1% du poids de ciment), ils sont facilement eventable et peuvent craindre l'humidité, il faut donc les conserver dans des emballages étanches. Certains produits peuvent leurs être ajoutés pour empêcher leur mottage et lorsqu'ils sont solubles, il est indispensable sur les chantiers, de préparer à l'avance une solution liquide. Les adjuvants sous forme pulvérulente présentent l'avantage d'être comparativement moins chères du fait du transport et de l'emballage, et de ne pas geler comme c'est le cas des adjuvants sous forme liquide. Ils sont souvent utilisés dans le cas des hydrofuges de masse, ainsi que pour certains accélérateurs. Ils sont conditionnés :

- Dans des sacs de papiers kraft d'une contenance de 10 à 50Kg (ces sacs doivent être munis d'un revêtement étanche interne ou externe) ;
- Dans des sacs en plastiques de 10 à 50Kg ou dans des fûts en carton imperméabilisés. En général, ces sacs renferment des bols ou des cuillères doseurs (une dose par sac de ciment).

Tableau.I.4 : Adjuvants normalisés modifiant la prise et le durcissement, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise :

	Accélérateur de prise	Accélérateur de durcissement	Retardateur de prise
<b>Dosage</b>	1 à 3 %	0.2 à 3 %	0.1 à 0.5 %
<b>Introduction</b>	Dans l'eau de gâchage		
<b>Effets sur la prise</b>	Accélération très Variable suivant, les Et Dosage, le ciment, les températures		Retrait très variable suivant le dosage, ciment et température
<b>Effets sur les résistances initiales (après 28jours)</b>	Augmentées à 1 ou 2 jours	Augmentées	Diminuées à 1 ou 2 jours
<b>Effets sur les résistances finales (avant 03 jours)</b>	Légèrement diminuées	Inchangées ou légèrement diminuées	Légèrement diminuées
<b>Effets secondaires favorables</b>			Amélioration de la maniabilité avec possibilité de réduction d'eau
<b>Autres effets</b>	Possibilité d'une légère augmentation du retrait		

**I.3.6. Additifs**

Les additifs ne doivent présenter aucune action nocive sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques :

Il peut s'agir d'agents de mouture, fréquemment employés, qui sont des sels organiques solubles utilisés à des doses extrêmement faibles.

Ils agissent comme défloculation, empêchant ainsi les phénomènes de réagglomération des grains en cours de broyage.

Il peut s'agir également de sels solubles, tels certains adjuvants pour mortiers, bétons ou coulis qui, dans ce cas agissent sur une caractéristique précise mais dont la présence de ciment doit être obligatoirement indiquée en vue d'éviter d'éventuelles incompatibilités avec d'autres produits.

La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne devant pas dépasser 0,5% de la masse totale, valeur dans laquelle se trouve comprise la proportion d'agent de mouture, et ceci pour tous les ciments à l'exception des CHF-CEM III/A ou B et des CLK-CEM III/C, pour lesquels la proportion de sels chlorés (Na Cl) est autorisée jusqu'à 1%. [8]

**I.3.7. Eau de gâchage**

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher du béton parce qu'elles contiennent, dans certains cas, un excès d'impuretés qui détériore les propriétés du béton, notamment les propriétés physiques et mécanique (prise et résistance), les propriétés esthétiques (taches, efflorescence), la durabilité (corrosion des armatures, stabilité du béton).

Ces impuretés, éventuellement contenues dans l'eau de gâchage, sont soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis-à-vis du ciment, des granulats ou des armatures, soit des particules en suspension qui, du fait de leur quantité ou de leur qualité, soit indésirable.

**Tableau.I.5** : La teneur des constituants de béton en poids et en volume

<b>Constituants</b>	<b>Eau</b>	<b>Air</b>	<b>Ciment</b>	<b>Granulats</b>
<b>Volume (%)</b>	14 - 22	1 – 6	7 – 14	60 – 78
<b>Poids (%)</b>	5 – 9	-	9 – 18	63 – 85

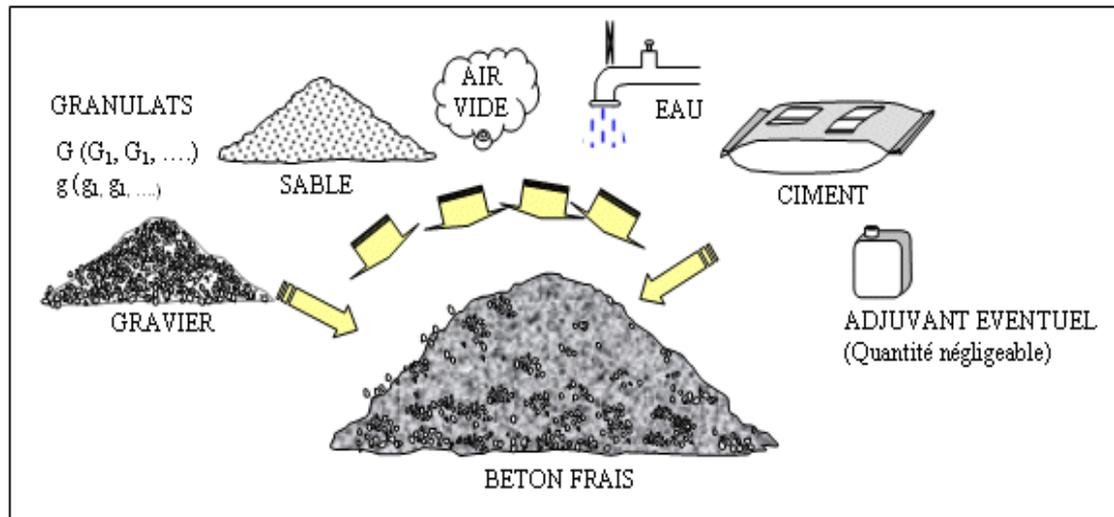


Figure.I.3 : préparation de béton.

## I.4. Principaux avantages et inconvénients du béton

### I.4.1. Avantages du béton :

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

### I.4.2. Inconvénients du béton

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

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de béton légers d'isolation).
- Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux)
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage.

## I.5. Classification du béton

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

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

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

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface et peuvent ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

## I.6. Les différents types des bétons

### I.6.1. Béton armé

Lorsqu'on emploie le béton en tant que matériau structural pour remplacer le bois ou l'acier, on doit porter son choix sur le béton armé. L'acier d'armature qu'on introduit dans le béton améliore considérablement sa résistance à la traction. On place les barres d'armature principalement là où se manifesteront les efforts de traction ; c'est l'acier qui supporte les contraintes qui, autrement, entraîneraient la rupture prématurée du béton.



**Figure.I.4 : Béton armé**

## **I.6.2. Béton léger de charpente et béton léger isolant**

L'utilisation de granulats de faible densité permet de produire des bétons légers de charpente et des bétons légers isolants. Les bétons légers de charpente, habituellement fabriqués à partir de schiste ou d'argile expansés, ont une résistance mécanique adéquate et permettent en même temps une réduction sensible de la masse de l'ouvrage de béton



**Figure.I.5 : Béton léger de charpente et béton léger isolant**

## **I.6.3. Béton lourd**

On produit des bétons lourds principalement pour deux utilisations : le barrage-poids et les réacteurs nucléaires. Dans le premier cas, l'avantage réside principalement dans la réduction du volume de béton nécessaire. Dans le second cas, le béton lourd se révèle un matériau antiradiations efficace et au coût avantageux



**Figure.I.6** : Béton lourd

## I.6.4. Béton projeté

Le béton projeté, aussi appelé gunite, est produit à l'aide d'un pistolet à air comprimé, L'eau se combine aux ingrédients solides (ciment et granulats) à la sortie des orifices du pistolet ; le mélange et l'application s'effectuent donc en même temps, sous n'importe quel angle .généralement, on peut aussi se passer de coffrages



**Figure.I.7** : Réparation d'un pont grâce à l'utilisation du béton projeté

## I.6.5. Béton réfractaire

Lorsque des constructions seront soumises à des températures très élevées, on se doit d'utiliser un matériau particulièrement résistant à la chaleur. Plusieurs ouvrages de ce type ont été réalisés en béton réfractaire ; celui-ci peut résister à des températures, soit environ le double de celles que supporte le béton normal. On fabrique ce béton à partir de ciment alumineux et de granulats spéciaux.



**Figure.I.8** : Béton réfractaire

### **I.6.5.1. Les catégories de béton réfractaire**

Les bétons et mortiers à prise hydraulique constituent la majorité des réfractaires monolithiques. Les bétons et mortiers réfractaires denses peuvent être divisés en trois catégories bien distinctes, dont la différence essentielle est la teneur en ciment :

- ✓ bétons classiques : teneur en ciment comprise entre 15 et 25 % suivant la nature de L'agrégat et sa densité.
- ✓ bétons basse teneur en ciment : teneur comprise entre 4 et 10 % environ.
  - version coulage vibration
  - version auto coulable
- ✓ bétons à ultra basse teneur en ciment : teneur en ciment inférieure à 2 %
  - version coulage vibration
  - version auto coulable
- ✓ version spéciale : les bétons de projection

### **I .6.5.2. Les familles de 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. La matrice cimentaire est un agent de liaison qui permet d'assurer en permanence la cohésion de l'ensemble des constituants. La nature du liant permet de distinguer deux principales familles de bétons réfractaires :

**a- Les bétons à liants chimiques :** c'est le cas des bétons constitués d'un liant à base de phosphore, utilisés pour de bonnes résistances mécaniques à haute température surtout dans le cas de produits d'alumine pure, ou des bétons constitués d'un liant à base de chrome.

**b- Les bétons à liants hydrauliques :** soit à base de ciment alumineux, de type ciment fondu (teneur en  $Al_2O_3$  comprise entre 40% massique et 42% massique), soit à base de ciment réfractaire alumineux (teneur en  $Al_2O_3$  supérieure à 60% massique) qui, après cuisson, se comportent comme un matériau réfractaire façonné cuit.

Cette dernière famille constitue la majorité des bétons réfractaires monolithiques dont les mécanismes de prise sont basés sur l'hydratation d'un ciment. Les ciments les plus couramment utilisés dans l'industrie réfractaire sont des ciments silico-alumineux-calciques à haute teneur en alumine.

Les grandes catégories de ciments hydrauliques, réparties suivant quatre domaines, sont identifiables :

- les ciments Portland sont très utilisés en génie civil.
- les ciments fondus sont une alternative intermédiaire entre les ciments Portland et les ciments réfractaires.
- les ciments alumineux forment le groupe des ciments réfractaires et correspondent à une zone assez étendue du diagramme ternaire.

### **I.6.6. Béton Autoplaçants (BAP)**

De nombreux termes définissent ce béton, béton autonivelants, béton auto compactant ou béton hyper fluide, Formuler spécifiquement à partir des composants courants, les bétons auto plaçant ou BAP pour les initiés se caractérisent par une consistance très fluide, homogène et stable, (les BAP se mettent en place tous seul sans vibration), Ils sont très déformables et présente une uniformité une fois mis en place, ils donnent des structures résistantes et durables.

### **I.6.7. Bétons à hautes performances (BHP)**

Un béton hautes performances (BHP) (ou béton à grande résistance) est un béton caractérisé par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 50 MPa à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais (notamment en termes de viscosité), à court ou à long terme. Le béton haut performances est apparu à la fin des années 80, Elle est passée de 30 à 35 MPa, à plus de 100 MPa pour les Bétons à Très Hautes Performances, voire plus de 200 MPa pour les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUP).

## I.6.7.1. Les BHP se caractérisent par

- une résistance caractéristique à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre,
- un rapport E/Liant inférieur à 0,4. Mais les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté. Ces bétons sont, en fait, des matériaux à très haute compacité. Les BHP sont également, du fait de leur porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Ils permettent d'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat rigoureux, agressions marines, effets du gel...).

## I.6.7.2. Leurs principales propriétés sont

- sur béton frais, une maniabilité accrue ;
- sur béton durci :
  - une plus grande résistance aux agents agressifs d'où une meilleure durabilité ;
  - une plus grande résistance à l'abrasion ;
  - une augmentation des caractéristiques mécaniques (compression, Traction, module d'élasticité) tant aux jeunes âges qu'à terme ;
  - une plus grande imperméabilité à l'air et à l'eau, due à une compacité plus élevée
  - une meilleure tenue aux cycles de gel/dégel.

## I.7. Propriétés du béton

Lors du choix des matériaux, du proportionnement et de la mise en œuvre, il est important de connaître les variables qui influent sur la qualité du béton frais et durci.

Toutefois, certains facteurs peuvent avoir un effet positif sur la qualité durci et un effet négatif sur la qualité du béton frais. Par exemple, si on réduit le dosage en eau, on améliore la qualité générale du béton à l'état durci, mais du même temps on réduit la maniabilité de béton à l'état frais. [9]

### I.7.1. A l'état frais

**La**

**maniabilité** : on peut définir la maniabilité d'un béton comme étant sa facilité de mise en place et de consolidation, c'est en quelque sorte un indice de la consistance du béton, plusieurs facteurs agissent sur la maniabilité du béton, les principaux étant :

- les proportions relatives de granulats et de pâte
- la plasticité de la pâte de ciment
- la granulométrie des granulats
- la forme, la texture et l'absorptivité des granulats
- les adjuvants ajoutés au béton

**Ségrégation** : la ségrégation dans un mélange de béton peut être définie comme la séparation de différentes composantes il peut y avoir ségrégation entre les particules de différentes grosseurs ou bien entre les constituants de mélange qui ont des densités relatives différents.

**Ressuage** : dans le béton de ciment, le ressuage consiste une forme de ségrégation par laquelle une partie de l'eau du mélange remonte à la surface du béton fraîchement placé. Le rapport E /C près la surface est plus élevée, ce qui diminue la résistance du béton.

**Consolidation** : le but de la consolidation est d'augmenter la compacité, de réduire la quantité de vide .l'augmentation de la compacité et la diminution de la porosité se traduit par l'amélioration de la résistance mécanique et la durabilité.

**Masse volumique** : la masse volumique n'est pas en soi un indice de la qualité du béton, mais elle est utile pour déterminer le volume d'une masse donnée de béton.

## I.7.2.A L'état durci

Dès qu'on ajoute de l'eau à du ciment s'établit un processus chimique dans la pâte de ciment, ce processus est communément appelé hydratation. La réaction d'hydratation est responsable du durcissement de la pâte, les deux conditions essentielles à la poursuite de l'hydratation de la pâte sont :

- La présence d'humidité
- Une température favorable.

**Résistance mécanique** : on peut définir la résistance mécanique d'un matériau comme étant sa capacité de résister à des forces de différentes natures : compression, traction, flexion, torsion, etc. la résistance correspond à la force unitaire, appelée contrainte, responsable de sa rupture.

**Résistance en compression :** on détermine la résistance à la compression du béton par un essai de compression axiale effectué sur un cylindre, alors la contrainte maximale que pourra supporter le matériau. On le calcule en divisant la force sur la section et on exprime en (MPa).

**Résistance en flexion :** dans un béton armé, la rupture en flexion survient lorsque la contrainte à la fibre tendue de la poutre atteint la résistance à la traction du béton, la résistance à la flexion est du même ordre de grandeur que la résistance à la traction, quoique légèrement plus élevée.

**Résistance en traction :** le béton a une résistance à la traction beaucoup plus faible que la résistance en compression, c'est pour cette raison qu'on utilise fréquemment l'acier d'armature dans le béton.

**Perméabilité :** peut être reliée à la résistance au passage de l'eau, plus un matériau offre de résistance au passage des liquides, moins il est perméable. On peut réduire la perméabilité du béton en diminuant le rapport E /C.

### **I.8. Conclusion :**

La durabilité du béton dépend de sa résistance, qui est, à son tour, liée à la qualité générale du béton et à la qualité de chacun de ses constituants. Les bétons répondent désormais à des usages de plus en plus diversifiés, à des résistances toujours plus importantes dans des milieux de plus en plus agressifs et à des mises en œuvre extrêmes.

Les multiples compositions des bétons, la sélection des composants et de leur dosage, les dispositions adoptées lors du coffrage ou de la mise en œuvre, toutes ces facteurs doivent être étudiés pour arriver à répondre aux performances souhaitées.

**II.1.Introduction**

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'étude bibliographique des bétons à performances très élevées appelés, selon les périodes ou leurs formulations, BPR (Bétons de Poudres Réactives), BFUP (Bétons Fibrés Ultra Performants) ou BUHP (Bétons à Ultra Hautes Performances). Pour notre part, nous retiendrons dans la suite de ce document soit l'appellation BUHP, soit l'appellation BFUP.

Les BFUP présentent des caractéristiques hors du commun et même hors normes. De par la dimension des granulats, ils appartiennent à la famille des bétons de sable (composés de sable, de ciment, d'eau et d'adjuvants) mais des ajouts spécifiques sont aussi exigés (ultrafines, fibres) ou peuvent être envisagés (gravillons). La mise au point et la réalisation d'un BFUP sont devenues de ce fait des opérations plus complexes que celles nécessaires pour un béton ordinaire traditionnel, voir pour un béton à hautes performances. En effet, il s'agit de combiner un nombre plus élevé de matériaux, de tailles très différentes, en limitant au maximum la teneur en eau du mélange. Cette opération nécessite de forts dosages en adjuvants ce qui peut s'accompagner de problèmes de compatibilité entre matériaux (par exemple entre le ciment, l'ultra fine et les adjuvants). [10]

**II.2.Historique sue le BFUHP**

La mise au point des BFUHP s'inscrit dans une démarche d'amélioration du comportement des matériaux de construction entreprise dès le début des années 1970. Les premiers bétons à haute résistance sont mis au point au Danemark avec la technologie **Compact Reinforced Composite** développée par **H.H. Bâche** mais aussi le **Compact Cement Concrete**, un béton très fibré et très armé. Cependant la résistance n'est rapidement plus la seule qualité recherchée.

Afin de garantir la pérennité des ouvrages, 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.). C'est ainsi qu'apparaissent les Bétons Haute Performance (BHP), puis très hautes performance (BTHP) et autres appellations. Ces matériaux se distinguent à chaque fois par leur formulation qui s'inscrit dans un processus d'optimisation tendant à améliorer leurs propriétés mécaniques et chimiques.

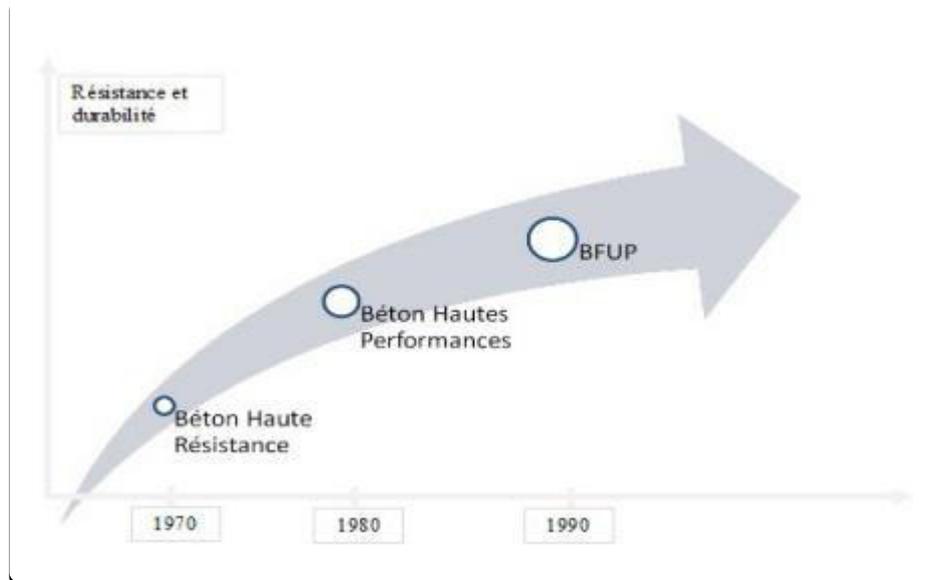


Figure II.1 : image correspond au développement des bétons au cours des années

### II.3. Bétons fibrés ultras hautes performances (BFUHP)

Les BFUHP sont des matériaux à matrice cimentaire, de résistance à la compression supérieure à 150 MPa. Ces matériaux sont additionnés de fibres métalliques (BFUP) en vue d'obtenir un comportement ductile en traction. Ils se caractérisent aussi par leur fort dosage en liant et la sélection particulière dont les granulats font l'objet.

Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUHP), derniers nés de cette génération de bétons, sont des matériaux à matrice cimentaire, renforcés par des fibres. Leurs formulations font appel à des adjuvants superplastifiants et des compositions granulaires spécifiques ainsi qu'à des fibres (fibres métalliques, polymères ou minérales).

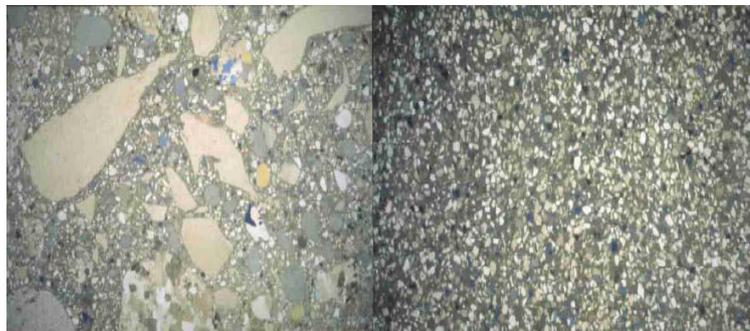
La présence de fibres, les performances en traction et leur comportement ductile permettent de s'affranchir dans certains cas des armatures passives. Ces bétons offrent des performances exceptionnelles :

- 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 (valeur comprise entre 5 et 12 MPa) ;
- de hautes résistances à court terme (24 heures) ;
- 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 (déformabilité sous charge sans rupture fragile) importante ;
- une ténacité (résistance à la microfissuration) élevée ;
- un retrait et un fluage très faible ;
- une dureté de surface très importante ;
- une grande résistance à l'abrasion et aux chocs,
- une faible perméabilité ;
- des aspects de parements particulièrement

Du point de vue de leur formulation, il se caractérise par :

Un rapport E/C très faible  $< 0,2$ . [2]



Béton classique

BFUP

**Figure II.2** : Exemples de béton.

## **II.4. Formulation des BFUHP**

### **II.4.1. Constituants**

La composition des BFUP repose au minimum sur cinq constituants : ciment, fumée de silice, Fibres, eau et superplastifiants. Le rapport eau sur ciment (E/C) varie entre 0,15 et 0,2 avec des dosages en fumée de silice variant entre 20% et 30%.

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

- Le ciment (Quantité de ciment comprise entre 700 et 1000 kg/m<sup>3</sup>),
- Le sable fin (0,063 mm < diamètre max < 2 mm), Granulats de taille réduite et de résistance mécanique élevée,
- La fumée de silice (teneur élevée 20 à 30 % du poids de ciment C),
- Le quartz broyé (diamètre max < 20 µm)
- Les fibres métalliques et non métalliques (synthétiques, carbonées, etc..),
- Le superplastifiants haut réducteur d'eau (dosage 0.5 à 2% du poids de ciment C),
- L'eau (rapport E/Liant inférieur à 0.2).

Dans le tableau qui suit, on voit à titre d'exemple les constituants ainsi leurs quantités recommandées par des sociétés telles que la société française de génie civil (AFGC).

**Tableau II.1** : Exemple de formulation d'un BFUP

Ciment	Sable fin	Quartz broyé	Fumée de silice	Fibres métallique	Adjuvant (Extrait sec)	Eau total
710 Kg	1020 Kg	200Kg	230 Kg	160 Kg	10 Kg	140 l
1075 Kg	1030 Kg		160 Kg	220 Kg	35 Kg	200 l

Les compositions typiques d'un béton ordinaire, d'un béton à hautes performances BHP et d'un Béton ultra hautes performances fibré (BFUHP) sont données dans le tableau II.2) Le BFUHP est un béton à granulométrie fine, avec une sélection optimisée de granulats, un haut taux de ciment et de fines (principalement de la fumée de silice), et un rapport eau/liant bas. De plus, la quantité de super-fluidifiant utilisée dans le BFUHP est plus élevée que celle utilisée dans le béton normal ou à haute résistance.

Tableau II.2 : Compositions et propriétés de quelques bétons

	Composants	BO [Kg/m <sup>3</sup> ]	BHP [9] [Kg/m <sup>3</sup> ]	BFUHP [10-11] [Kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Matrice</b>	Ciment	≤ 400	410	700-1000
	Gravier	≈1000	920	0-200
	Sable	≈700	620	1000-2000
	Fume de silice	/	/	200-300
	Superplastifiants	/	5	10-40
	Eau	≥ 200	100-150	110-200
	Rapport E/C	≥ 0.35	0.28-0.38	≤ 0.24
	Rapport E/L		≤ 0.38	≤ 0.22
	Fibre [Kg/m <sup>3</sup> ]	/	/	≥ 150
<b>Propriétés</b>	Densité [Kg/m <sup>3</sup> ]	2000-2800	2000-2800	≥ 2500
	Résistance à la compression [MPa]	≤ 60	60-100	≥ 150
	Résistance à la traction [MPa]	≤ 3	≤ 5	≥ 8
	Module d'élasticité initial [GPa]	≈30	≤ 45	50-70
	Energie de rupture [J/m <sup>2</sup> ]	30 - 200	< 150	< 90 sans fibres > 10 000 avec fibres

## II.5. Étude sur les constituants des BFUHP

### II.5.1.Introduction

Le BFUP est un mélange de plusieurs composants dont les uns sont actifs et les autres inertes, présente des caractéristiques qui sont en fonction de celles de ces composants. L'étude de ces composants a été scindée en deux parties :

- ✓ **La première partie** : traitement des ciments de leur propriétés de leurs emplois qui différent selon la nature de construction, de leurs conditions de fabrication.
- ✓ **La seconde partie** : traitement des autres composants, c'est-à-dire des ajouts minéraux, des granulats, des adjuvants, des différentes fibres, de l'eau qui doivent également répondre à des critères rigoureux de qualité pour assurer au béton ces caractéristiques exigées en fonction des contraintes appliqués et sa destination.

### II.5.2.le ciment

Le ciment utilisé pour la confection d'un béton BFUP est conforme à la norme NF EN 1971- [AFNOR NF EN 197-1, 2001]. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine. Pour bénéficier pleinement de l'activité pouzzolanique des fines d'addition, on privilégie souvent les ciments sans ajouts (CEM I) par rapport aux ciments avec ajouts (CEM II à CEM V). [11]

#### II.5.2.1.Constitution des ciments

Les ciments sont constitués, par mélange et broyage :

- De clinker, qui est une roche de synthèse élaborée à haute température dans le four à ciment et constituée, au plan chimique, de silicates et d'aluminates de calcium.
  - De gypse (sulfate de calcium  $\text{CaSO}_4$ ), qui joue un rôle de régulateur de prise.
- D'additifs éventuels, qui confèrent au ciment des propriétés particulières. [12]

#### II.5.2.2.Fabrication du ciment

Le ciment Portland est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux  $\text{CaO}$  avec la silice  $\text{SiO}_2$ , l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et l'oxyde de fer  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

La chaux nécessaire est apportée par des roches carbonatées ; l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Calcaires et argiles sont extraits de carrières, puis concassés, homogénéisés, cuits à haute température, trempés et enfin broyés. Un cru de ciment étant

composé de 80% de carbonate de calcium et 20% de silice, d'alumine et de fer, les carrières cimentières sont d'abord des carrières calcaires et des carrières d'argiles. Les cimentiers sont souvent amenés à faire des mélanges de différentes parties de la carrière, voire de différents matériaux provenant de plusieurs carrières afin d'obtenir un cru de composition convenable (dosage en calcaire, silice, alumine et oxyde de fer) à la fabrication du ciment. Le calcaire, l'argile concassés et plus éventuellement des cendres de pyrite ou de la bauxite pour ajuster le dosage en fer, sont dosés, broyés et mélangés de façon intime. (Figure II.3)

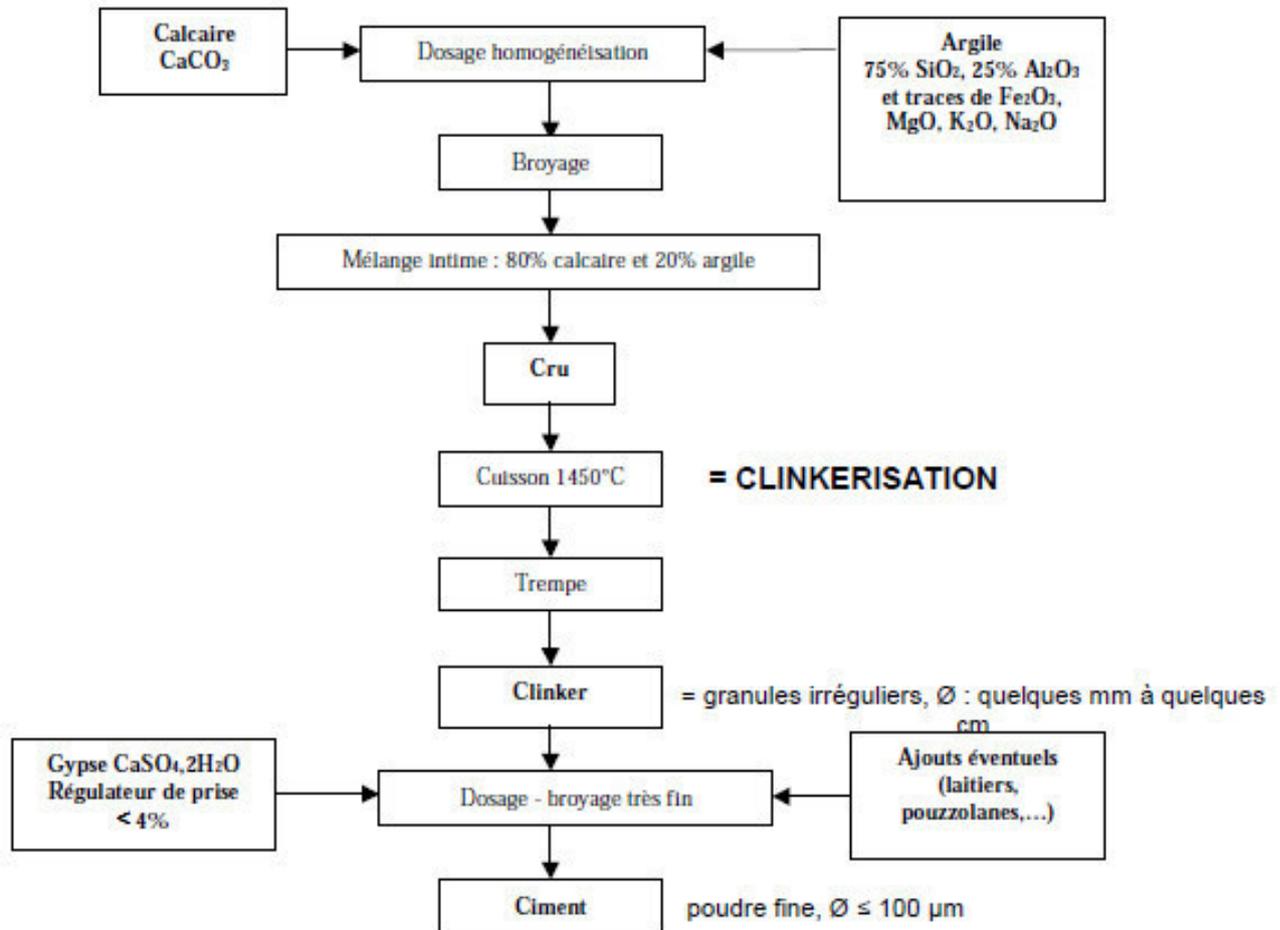


Figure II.3 : schéma de fabrication du ciment

### II.5.3.Sable fin

Dans la formulation des BFUP, le sable est choisi pour sa composition minérale (teneur en  $\text{SiO}_2 > 98\%$ ), la taille moyenne de ses grains (généralement entre 400 et 600  $\mu\text{m}$ ) et leur forme (forme arrondie). Ce doit être un matériau de grande dureté qui permet d'obtenir d'excellentes interfaces pâtes/granulats. La forme des grains arrondie présente une absorption d'eau faible et favorise la rhéologie du béton. Dans la pratique actuelle, il est plus prudent de

se borner à l'utilisation de sable dont 12 % de fines sont inférieurs à 0,08 mm tels qu'on peut les employer pour des formules de béton classique [AFNOR NF EN 12620, 2003],.

Ainsi, le sable de plage (lavé pour éviter les ions Chlore) et le sable de dune, de nature siliceuse et dont la taille des grains est comprise entre 0,063 et 2 mm, semblent parfaitement adaptés à la fabrication des BFUP.

### **II.5.3.1.Origine des sables**

Les sables rencontrés sont le résultat d'une décomposition chimique ou d'une désintégration mécanique des roches suivies par un processus de transport qui est à l'origine de leurs caractéristiques physico-chimiques, les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation. Ils comportent, à des degrés divers une décomposition sur place des différentes roches, suivie d'un transport fluviatile et parfois éolien.

### **II.5.3.2.Différents types de sable**

#### ➤ **sables non alluvionnaires (sable de dune) :**

Il s'agit essentiellement de sables anciens, c'est-à-dire de dépôts détritiques déposés à des périodes géologiques variées, à des distances plus ou moins grandes des rivages. En fonction des conditions paléogéographiques, ces dépôts ont été plus ou moins brassés par les courants et recouverts par d'autres formations sédimentaires et se retrouvent actuellement émergés sur des étendues variables et des épaisseurs également très diverses. De façon générale, ces dépôts constituent cependant des gisements beaucoup plus étendus et généralement plus épais que les dépôts alluviaux. La plupart de ces sables ont actuellement des utilisations soit limitées (essentiellement remblais et couches de forme, parfois granulats pour couche de fondation), soit très spécialisées (sables de verrerie et de fonderie, bétons de type cellulaire).

#### ➤ **Sable d'origine artificielle :**

Provient de concassage des roche naturelles comme le calcaire, ou artificielle (pouzzolane); dit aussi sable concassés, caractérisées par une meilleure adhérence agrégat/liant. Ce sont des matériaux produits dans une chaîne d'élaboration de granulats, et qui peuvent se trouver en excédent pour la production recherchée (gravier ou gravillon), ils peuvent être soit :

- Des sables roulés de dessablage qui résultent du criblage primaire d'un tout-venant.
- Des sables de concassage qui sont très souvent l'excédent de la production d'une carrière ou d'une ballastière caractérisées par une meilleure adhérence agrégat/liant. [13]

### II.5.3.3. Caractérisation du sable

#### A) Essai d'équivalent de sable :

Dans le cas des sables cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une solution flocculant. Après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes. Ensuite, on mesure la hauteur, dans l'éprouvette normalisée, du sédiment h1, et du sédiment + flocculat h2. Le résultat :

$$ES = (h1/h2) \times 100$$

La limite entre le sable brut et l'argile est maintenant visible. Il est possible de mesurer à l'œil et au réglé, la hauteur de sable total et la hauteur de sable brut pour en déterminer la proportion. Il est aussi possible de prendre cette mesure à l'aide d'un piston normalisé qui traverse la couche d'argile pour se poser sur le sable brut. La hauteur totale du sable se mesure comme précédemment.

**Tableau II.3 :** valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par Dreux

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



L'ESV



L'ESP

**Figure II.4 :** mesure de l'équivalent de sable

### II.5.4.Fumée de silice

Toutes les additions, de finesse supérieure à celle des ciments, peuvent être utilisées en substitution des ciments. Néanmoins, les additions généralement considérées comme étant les plus efficaces vis-à-vis des résistances mécaniques, comme la fumée de silice.

La fumée de silice est conforme à la norme NF EN 13263-1 [AFNOR NF EN 13263-1, 2005]. C'est une ultra fine, composée de particules sphériques de dioxyde de silicium amorphe, de diamètre moyen de l'ordre de 0,1  $\mu\text{m}$  et de très grande surface spécifique, et hautement pouzzolaniques. Il s'agit d'un coproduit, recueilli sur des filtres, du processus de fusion permettant de produire du silicium métal et des alliages de Ferro silicium. Ses caractéristiques générales sont présentées dans le Tableau (II.5)

**Tableau II.4 :** Caractéristiques générales de la fumée de silice.

Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2200
Surface spécifique (m <sup>2</sup> /kg)	entre 12000 et 20000
% SiO <sub>2</sub>	> 85
Dimension des grains ( $\mu\text{m}$ )	entre 0,03 et 0,3

La fumée de silice est un coproduit industriel assez cher et peu disponible. Elle peut être remplacée par d'autres particules fines et ultrafines telles que les roches micronisées (quartz, calcite, diatomite, etc.), la fumée de titane, les cendres volantes, les laitiers de haut fourneau et le méta kaolins. Toutefois, l'utilisation actuelle de ces particules dans la formulation des BFUP demeure marginale. [11]

### II.5.5.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.

### II.5.6. Les fibres

Les fibres sont un obstacle à la formation et la propagation des fissures qui causent l'endommagement de la structure. Les fibres s'ajoutent donc aux bétons en vue d'obtenir un comportement ductile en traction et de s'affranchir si possible de l'emploi d'armatures passives.

Lors d'un traitement thermique à haute température, les BFUP renfermant un certain pourcentage de fibres atteignent des contraintes de compression maximales car les fibres agissent sur la microfissuration induite par les forts gradients thermiques et les changements minéralogiques.

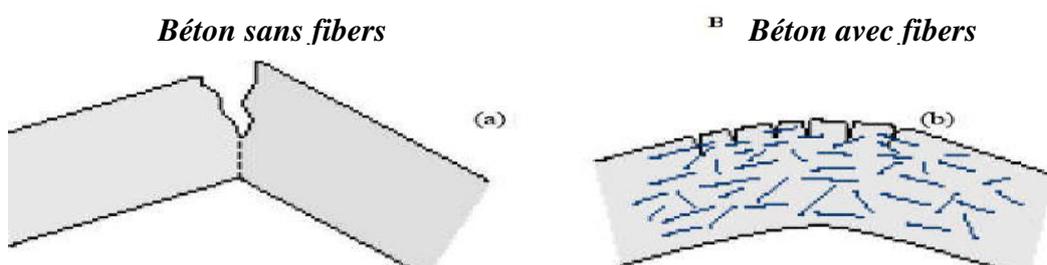
Le pourcentage incorporable des fibres dans les BUHP est limité par des critères de maniabilité.

#### II.5.6.1. Rôles des fibres dans le béton

Au début, les chercheurs ont essayé par l'addition de fibres dans le béton d'augmenter ses caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression ou la résistance à la flexion. Le but est uniquement une résistance très élevée du béton.

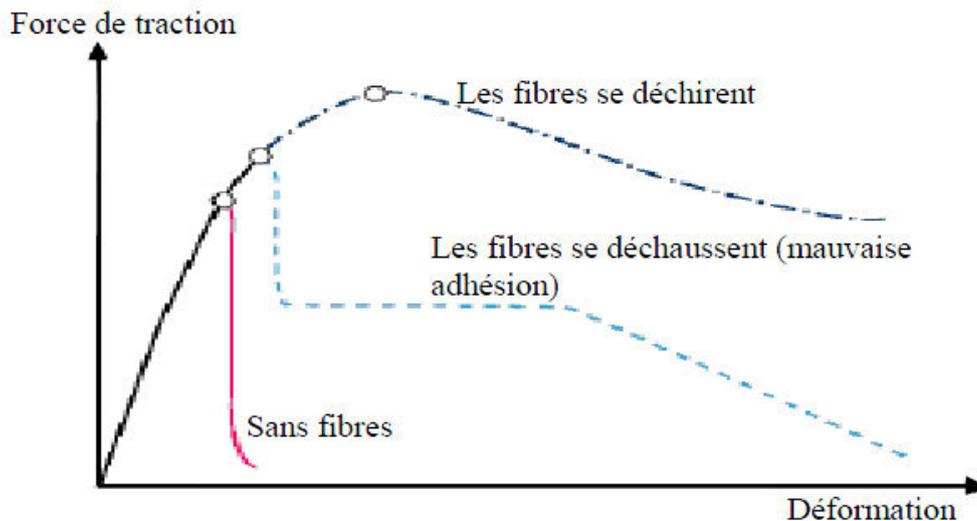
Ceci nous laisse constater que le rôle principal des fibres dans un matériau peut-être lié à deux points essentiels :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme il est indiqué dans la figure (II.5) ci-dessous.



**Figure II.5 : Rôles des fibres dans le béton**

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



**Figure II.6 :** comportement de charge-déformation de béton avec fibres et béton sans fibres

En effet, il est maintenant bien connu que toute matrice cimentaire présente des zones internes de faiblesse. Ces zones sont caractérisées soit par des micro-fissures qui sont dues à différentes causes (retrait, contraintes thermiques, contraintes appliquées à jeune âge...etc.) soit par une forte porosité.

On peut dire que les fibres jouent un rôle qui peut alors s'apparenter à celui des aciers passifs dans une structure en béton armé. Ceci peut être justifié par les études qui ont été mené, aussi bien sur les aspects expérimentaux, En résumé qui' il est nécessaire de dire que les fibres assurent le rôle principal de modifier la répartition des fissures, de les couvrir, par conséquent de rendre le matériau moins fragile et donc plus ductile. [14]

### II.5.6.2. Différent types de fibres

Il existe sur le marché diverses catégories de fibres pouvant être incorporées au béton. Voici les quatre classes de fibres existantes :

- synthétique (acrylique, aramide, carbone, nylon, polyester, polyéthylène et polypropylène)
- naturelle (bagasse, noix de coco, jute, maguey, alpha, banane, palmier et bambou)
- métallique (inoxydable, galvanisé, fil étiré à froid, tôle découpée, extrusion de matière fondue)
- verre (sodocalcique, borosilicaté).

### II.5.6.3. Proportion des constituants

Comparativement au béton traditionnel, le béton fibré peut nécessiter un ajustement des proportions de ses constituants. Cette procédure peut être nécessaire pour faciliter

l'homogénéisation et la maniabilité du béton. Les principales caractéristiques de la composition du béton fibré peuvent être ajustées selon la concentration et le type de fibres utilisés.

Les principaux constituants ou caractéristiques qui peuvent être affectés sont :

- une augmentation de la quantité de granulats fins ;
- une augmentation de la quantité de liant ;
- un ajustement de la distribution granulométrique globale ;
- un ajustement de la maniabilité proportionnellement au contenu en fibres ;
- un ajustement de la teneur en air.

Il est à noter qu'une combinaison adéquate de granulats fins et grossiers permet d'aider à optimiser l'homogénéité de la distribution des fibres dans le béton et facilite l'obtention d'un affaissement permettant une mise en place adéquate du béton fibré. [15]

#### **II.5.6.4. Influence des fibres sur la mise en œuvre des BFUHP**

Lorsque l'on met en œuvre un BFUP dont la formulation a été optimisée, il est important de tenir compte de certaines spécificités liées à la technologie de mise en œuvre et au type de structure.

Ces spécificités peuvent se décliner de la manière suivante :

- L'orientation préférentielle des fibres.
- Les effets de voûte ou d'écran.
- Les effets de cheminée.
- La ségrégation des fibres.
- L'appauvrissement en fibres.
- La relation entre la forme de la fibre et la maniabilité du BFUP.

- **Effets liés à l'écoulement du BFUP**

Dans le cas où le BFUP peut s'écouler à l'intérieur du coffrage soit par gravité, soit sous l'effet d'une vibration, les fibres ont tendance à s'orienter parallèlement aux lignes de courant de l'écoulement du fluide visqueux que constitue le béton. Cette tendance augmente lorsque le rapport distance d'écoulement / longueur de la fibre augmente.

Les effets de paroi sont une conséquence de cette orientation des fibres. En effet, lorsqu'un BFUP s'écoule le long d'une paroi, les lignes de courant sont parallèles à la surface de la paroi, donc les fibres s'orientent également parallèlement à cette surface.

➤ **Ségrégation des fibres**

Ce phénomène de ségrégation apparaît lorsqu'on utilise un BFUP très fluide pour élément structurel de hauteur importante (colonne ou poutre de grande hauteur). Il a la même origine

### **II.5.7.Adjuvants**

#### **A. Adjuvants modificateurs de la rhéologie du béton**

- **Plastifiants - Réducteurs d'eau**

Ce sont des produits qui, sans modifier la consistance, permettent de réduire la teneur en eau du béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmentent l'affaissement (ou l'étalement), ou qui produisent les deux effets à la fois.

- **superplastifiants - Haut réducteurs d'eau**

Ce sont des produits qui, sans modifier la consistance, permettent de réduire fortement la teneur en eau du béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmentent considérablement l'affaissement (ou l'étalement), ou qui produisent les deux effets à la fois.[11]

### **II.5.8.Eau de gâchage**

Pratiquement, toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton. Cependant, certaines eaux non potables peuvent convenir.

## **II.6.Caractéristiques des BFUHP**

Les BFUHP ne font pas l'objet de normes spécifiques et ce que l'on sait d'eux n'est principalement tiré que de l'expérience.

### **II.6.1.Caractéristiques à l'état frais**

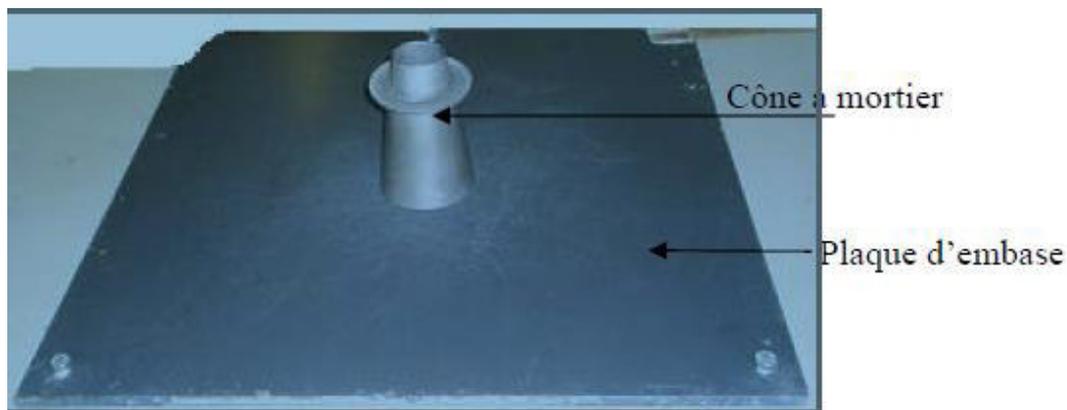
Lors de la fabrication, la caractérisation des BFUHP est nécessaire. Cela consiste à connaître leur comportement à l'état frais à partir de tests simples et reproductibles. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier rapidement la fluidité du matériau.

#### **II.6.1.1.Essai d'étalement**

Les BFUP sont généralement auto-plaçant. 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'Abram) selon les recommandations de l'Association Française de Génie Civil, (Figure II.7). 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 auto-plaçant).



**Figure II.7** : Essai d'étalement au cône à mortier.

### **III.6.1.2. Mesure de la masse volumique à l'état frais**

Cette mesure détermine le rendement volumique de la composition de béton frais et permet de vérifier la validité de la formulation théorique.

Pour effectuer cette mesure, on utilise un récipient de volume et de masse connus. Ce récipient est rempli entièrement de béton et sa surface libre est ensuite arasée. On pèse alors le récipient plein. Le rapport entre la masse de béton (masse du récipient plein à laquelle on soustrait la masse du récipient vide) sur le volume du récipient correspond à la masse volumique du béton frais exprimée en kg/m<sup>3</sup>.

## **II.6.2. Caractéristiques instantanées à l'état durci**

### **II.6.2.1. Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité**

Les modes opératoires des déterminations de la masse volumique apparente et de la porosité suivent la recommandation de l'AFGC.

**A) Expression des résultats :**

La masse volumique apparente  $\rho_d$ , exprimée en g/cm<sup>3</sup>, est déterminée par l'intermédiaire de la relation suivante :

$$\rho_d = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}}$$

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

$$\emptyset = \frac{V_{vide}}{V_{total}}$$

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

$$\rho = \frac{m}{v} \Rightarrow v = \frac{m}{\rho}$$

Avec :

$m$  : la masse de l'eau, elle est calculée par la formule  $M_h - M_s$

$M_h$  : la masse humide

$M_s$  : la masse sèche

**II.6.2.2. Propriétés mécaniques****A) Résistance mécanique :**

Sur le plan mécanique, non seulement les BFUP sont très résistants en compression mais surtout leur comportement en traction et en flexion est beaucoup plus ductile. Ce comportement dépend de la quantité, de la longueur et de la qualité des fibres utilisées (métalliques ou organiques) dans la composition du BFUP. Les fibres permettent en effet le pontage des fissures du béton donc la transmission des efforts. Elles évitent la fragilité en traction que l'on rencontre avec les bétons standards voire avec les BHP et BTHP. Ce comportement en traction et en flexion permet de dimensionner des éléments de structures sans acier passif. Il affranchit des contraintes liées à ces aciers et permet des structures de formes plus libres. Toutefois, chaque BFUP ayant un comportement particulier, il convient de le caractériser pour chaque

application. Notamment, l'interaction de la mise en œuvre avec la forme des pièces peut conduire à des répartitions non homogènes des fibres. [15]

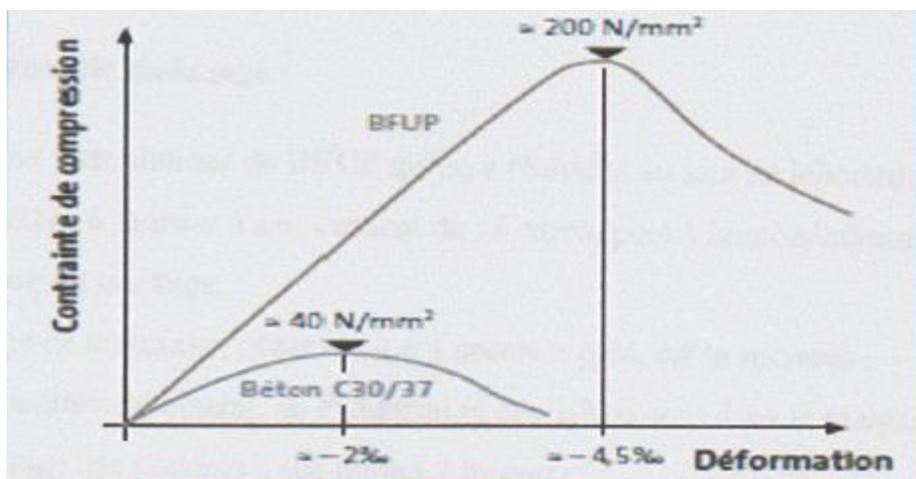
### B) Résistance à la compression et à la flexion sur éprouvettes 40X40X160 mm :

- Le comportement des BFUP en compression se résume en trois phases qui sont les trois parties indissociables du diagramme effort-déformation :

Dans une première phase de chargement des microfissures diffusent aléatoirement au sein de l'éprouvettes avec une orientation préférentielles parallèle à la contrainte sollicitée l'aspect aléatoire de la fissuration est lie à la nature des matériaux et a l'existence de points faibles et de point durs en son sein.

- Une seconde phase au cours de laquelle les microfissures vont se connecter pour créer une ou plusieurs micro-fissures c'est la phase de la localisation de la fissuration cette création des micro-fissures constitue la fin de cette second phase.
- Enfin dans une dernière phase qui correspond à la propagation d'une ou plusieurs macros-fissures conduisant à la rupture de l'éprouvette.

Autrement dit les se BFUP se comportent pratiquement d'une façon linéaire jusqu'à la contrainte maximale les fibres permettent ensuite d'éviter une rupture fragile.



**Figure II.8 :** comportement en compression d'un BFUP

Durant notre étude, les essais en flexion et à la compression ont été réalisés en flexion simple (3points) et en compression uni axial sur des éprouvettes prismatiques 40X40X160 mm conformément à la norme NF EN 12390-5.

**II.6.2.3. Traitement thermique**

Le BFUP fait l'objet de traitement thermique qui consiste à porter les éléments à une température de 90°C plusieurs heures après la prise du béton. Les principaux effets de ces traitements sont les suivants :

- Atteinte plus rapide des résistances en compression et en traction.
- Diminution importante des effets différés de retrait et de fluage une fois le traitement thermique terminé.
- Amélioration très sensible des propriétés de durabilité.
- La résistance à la compression et la résistance en traction après traitement thermique sont supérieures d'environ 10% à la résistance à 28j avec conservation sous eau.
- Après ce processus, les éléments ont atteint leur maturité finale et peuvent donc être utilisés comme tels sans attendre 28j ou plus comme pour les bétons traditionnels. [16]

**II.7. Comportement au feu**

En cas d'incendie, la montée en température du béton décompose les hydrates et libère de l'eau sous forme de vapeur. La perméabilité des BFUP étant très faible, cette vapeur d'eau s'échappe difficilement et génère des pressions internes importantes pouvant conduire à l'écaillage du béton. Toutefois, l'ajout de 2 à 3 kg de fibres de polypropylène monofilaments, qui fondent vers 160 °C, par mètre cube de béton, permet de créer, lors de la montée en température, un réseau poreux qui diminue les pressions. Les essais de BFUP incluant ces fibres ont montré un comportement satisfaisant. [17]

**II.8. Domaines d'applications des BFUHP**

Les nombreuses qualités des BFUP, permettent d'envisager une multitude d'applications aussi bien en structure de génie civil (poutres précontraintes par pré ou post tension, canalisations, conteneurs, ouvrages offshore, couvertures de grande portée, silos, réservoirs, cuves de rétention, tours de refroidissement murs de soutènement, dalles, structures triangulées, vousoirs de tunnels, etc.) qu'en bâtiment (poutres, poteaux élancés, planchers de grande portée, etc.) et leur utilisation dans des applications innovantes jusque-là inaccessibles au matériau béton et réservées à d'autres matériaux. En règle générale les BFUP à base de fibres métalliques sont destinées à des applications structurelles, ceux à base de fibres organiques à

des applications architectoniques (éléments architecturaux, panneaux de façade, corniches, parements d'ouvrage, lames pare-soleil, mobiliers urbains, panneaux acoustiques, sculptures, etc.). Les BFUP sont utilisés aussi bien par l'industrie du béton pour constituer des produits préfabriqués que directement sur chantier. Ils sont en général autoplaçants et parfaitement pompables. On peut définir les domaines d'applications en fonction des caractéristiques du matériau principalement valorisées : résistances (mécaniques, à l'abrasion, au choc, etc.), durabilité (porosité nulle, compacité élevée, etc.), esthétique et flexibilité des formes.

✚ **Exemple d'application :**



**Figure II.9 :** Passerelle de Seonyu, Séoul, Corée du sud, réalisation en Ductal® (Architecte : Ricciotti Rudy –Photographe : Rouault Philippe – Source : Médiathèque Lafarge).

## II.9 .Conclusion

Les BFUHP s'avèrent être des matériaux de hautes performances grâce à l'emploi d'adjuvants qui réduisent la quantité d'eau, et d'ultra fines comme la fumée de silice qui améliorent la compacité. De plus, l'ajout des fibres dans leur fabrication les rend très ductiles et très résistants à la traction. Leurs propriétés mécaniques obtenues sont ainsi très élevées :

- résistance à la compression de 150 à 200 MPa pour les BFUP réalisés sans pressage et avec un traitement thermique ne dépassant pas 100 °C ; jusqu'à 800 MPa pour les BUHP réalisés avec un pressage et traités thermiquement à 250°C ;
- résistance à la flexion de 30 à 60 MPa en fonction de la nature et de la proportion de fibres.

### III. La valorisation des déchets

La valorisation des déchets ou revalorisation est un ensemble de procédés par lesquels on transforme un déchet matériel ou organique dans l'objectif d'un usage spécifique comme le recyclage, le compostage ou encore la transformation en énergie : dans ce deuxième cas, on parle de valorisation énergétique. La valorisation des déchets peut être considérée comme une solution préférable à la mise en décharge. Dans la Loi sur la Transition Énergétique votée en mai 2015, le gouvernement appelle ainsi à favoriser la production d'énergie issue de la valorisation des déchets lorsqu'ils ne sont pas recyclables [18]

On peut distinguer deux grandes familles de valorisation :

- La valorisation matière qui consiste à recycler le produit
- La valorisation énergétique qui permet de dégager de l'énergie (chaleur, électricité) d'un déchet.
- La valorisation des déchets verts
- La valorisation des déchets ménagers

La valorisation des déchets plastiques il va permettre de fabriquer d'autres bouteilles ou bidons en plastique, ou d'autres matières comme des laines polaires par exemple.[19]

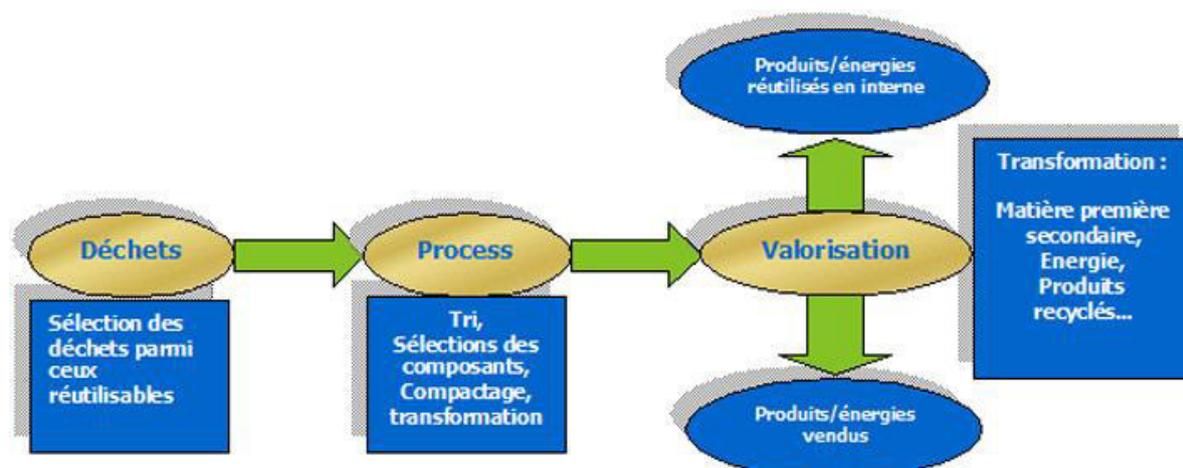


Figure III.1 : comment marche la valorisation des déchets

**III.1. Pourquoi valoriser les déchets ?****➤ Réaliser une plus-value grâce à vos déchets :**

Vos déchets sont exploitables, grâce à la valorisation vous bénéficiez d'une source de revenu supplémentaire en les commercialisant ou en vendant vos rebuts transformés en énergie et réduisez vos postes de coûts.

**➤ Donner une 2ème vie à vos déchets :**

Plus rien n'est gâché, vos déchets sont réemployés pour vos besoins (extraction de la matière première du déchet afin de la réutiliser dans le processus de production, recyclage afin de recréer un produit...)

**➤ S'en servir comme source d'énergie :**

Au regard de la pénurie constante des matières premières énergétiques (gaz, pétrole,...) il est nécessaire de trouver des sources d'énergie alternative, vos déchets sont exploitables pour la production d'électricité et de chaleur.

**III.2. Valorisation des déchets en Algérie**

La récupération des déchets en Algérie est une importante opportunité à saisir vis à vis L'environnement, les déchets ménagers représentent environ 13,5 millions de tonnes/an, soit Un kilogramme par habitant par jour, dont près de la moitié peut être récupérée. Environ 45% de ces déchets, soit 6,1 millions de tonnes sont recyclables. Parmi ces 6,1 millions de tonnes, il y a 1,8 million de tonnes de papiers, 1,22 millions de tonnes de plastiques, 1,6 millions de tonnes de textiles et 300.000 tonnes de métaux. Ceux-ci pour une valeur approximative de 23 milliards de DA. C'est un véritable gisement. Or, il n'existe que 247 micro-entreprises qui opèrent dans la récupération des déchets et qui ne valorisent à peine que 5 ou 6% de ce potentiel dont une partie est exportée. L'Etat mise beaucoup sur le développement d'une industrie de récupération et de recyclage. Elle est au cœur même du programme national de gestion des déchets municipaux (PROGDEM), qui constitue le principal cadre de référence en termes de gestion et de valorisation des déchets ménagers. Il existe deux (02) types de filières :

- Classiques (plastiques, papiers, métaux, textiles, verres, bois et matières organiques) et
- 4Complexes (pneus usagés, huiles usagées, piles et batteries et autres déchets d'équipements électriques et électroniques).

**III.2.1. Des métiers de l'environnement à apprendre**

La chaîne de valeur de ces filières comporte quatre niveaux à savoir, les études d'ingénierie, la logistique et transfert, le traitement et la valorisation, et enfin l'élimination.

Les quatre niveaux nécessitent une expertise pour laquelle l'Algérie cumule d'immenses retards. Le développement durable pour lequel l'Algérie a pris des engagements internationaux favorise l'émergence de filières très porteuses (énergies renouvelables, la gestion des déchets ménagers, spéciaux ou des eaux usées, et les bâtiments à faible impact énergétique). Le programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique est ambitieux. Il prévoit une production électrique d'origine renouvelable (photovoltaïque, notamment) de 22.000 MW à l'horizon 2030 (5 MW actuellement). De même qu'on vise le recyclage de 70% des déchets (5% actuellement) en 2020, et à promouvoir la réutilisation des eaux épurées, mais il est nécessaire de réorienter la formation vers les métiers qui sont nécessaires au développement de telles filières. Ces filières nécessitent une expertise qui n'est pas disponible en Algérie.

Elle est importée d'Allemagne, de France et de Suisse. Tout est à faire dans ce domaine (Expertise et ingénierie des déchets spéciaux, gestion des stations d'épuration, traitement des eaux usées, en irrigation, système de traçabilité, management environnemental, qualité de L'air, transport) car, ce qui est constaté que les capacités actuelles du pays ne lui permettent pas de tenir ses engagements internationaux.

**III.2.2. La part de responsabilité des industriels**

Il convient de signaler que l'Algérie dispose de 16 centres de tri opérationnels, 16 autres sont en travaux ou en phase d'études, et 5 en voie de lancement. Des investissements ont été également engagés pour la réalisation de 48 déchetteries dont 13 sont désormais en exploitation, 9 en travaux, 8 en phase d'études et 11 en instance de lancement (choix de sites). Par ailleurs, selon la réglementation en vigueur, tout producteur de déchets est tenu d'en assurer l'élimination dans des conditions à éviter les effets préjudiciables pour l'environnement, à faciliter la récupération des matériaux, le recyclage des matières ou la valorisation énergétique. Aucune étude n'a été engagée pour quantifier les déchets industriels. L'état a pris à sa charge l'élimination des déchets produits avant la promulgation de la nouvelle loi et ce, dans le cadre d'un plan national de gestion des déchets spéciaux (mercure, cyanures). Désormais, les industriels sont tenus de le faire par leurs propres moyens. Des contrats de performances ont été signés avec eux et ils avaient le temps nécessaire pour s'y préparer.

### III.2.3. Les déchets inertes

Il est utile de préciser que les déchets sont classés en trois catégories : les déchets dangereux, non dangereux et inertes.

Pour être inerte, le déchet doit notamment être exempt de plastiques, plâtres, bois, amiante... Une formation du personnel affecté à la réception des matériaux doit donc être effectuée afin que la gestion du centre de tri et/ou recyclage soit conforme à la réglementation.



**Figure III.2** : Les déchets inertes

#### III.2.3.1. Matériaux autorisés

- Les matériaux stériles issus du site d'extraction.
- Les matériaux de type argileux (si l'arrêté l'autorise).
- Les matériaux naturels, sables, graviers, blocs rocheux, résultant des travaux publics tels que le terrassement et n'ayant pas fait l'objet d'une quelconque contamination au cours de ces travaux.
- Les déchets triés issus du secteur du bâtiment (construction, démolition et réhabilitation), tels que : mortier, béton, béton cellulaire, rebus de ciment, briques (sauf briques réfractaires), tuiles, pierres, blocs, céramiques, carrelages, sanitaires, gravats, verre, déchets de minéraux.

Ces matériaux ne doivent pas contenir de plâtre et ne doivent pas avoir été contaminés par une quelconque activité.

#### III.2.3.2. Matériaux interdits

- Les matériaux provenant d'une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE) sauf s'ils ont fait l'objet d'une autorisation spécifique.

- Les terres suspectes ou considérées polluées lors de leur réception sur site.
- Les déchets industriels spéciaux et les déchets dangereux, comme par exemple les sous-produits générés par les activités de la métallurgie.
- Les briques réfractaires.
- Les déchets industriels banals.
- Les matériaux solubles tels que les plâtres.
- Les enrobés et produits bitumineux, goudrons, asphalte, y compris ceux résultant du démantèlement d'une chaussée de route
- Les déchets non refroidis.

### **III.2.3.3. Le recyclage**

Il existe trois filières de valorisation pour les matériaux inertes : un réemploi direct sur les chantiers, un acheminement vers des plateformes de recyclage et une utilisation en remblais pour le réaménagement des carrières. Concernant le recyclage des matériaux proprement dit, l'avenir passera par la réutilisation des matériaux recyclés dans le béton : il s'agira alors de granulats recyclés dont les caractéristiques seront équivalentes aux granulats naturels (alluvionnaires ou roches massives) ; à ce titre les granulats recyclés seront marqués CE. Cette substitution participe donc à l'économie des ressources naturelles et à la réduction de notre empreinte carbone. En effet, au même titre que les carrières, les installations de recyclage et/ou de stockage de matériaux inertes sont soumises à de nombreuses lois qui aboutissent à des déclarations ou autorisations. Ensuite, pendant la vie du site, chaque matériau inerte reçu doit avoir son bordereau de suivi au même titre que tous les déchets



**Figure III.3** : recyclage

### III.3. Généralités

Au niveau étymologique le terme réfractaire vient du latin réfractaire, réfrigéré, qui veut dire briser, résister, refuser de se soumettre en particulier un matériau réfractaire est un matériau qui "refuse de se soumettre" à haute température. À un niveau plus scientifique, un matériau réfractaire est une substance ou mélange de substances qui a une température de fusion supérieure à 1500°C, ou encore une matière autre que les métaux et les alliages, dont la résistance pyroscopique est équivalente à 1500°C au minimum, ce qui en d'autres termes veut dire que le matériau ne doit ni se ramollir, ni s'affaisser sous son propre poids avant d'atteindre 1500°C.

Selon la classification que fait J. Poirier dans son ouvrage, les matériaux réfractaires peuvent être classifiés selon différents modes : nature chimique et minéralogique (acides, basiques), poids et compacité (légers et isolant avec porosité > 45%vol ou denses), forme (façonnés ou non façonnés), technologie de fabrication (électro-fusion, frittage, réaction chimique).

#### III.3.1. Définitions des matériaux réfractaires

Un matériau réfractaire est un produit qui conserve ses caractéristiques physico-chimiques Jusqu'à des valeurs élevées de température, La norme ISO 1927 de 1984 ne stipule que «les matériaux réfractaires sont des matières et produits autres que les métaux et alliages (sans que soient exclus ceux contenant un constituant métallique), dont la résistance pyroscopique est équivalente à 1500°C au minimum ». Cette résistance représentée par cône pyroscopique. [20]

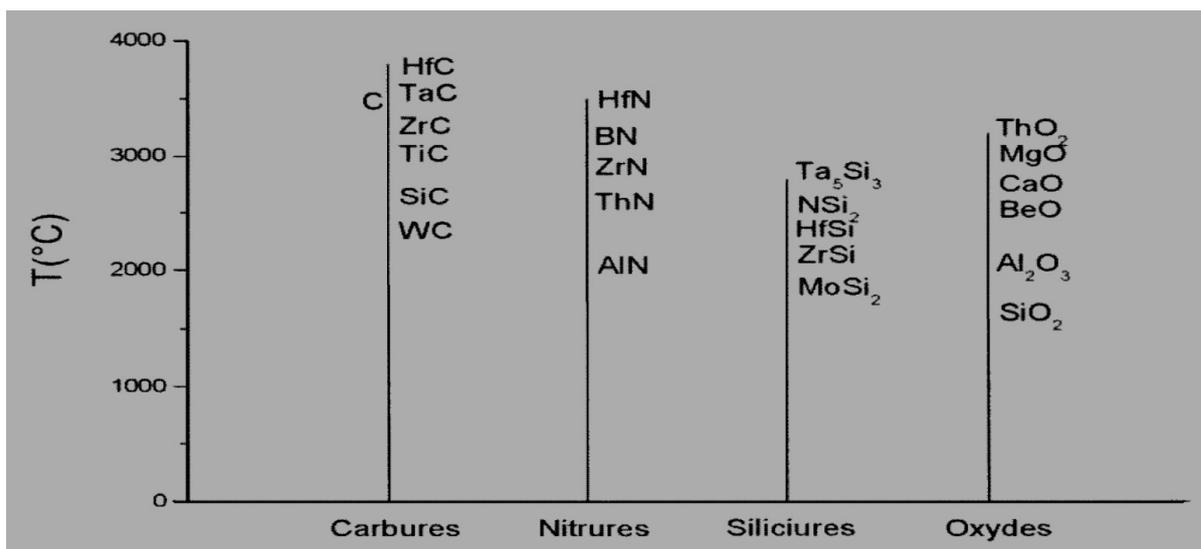


Figure III.4 : Températures de fusion des composés réfractaires

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

#### **III .4.1. Réfractaires façonnés**

Les matériaux façonnés qui sont livrés sous forme de briques, tuiles et pièces de forme leur consolidation a lieu par frittage (ou cuisson), par réaction chimique ou par solidification chimique.

Ce sont les plus connus, ils sont fabriqués surtout en briques et en blocs, souvent cuites, c'est le cas des briques silico-alumineuses ou de silice, mais aussi non cuites, simplement agglomérés à faible température (150°C à 800°C) par liaison chimique et traitement thermique, c'est le cas des briques de magnésie. Leur porosité totale (ouverte et fermée) doit être inférieure à 45 %.

La mise en forme a lieu :

- Par moulage en pâte plastique (porosité totale des produits 18 à 35 %),
- Par surcompression à sec d'un mélange pulvérulent (porosité 12 à 25 %),
- Ou dans certains cas par coulage en "barbotine" dans un moule en plâtre démontable. Les produits surcomprimés à sec sont moins poreux, de dimensions plus précises, et de meilleure résistance aux chocs thermiques.

#### **III.4.2. Réfractaires non façonnés ou monolithiques**

Les matériaux non façonnés (ou monolithiques) qui sont livrés en vrac pour être moulés ou appliqués sur place comme les bétons réfractaires.

On peut citer un de ce type des réfractaire non façonnés qui est les mortiers et les bétons réfractaires.

Les réfractaires non façonnées ou monolithiques, qui nécessitent une cuisson avant mise en service sont :

- \_ Les bétons mis en œuvre par coulage-vibrage ou auto coulage ;
- \_ Les pise´s mis en œuvre par vibrage ou damage.
- \_ Les masses plastiques mises en œuvre par damage.
- \_ Les produits de gunitage mis en œuvre par projection.
- \_ Les produits de jointoiement pour briquetage.
- \_ Les enduits.
- \_ Les produits de réparation.
- \_ Les isolants en nappes ou en vrac. [21]

### III.5. Différents critères de classification

On distingue les réfractaires en fonction de :

- **Leur usage**, réfractaires structurels et réfractaires fonctionnels.
- **leur forme**, réfractaires façonnées et réfractaires non façonnées.

Une autre classification, couramment utilisée, prend en compte le milieu et considère :

- **La nature chimique des principaux constituants**, ce qui conduit à distinguer :
  - les réfractaires à base d'oxydes, utilisés en présence d'air.
  - les réfractaires à base de non-oxydes, utilisés en milieu réducteur.

Il est possible aussi d'établir une distinction entre les différents réfractaires en se fondant sur :

- **La nature du liant** qui assure la cohésion des produits, ce qui permet de distinguer :
  - les réfractaires à liant hydraulique.
  - les réfractaires à liant chimique.
  - les réfractaires à liant céramique.
  - les réfractaires à liant organique.

Enfin, les réfractaires peuvent être définis par :

#### III.5.1. Réfractaires à base d'oxydes

Un très petit nombre d'oxydes sont utilisés pour la fabrication des réfractaires. Citons :

- la silice  $\text{SiO}_2$ .
- l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- la chromite  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .
- la magnésie  $\text{MgO}$ .
- la chaux  $\text{CaO}$ .
- la zircone  $\text{ZrO}_2$ .

#### III.5.2. Réfractaires à base de non-oxydes

En pratique, le corps principal des réfractaires à base de non oxydes est constitué d'un petit nombre de composants. Ce sont principalement :

- le graphite, forme cristallisée du carbone.
- les goudrons et brais, formes amorphes du carbone.
- le carbure de silicium  $\text{SiC}$ .
- le nitrure de silicium  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .
- les oxynitrures de silicium et aluminium...
- le nitrure de bore  $\text{BN}$ .

A haute température, ces substances ne sont stables qu'en atmosphère exempte d'oxygène.

### **III.5.3. Réfractaires mixtes**

Les réfractaires mixtes sont des matériaux constitués principalement d'oxydes et accessoirement de non-oxydes.

### **III.5.4. Les réfractaires électro-fondus et frittés**

Les réfractaires électro-fondus sont fabriqués par fusion au four électrique de la matière réfractaire, et coulés dans un moule approprié. Les produits frittés, mis en forme par forte compression à sec, sont agglomérés par une longue cuisson à haute température, ces produits à base d'alumine, silice, zircon, ou de leurs combinaisons (en particulier mullite), ainsi que de chrome-magnésite (électro-fondu).

Les produits obtenus caractérisent par une haute compacité ou des produits ne représentant que des pores fermés (peu accessibles aux agents corrosifs). Ils sont de ce fait très résistants aux corrosions chimiques. Ils sont par contre extrêmement fragiles aux variations de température.

### **III.5.5. Les réfractaires isolants**

Ces produits sont fabriqués en argile réfractaire (densité allant de 0.4 à 1.2) mais également en alumine, silice, ils sont moulés ou mis en forme par forte compression et généralement agglomérés par cuisson.

Les produits réfractaires isolants sont poreux, ils doivent présenter une porosité totale d'au moins 45 % du volume apparent, cette porosité atteint parfois 85 %, 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).

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

### **III.6.1. Propriétés physiques**

Les matières réfractaires sont caractérisées par leurs propriétés physiques qui indiquent souvent l'utilisation et les performances des matériaux réfractaires, en générale les propriétés physique de base peuvent souvent indiquer si un matériau réfractaire peut être utilisé pour les applications prévues ; les propriétés physiques de base suivant : densité, porosité, et

abrasion ;ces propriétés sont souvent utilisées pour prédire ,sélectionnez, et prescrire réfractaire pour des applications spécifiques .

**III.6.2. Propriétés thermiques**

La dilatation thermiques et l’une des propriétés thermiques essentielle pour les matériaux réfractaires, il s’agit d’une mesure de la stabilité réfractaire autour de son linéaire quand il est exposé à déférent gamme de températures élevées et ensuite refroidit à température ambiante.

Elle définit comme un changement linéaire permanent des dimensions réfractaires.

La seconde propriété qui doit être présent chez les réfractaires et le choc thermique, c’est la mesure de la propriété réfractaire lorsque le réfractaire est expose au chauffage et refroidissement alternées, c’est une propriété importante pour un matériau réfractaire.

La conductivité thermique est aussi une propriété des matériaux réfractaires, elle concerne sa capacité à conduire la chaleur à partir de la zone chaude a la zone froide quand il est expose.

**III.6.3. Propriété chimique**

Les propriétés chimiques d’un matériau réfractaire sont définis par l’analyse chimique des grains réfractaires par la nature de la liaison et aussi par l’aptitude de réfractaire pour résister à l’action du liquide en cas d’exposition à des températures élevés , les propriété chimiques d’un matériau réfractaire sont principalement dépendante par la composition chimique du réfractaire lorsque les réfractaires sont exposes a des liquides corrosifs à des températures élevés ,la mesure de la corrosion érosion dépend des grains réfractaires ,corrosion réfractaire peut être provoquée par des mécanisme tels que la dissolution en contact avec un liquide ,une vapeur – liquide ou en phase solides à des températures élevés

**III.7. Les déférentes catégories des matériaux réfractaires**

La gamme des produits réfractaires se répartit en cinq catégories, et répond aux besoins en produits réfractaires silico-alumineux des industries cimentière, céramique, sidérurgique, ... et de la construction

**Tableau III 1 : Les déférents types de produits réfractaires**

				
Standards	Cubilots	Spéciaux	Creux	Non façonnés

### III.8. La classification des produits réfractaires

Vue de diversité de leurs constitutions et leur mode de fabrication, les produits réfractaires sont subdivisés comme suit :

#### III.8.1. 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.8.2. Selon la réfractérité

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

#### III.8.3. 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. [22]

### III.9. Ciment alumineux fondu (réfractaire)

#### III.9.1. Introduction

Le ciment alumineux fut inventé par J. Bied, en 1908 et fabriqué industriellement en France à partir de 1918. C'est un liant à durcissement rapide, Il est obtenu par mélange broyé de calcaire et de bauxite (alumine) cuit jusqu'à fusion (ou frittage). Le ciment alumineux a des résistances mécaniques meilleures que celles du ciment portland (80 MPA au bout de 7 jours). Sa mise en œuvre assez spécifique le destine à un usage pour mortier réfractaire pouvant supporter jusqu'à 1200°C, travaux urgents ou par très grands froids.

Les ciments fondus ont été développés pour satisfaire aux besoins suivants : durcissement, rapide, résistance aux sulfates, bétonnage dans les conditions climatiques extrêmes.

### III.9.2. Composition chimique

Elle dépend des matières premières utilisées et des méthodes de fabrication,

**Tableau III.2 : la composition chimique de ciment alumineux**

Oxyde	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O
La teneur	35-45%	30-35%	5-15%	1.5-2.5%	5-15%	0.5-1.5%	0-1.2%	0-1%

### III.9.3. Matières premières pour la fabrication du Ciment Alumineux

**A/ Les Calcaires** on a les rappelés précédemment

**B/ La bauxite** : argile à haute teneur en alumine. On utilise aussi le kaolin, l'alunite (KAl<sub>3</sub>[SO<sub>4</sub>][OH]<sub>6</sub>), déchet de la production de l'alumine .... La teneur en Alumine dans la bauxite varie de 40% à 75%.

L'aptitude de la bauxite pour la production du clinker alumineux est évaluée par le module silicique (coef de qualité) qui doit être supérieur à 2.

### III.9.4. Procédé de fabrication

Il existe deux méthodes de fabrication, par cuisson (frittage) et par fusion du mélange des matières premières.

- La cuisson du mélange est possible en milieu oxydant et réducteur à des températures 1150 à 1250°C dans des fours annulaires à plusieurs tunnels : Elle est embarrassée par un intervalle insuffisant entre la T°C de cuisson et celle de fusion, ce qui mène à la formation d'anneaux et de grands morceaux de clinker.
- La méthode de fusion est la plus répandue, la T°C de fusion du mélange n'est pas très haute (1380°C – 1600°C). Elle est fonction de la composition des matières premières.

#### ❖ Remarque

Lors de la fusion du mélange dans le Haut fourneau, l'oxyde de fer se réduit presque totalement tandis que le SiO<sub>2</sub> se réduit en quantité très faible, car la silice ne se réduit pas à cette T°C (1700).

Et voilà un schéma représentatif qui résume la chaîne de fabrication des ciments

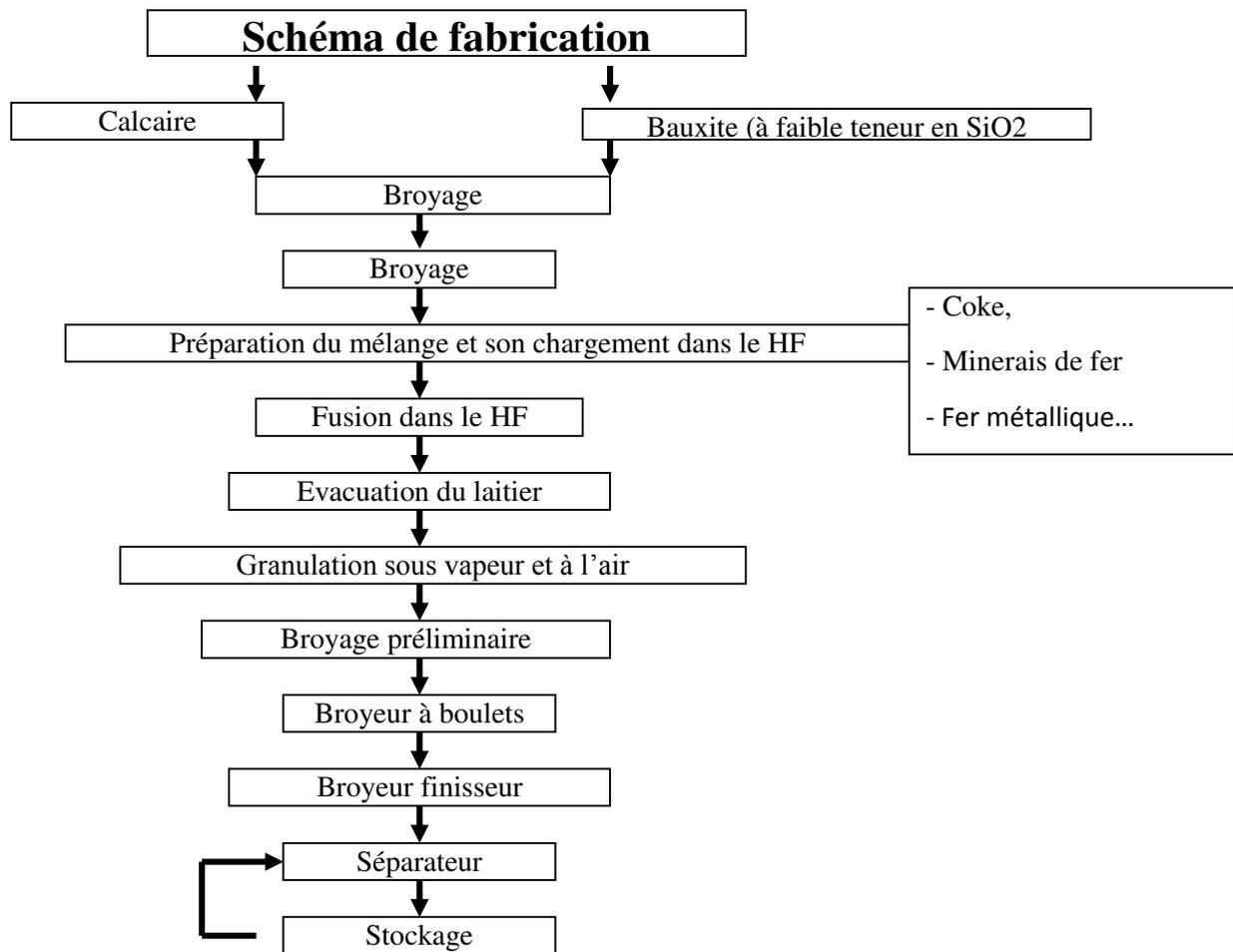


Figure III.5 : schéma de fabrication de ciment alumineux.

## III.10. Brique réfractaire

### III.10.1. Définition

Les briques sont les produits céramiques, dont les matières premières sont des argiles, avec ou sans additifs. La forme des briques est généralement parallélépipède rectangle. Elles sont couramment utilisées dans la construction des bâtiments et des travaux publics. Par rapport aux autres matériaux, Les briques réfractaires se retrouvent de plus en plus souvent dans les dépliants des fournisseurs et des fabricants tant de cheminées que de barbecues et de fours. La brique réfractaire est conçue pour résister à la chaleur. Selon son utilisation, C'est ce que l'on appelle la convection et c'est un élément majeur du succès de la brique réfractaire. [23]



**Figure III.6 :** brique réfractaire de four welko

La brique réfractaire est utilisée principalement pour les constructions destinées à résister à une source de chaleur directe ou indirecte :

- Le barbecue fixe.
- Les foyers de cheminée.
- Les cheminées.
- Les fours (à cuisson clinker, à pain, à pizza ...).
- Les chaudières.
- Les forges.
- Les murs proches d'un poêle ou d'une source importante de chaleur.

### III.10.2. Déchet de briques

Les déchets de briques sont des matériaux inertes ou résidus qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante, ne se décomposent pas, ne brûlent pas, et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction.

Les briques réfractaires se retrouvent de plus en plus souvent dans les dépliants des fournisseurs et des fabricants tant de cheminées que de barbecues et de fours. Il semble que ce mot soit magique et permette de réaliser toutes sortes de performances calorifiques. Mais de quoi s'agit-il exactement ? La brique réfractaire est conçue pour résister à la chaleur. Selon son utilisation, elle sera composée de vermiculite, de ciment fondu et de coulis réfractaire dans différentes proportions. 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.

### **III .10.2.Caractéristique**

#### **III .10.2.1.Liaison thermique ou chimique**

Il s'avère cependant que d'autres techniques de liaison, non céramique ou partiellement céramique, donnent des résultats répondant à des applications spécifiques. Dans ce cas, on fait appel à des liants chimiques, comme l'acide phosphorique ou ses dérivés, pour fabriquer les produits « crus ».

Les briques sont obtenues essentiellement par utilisation de silice  $\text{SiO}_2$  et d'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en plus ou moins grandes quantités selon l'effet recherché. On distingue : [24]

- produits à base de silice (teneur en silice supérieur à 91 %, en alumine, inférieur à 3 %) ;
- produits siliceux (teneur en silice entre 85 à 91 %, en alumine, supérieur à 5 %) ;
- produits à base d'argile (silico-alumineux) (teneur en alumine entre 15 et 40 %) ;
- produits spéciaux à base de bauxite, magnésite et dolomie, corindon, graphite, carbure de silicium, etc.
- produits naturels utilisables sans cuisson préalable.

#### **III.10.3. Effet d'une source de chaleur sur les briques réfractaires**

Les matériaux réfractaires les plus communs, par exemple une brique réfractaire, possèdent une forte inertie thermique. Exposés à une source de chaleur, ils chauffent relativement lentement, et une fois à température élevée, ils refroidissent avec lenteur. Placée au contact d'une flamme ou d'un plasma, une plaque réfractaire permet aux parois des fours de contenir la source de chaleur, en particulier en restreignant l'expansion des zones à températures très élevées qui pourraient altérer tout ou une partie des parois du four. 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 : c'est l'énergie qu'il faut apporter à un matériau pour Augmenter sa température relative d'un kelvin (1K). [25]



Figure III.7 : Transfert de chaleur entre les parois.

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

Avec : Q = Chaleur évacuée en joules

M = Masse du corps en kg

C<sub>p</sub> = Capacité calorifique massique à pression constante du corps en j/kg °k

ΔT = Différence de température entre le corps et le fluide °k

### III.10.4. Principe de fabrication des briques réfractaires

Les briques réfractaires sont obtenues par cuisson de certaines argiles à une température d'environ 1000°C. Par combinaison chimique à partir de 700°C, l'argile en perdant son eau, se transforme en terre cuite. L'oxyde de fer des argiles donne la coloration aux briques. En général la fabrication des briques se compose des cinq opérations principales comme indiquées sur le schéma ci-dessous.

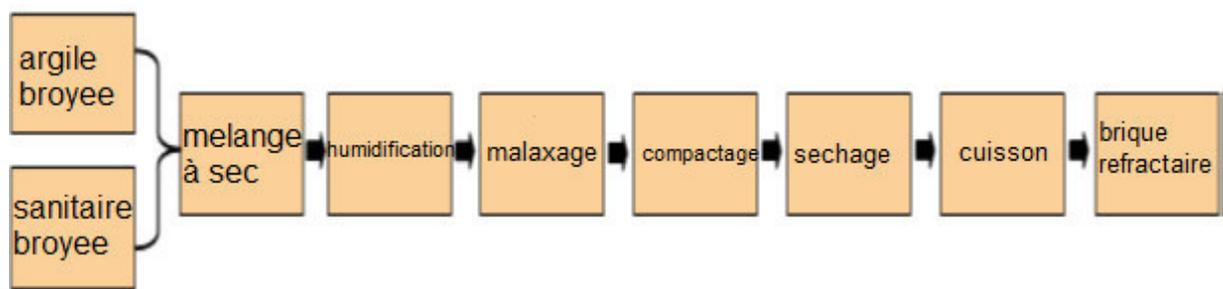


Figure III.8 : Schéma de la fabrication des Briques

Les briques sont obtenues soit par filage (passage de l'argile dans la filière), ou bien par pressage (compression de la pâte dans un moule).

### III.10.5. Les principaux types de briques réfractaires

#### III.10.5.1. La brique d'alumine

Les briques d'alumines sont produites avec la chamotte choisie de bauxite par le processus avancé et le contrôle de qualité strict.

Les composants minéraux principaux sont des phases de corindon et de mullite.

Elle comporte l'excellente mécanique à hautes températures et la résistance à la corrosion chimique. [26]



**Figure III.9 :** Brique d'alumine

#### III.10.5.2. Brique de silice

La matière utilisée est sous forme de quartz et de sable comme matière principale, plus une argile plastique comme liant mais l'utilisation de cette argile abaisse le point de fusion du mélange, c'est pourquoi on a tendance à utiliser la chaux qui donne les meilleurs résultats, elle est ajoutée sous forme de lait de chaux (2 à 3%) de CaO.



**Figure III.10 :** Brique de silice

### III.10.5.3. Brique de magnésie

Les matières premières des briques de magnésie sont obtenues par la cuisson à hautes températures de la magnésie naturelle ou la magnésie de synthèse, la composition principale des magnésies est  $MgO$ , parmi les impuretés indésirables et qui ont une influence négative sur le ramollissement sont la silice  $SiO_2$  et l'alumine  $Al_2O_3$ , les réfractaires de magnésie sont des réfractaires basiques.

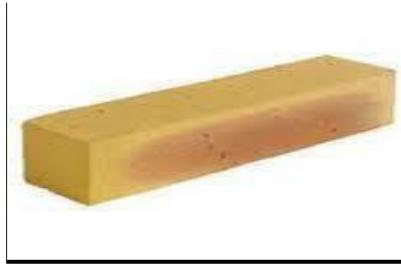


Figure III.11 : Brique de magnésie

### III.10.5.4. La brique à base d'oxyde de zirconium

- **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, il est monoclinique, à  $1165\text{ °C}$ , sa maille devient quadratique et, à  $2370\text{ °C}$ , 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  $T > 1.000\text{ °C}$ ,
- Grande dureté, bonne résistance à l'usure,
- Bonne inertie chimique,
- Bonne résistance aux attaques des métaux.

- **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 09 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.

- **Définition de la brique de zircon-corindon**

Les composants minéraux principaux sont des phases de corindon et de mullite sable et Eaccrue réglables 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.12 :** Brique de zircon

### **III.10.6. Domaines d'utilisation**

- **Industrie des ciments**

Dans la fabrication du ciment, les briques réfractaires sont utilisées à l'intérieur du four rotatif. Pendant la cuisson de la farine crue (calcaire + argile), se forme les minéraux du clinker qui sont les principaux constituants du ciment .Pendant la rotation du four et dans la zone de cuisson, le mélange est en contact avec les briques réfractaires. Ces derniers sont non seulement exposés à des températures très élevées mais aussi sont subissent à l'abrasion sous l'effet des forces de frottement. Donc ces briques doivent avoir aussi des exigences bien définies.



**Figure III.13 :** Four de ciment

- **Industrie verrière**

Dans le processus de verrerie, les briques réfractaires dans le réservoir de verre sont en contact constant avec le verre fondu, ce qui pose différents types de besoins pour les réfractaires. Puisque le verre à l'état fondu est assez fluide et tend à passer par les pores réfractaires, la caractéristique la plus nécessaire devrait être réfractaire non poreux et donc réfractaires fondus sont utilisés dans les zones de contact de verre fondu. Il est évident que les exigences en matière de propriétés réfractaire varient considérablement selon l'application et à l'utilisation dans des processus différents. Ainsi, réfractaires individuels doivent être conçus avec des propriétés caractéristiques des systèmes spécifiques, puisque les conditions varient selon les procédés à haute température.



**Figure III.14 :** Four de verre

### IV. Méthodologie et objectif du travail pratique

Notre étude pratique a pour but : l'élaboration des bétons fibrés ultra performants (BFUP) à base de fibres naturelles (ALFA) et d'étudier l'effet du déchet des briques réfractaires comme substituant du ciment et de la nature des superplastifiants sur les caractéristiques physico-mécaniques de ces bétons.

Pour cela, le plan de travail que nous avons dressé, est partagé en quatre étapes :

#### La première partie

Cette est consacrée à l'analyses physico-chimiques et mécaniques des différents constituants à savoir :

- ✚ Ciment (CPJ CEMII 42,5 de SOUR ELGHOUZLANE)
- ✚ Sable d'oued SOUF
- ✚ Sable finement broyé
- ✚ Fibre naturelle (alfa)
- ✚ Brique réfractaire
- ✚ Superplastifiant (SIKA VISCOCRETE TEMPO 12, SIKAFUID)

#### La deuxième partie

**1<sup>er</sup> ETAPE** : Formulation et caractérisation des échantillons à base de déchet de brique réfractaire

- [BFUP T] : BFUP TEMOIN
- [BFUP10% SFB]: BFUP à base de 10% de sable de dune finement broyé
- [BFUP10% BR] : BFUP à base de 10% de brique réfractaire
- [BFUP20% BR] : BFUP à base de 20% de brique réfractaire
- [BFUP30% BR] : BFUP à base de 30% de brique réfractaire

**2<sup>eme</sup> ETAPE** : Formulation et caractérisation des échantillons à base de brique réfractaire et fibre alfa.

- [BFUP T+0.5%  $\alpha$ ] : BETON TEMOIN+ 0.5% Fibre alfa
- [BFUP20% BR +0.5%  $\alpha$ ] : BFUP à base de 10% de brique réfractaire + 0.5% Fibre alfa
- [BFUP30% BR +0.5%  $\alpha$ ] : BFUP à base de 30%de brique réfractaire + 0.5% Fibre alfa

### La troisième partie

Elle est consacrée aux traitements thermiques des différentes éprouvettes afin d'évaluer leurs résistances à des hautes températures pour une éventuelle valorisation de ce déchet de briques dans les BFUP.

#### ❖ La première partie

### IV.1. Analyse physico-chimiques et mécanique des constituants :

#### IV.1.1. Caractérisation des matériaux utilisés :

##### IV.1.1.1. Le ciment CPJ-CEM II/A 42.5 conformément à la norme NA 442 édition 2000 :

Le ciment utilisé pour toute l'étude expérimentale est un Ciment Portland Composé CPJ CEM II/A de classe 42.5 provenant de la cimenterie de **Sour El-Ghouzlane**.

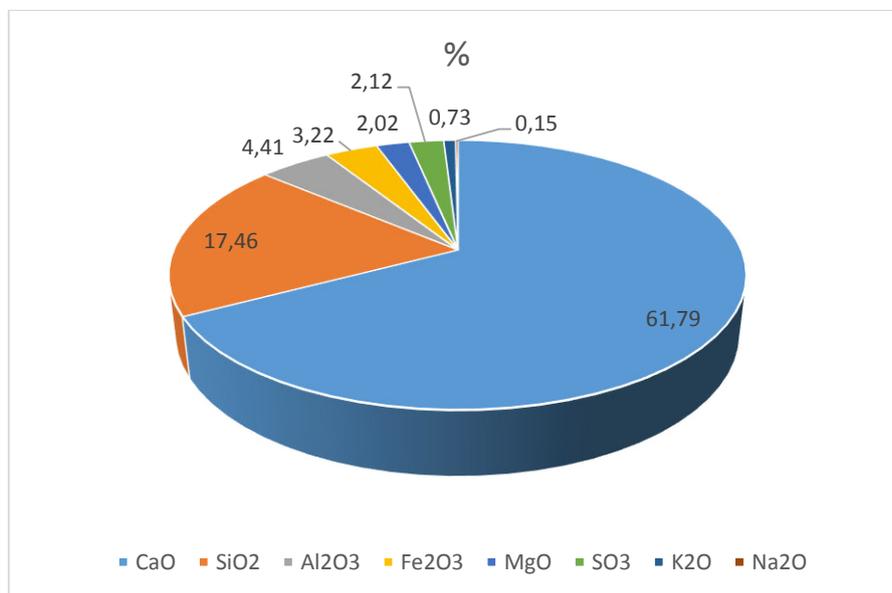
**Tableau IV. 1** : caractéristiques physiques du ciment CPJ-CEM II/A 42.5

Désignations		Garantie NA 442	Moyenne	Unités
Surface spécifique(SSB) (NA231)			3960	cm <sup>2</sup> /g
Poids spécifique			3,02	g/cm <sup>3</sup>
Consistance normale (NA 229)			26	% H <sub>2</sub> O
Temps (NA 230)	Début de prise	≥60	150	Mn
	Fin de prise		252	Mn
Retrait à 28 jours		≤1000	731	µm/m
Expansion à chaud		≤10	0.5	Mm

## Partie pratique

**Tableau IV.2** : La composition chimique ciment CPJ-CEM II/A 42.5

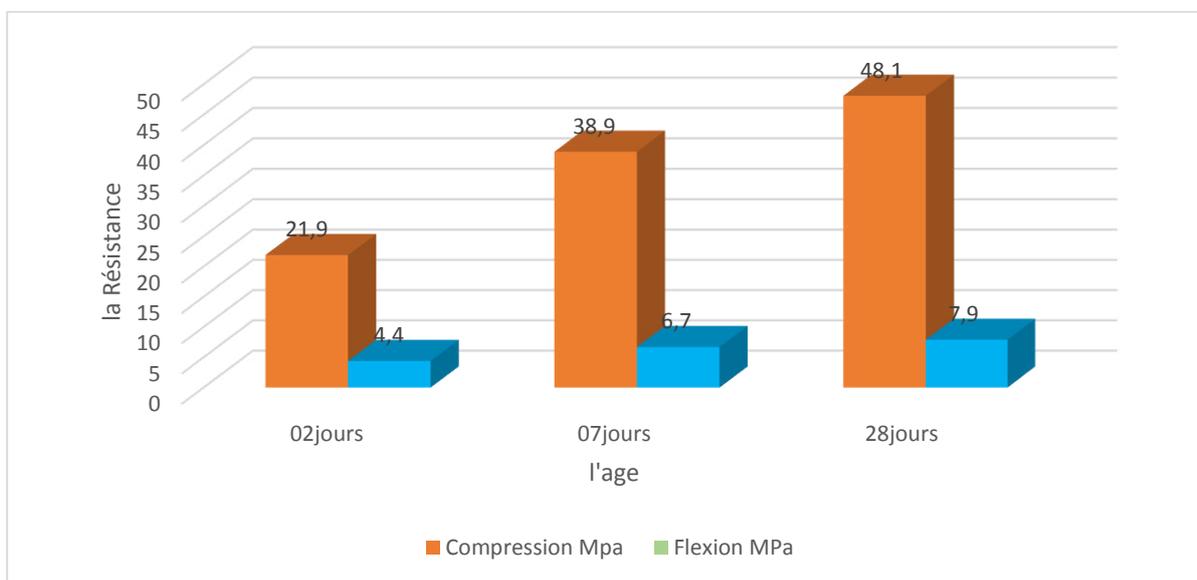
Eléments	%
CaO	61,79
SiO <sub>2</sub>	17,46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,22
MgO	2,02
SO <sub>3</sub>	2,12
K <sub>2</sub> O	0,73
Na <sub>2</sub> O	0,15



**Figure IV.1** : La composition chimique ciment CPJ-CEM II/A 42.5

**Tableau IV.3** : caractéristiques mécaniques ciment CPJ-CEM II/A 42.5

Résistance (MPa)	Age		
	02 jours	07 jours	28 jours
Compression	21.9	38.9	48.1
Flexion	4.40	6.70	7.90



**Figure IV.2** : Caractéristiques mécaniques ciments CPJ-CEM II/A 42.5

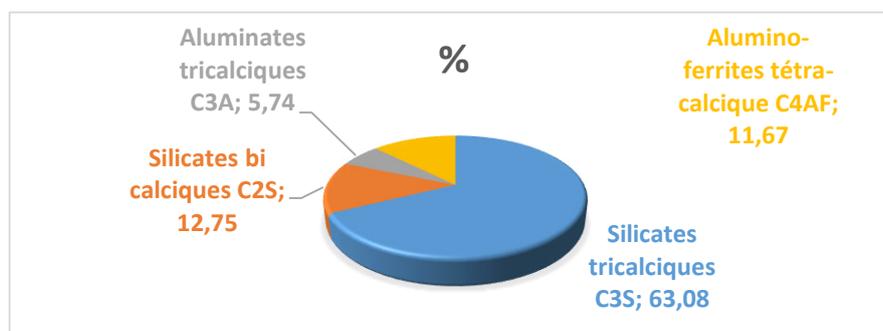
## Partie pratique

**Tableau IV.4 :** compositions chimiques de clinker

Composants chimiques	Teneurs limites (%)	Teneur moyenne (%)
<b>CaO</b>	<b>60-69</b>	<b>65</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>18-24</b>	<b>21</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>04-08</b>	<b>06</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>01-08</b>	<b>03</b>
<b>MgO</b>	<b>&lt; 05</b>	<b>02</b>
<b>K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>&lt; 02</b>	<b>01</b>
<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>&lt; 03</b>	<b>01</b>

**Tableau IV.5 :** composition minéralogique de clinker

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



**Figure IV.3 :** composition minéralogique de clinker

### IV.1.1.2. Sable :

- ✓ Sable d'Oued Souf :

**Tableau IV.6 : Caractéristiques physiques**

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique apparente	1,68	g/cm <sup>3</sup>
Masse volumique absolue	2,56	g/cm <sup>3</sup>
Coefficient de friabilité (%)	9.4	%
Teneur en eau	6,72	%
ESV	85	%
ESP	77.18	%
Absorption	1,4	%
Porosité	1,77	%

### Remarque :

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

**Tableau IV.7 :** La composition chimique de sable oued souf

Composition chimique	Teneurs %
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
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01

**Remarque :** On remarque que ce sable est un sable très siliceux et contient un pourcentage important de silice, ce qui fait de lui un sable très adéquat pour la confection de tous les types des bétons et surtout ceux de hautes performances comme les BFUP

## Partie pratique

Tableau IV.8 : Analyse granulométrique (NF P 18-560)

Tamis ouverture (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Passants (%)
4	4.0	0.40	99.60
2.5	11.5	1.15	98.85
1.25	47	4.70	95.30
0.63	184	18.40	81.60
0.315	593	59.30	40.70
0.16	974.5	97.45	2.55
0.08	992	99.20	0.80
Fond de tamis	997.5	100	00

$$MF = 1.79$$

**NB :** d'après les résultats obtenus sur le sable, on peut dire qu'il répond aux exigences de la norme d'AFGC pour qu'il soit utilisé dans les BFUP.

**Remarque :**

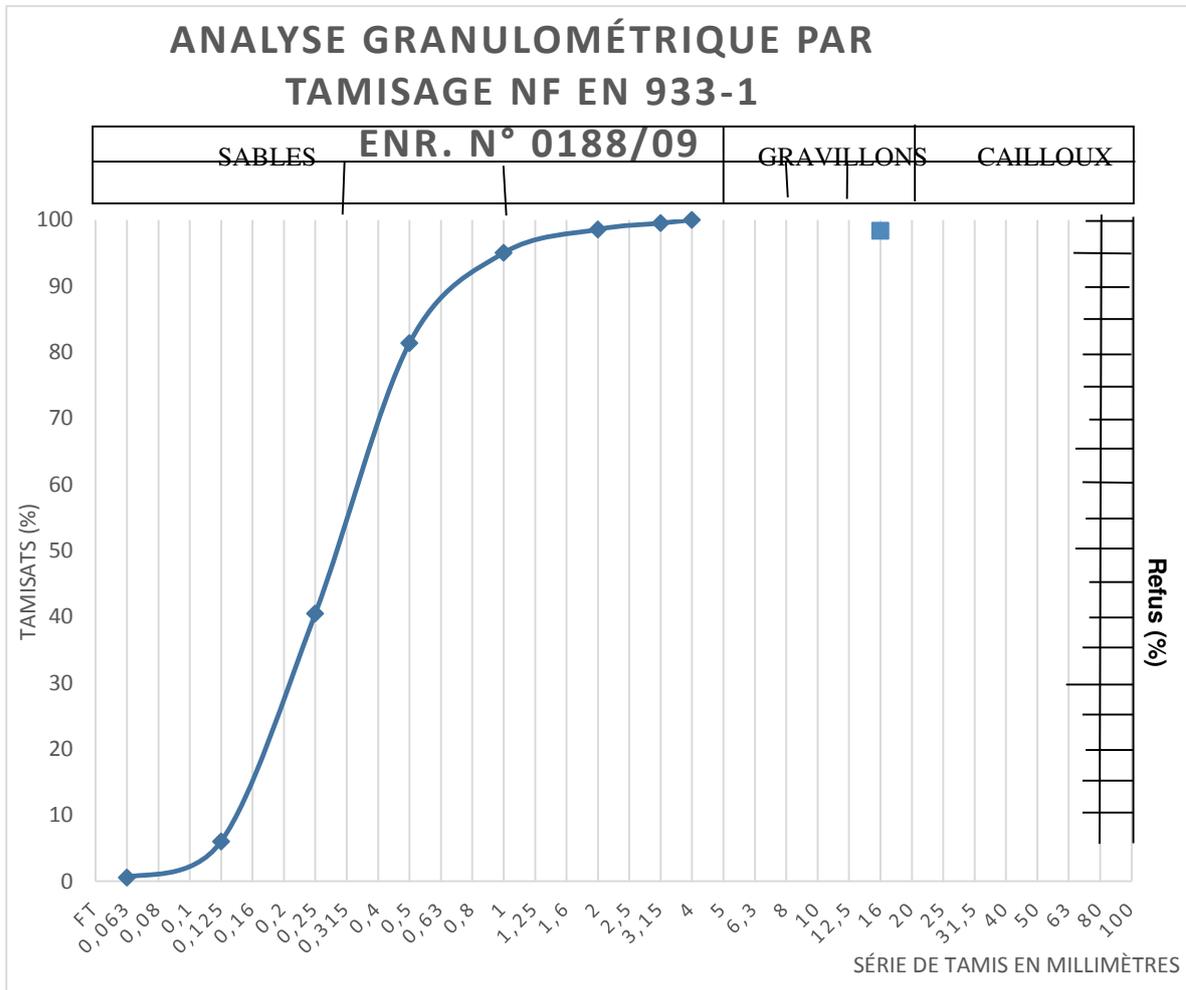
- **Module de finesse est calculé par la relation suivante :**

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

$$MF = \frac{97,44 + 59,30 + 18,0 + 4,70}{100} = 1.79$$

### IV.1.1.3. Le sable broyé

**Figure IV.4 : Courbe granulométrique par tamisage nf 18-560**



**Tableau IV.9 : Caractéristiques physiques de sable broyé (sable d'OuedSouf)**

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique apparente	1.65	g/cm <sup>3</sup>
Masse volumique absolue	2.68	g/cm <sup>3</sup>

### V.1.1.4. Les briques réfractaires

La brique réfractaire est fabriquée à base de zircon-corindon électro fondu (plus de 30% d'oxyde de zirconium et plus de 40% de corindon), ce type de brique réfractaire est utilisé surtout à l'intérieur du four à bassin de verre (cette brique est très résistante à la température du four, allant jusqu'à 2000°C).



Figure IV.5 :Brique réfractaire

#### IV.1.1.4.1. Caractéristiques

##### A. Les caractéristiques chimiques de la brique avant son utilisation dans le four

**Tableau IV.10** : Analyse chimique de la brique réfractaire (à base de zircon-corindon électro fondu) avant son utilisation dans le four

Composition chimique	ZrO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NaO <sub>2</sub>	Corindon
Valeur %	32,5	17	2.6	1 ,4	47

#### IV.1.1.4.2. Les déchets de briques réfractaires

Afin de valoriser ce déchet de briques réfractaires, nous nous sommes intéressés à la récupération de ces briques de l'unité de fabrication céramique après leur utilisation dans le four.



Figure IV.6 :Déchet de brique réfractaire

### IV.1.1.4.3. Préparation

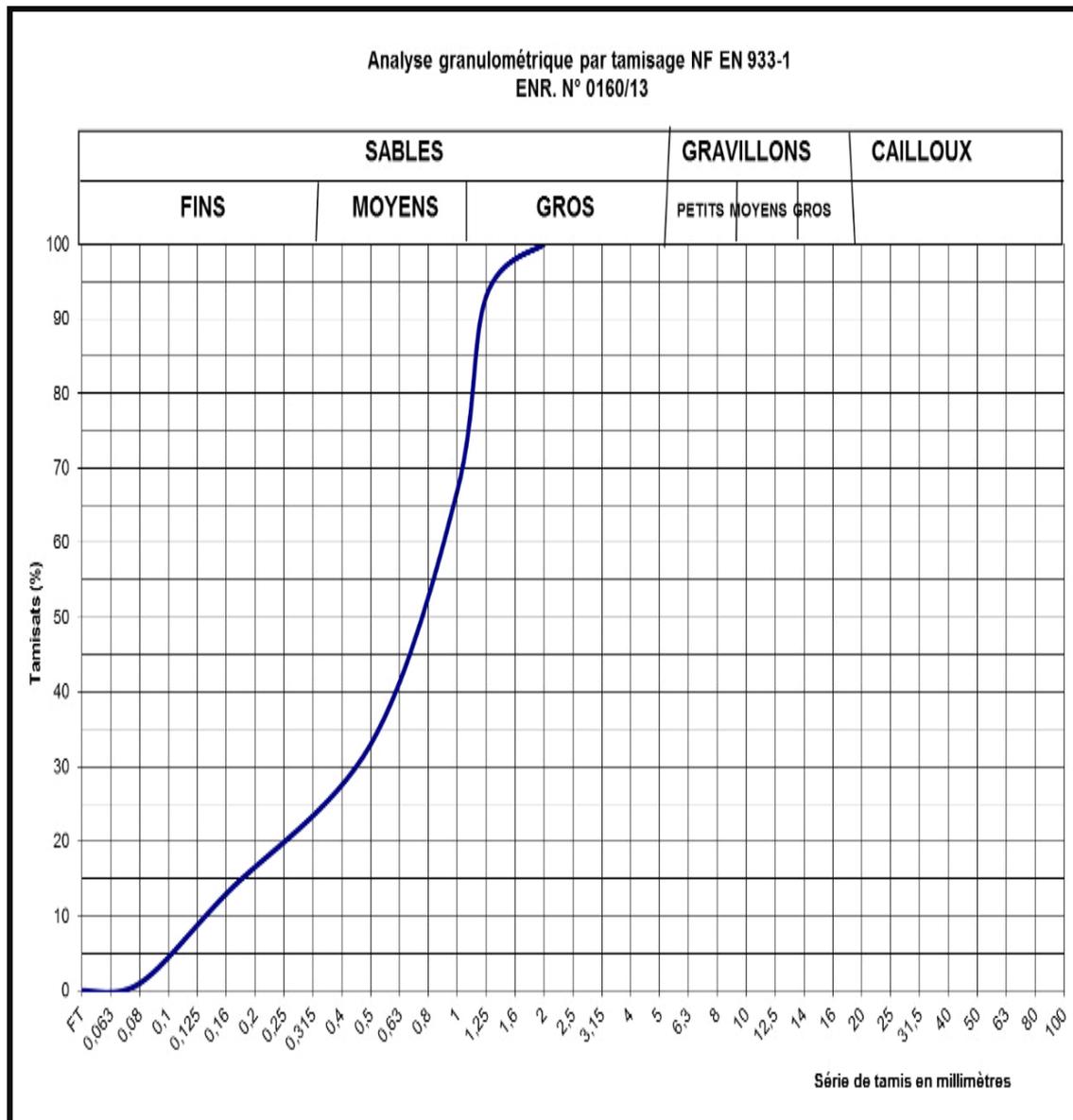
- Les briques récupérées ont été concassées, broyées et tamisées pour les utiliser comme granulats à la place du sable et comme fines minérales par substitution au ciment dans la fabrication des mortiers.
- Le concassage est effectué à l'aide d'un concasseur à cône.



- Après concassage, la brique réfractaire est tamisée intégralement aux séries de tamis de sable normalisé (1,25 ; 1 ; 0,5 ; 0,16 ; 0,08 mm)

**Tableau IV.11** : Granulométrie de déchet de brique réfractaire

Série de tamis (mm)	Masse de refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulés (%)
2	0	0	100
1,25	94,5	7	93
1	445,5	33	67
0,5	904,5	67	33
0,16	1174,5	87	13
0,08	1336,5	99	1
FT	1350	100	0



**Figure IV.7 :** Analyse granulométrique par tamisage

#### IV.1.1.4.4. Caractéristiques

##### A) **Caractéristiques chimiques de déchet de brique réfractaire après son utilisation dans le four**

Les résultats de l'analyse chimique du déchet de briques réfractaires sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.12** : Analyse chimique du déchet de brique réfractaire par FX

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

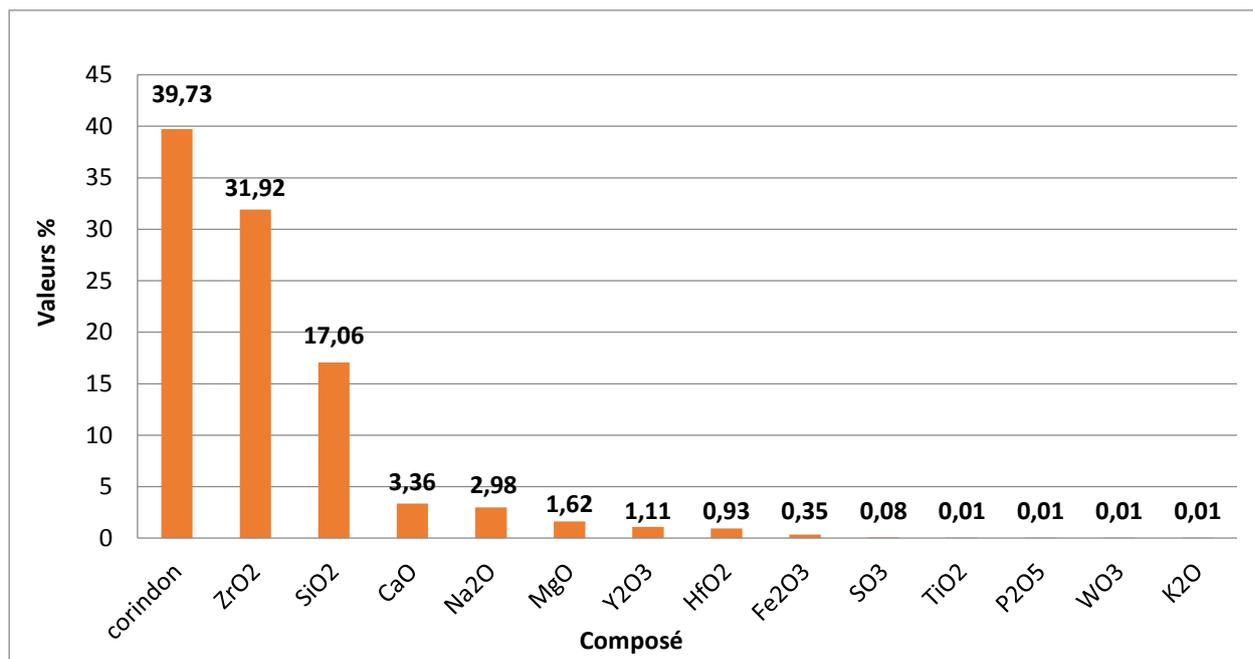


Figure IV.8 : Composition chimique de déchet de brique réfractaire

**B) Caractéristiques physiques du déchet de brique réfractaire**

Tableau IV.13 : Caractéristiques physiques de déchet de brique réfractaire (à base de zircon-corindon)

Les caractéristiques des briques réfractaires	Valeurs
La masse volumique [g/cm <sup>3</sup> ]	1,05
La surface spécifique [cm <sup>2</sup> /g]	4350
L'absorption d'eau (%)	2,3
La teneur en eau (%)	0,33
Couleur	Jaune

**IV.1.1.5. Fibre Alfa**

La tige Alfa utilisée provient de la wilaya de Djelfa. Comme première étape on met les tiges Alfa à l'air libre afin de les sécher jusqu'à l'obtention de la couleur jaune, après on les écrase pour obtenir des tiges souples.



**Figure IV.9 :** Alfa à l'état brut

### IV.1.1.5.1. Extraction chimique

Une partie des fibres séchées et écrasées est trempée dans une solution de soude de normalité 2N et chauffée sur une plaque chauffante à 60°C pendant 1h. On rince les tiges avec de l'eau distillée afin d'éliminer toutes les traces de la soude, ensuite on fait sécher les fibres dans une étuve à 60°C pendant vingt-quatre (24) heures et enfin, on les sépare manuellement par cardage à l'aide d'une brosse métallique. On obtient des fibres lisses et fines sous forme de laine qui sont ensuite utilisées pour l'élaboration des mortiers.





**Figure IV.10** : procédé d'extraction d'alfa

### IV.1.1.6. Eau de gâchage

L'eau utilisée dans nos essais (soit dans le ciment ou bien le béton), c'est l'eau potable d'Oued Smar ALGER

### IV.1.1.7. Adjuvants (Superplastifiants)

On a utilisé deux types de superplastifiant :

#### IV.1.1.7.1. Sika<sup>®</sup> viscocrete<sup>®</sup> Tempo 12

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

Conforme à la norme NF EN 934-2.

#### Présentation

#### Sika viscocrete Tempo 12

Est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalente 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.

### Caractères généraux

#### Sikaviscocrete 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.

### Données techniques

Densité :	1,06 ± 0,01
PH :	6 ± 1
Teneur en Na <sub>2</sub> O Eq :	≤ 1 %
Extrait sec :	30,2 ± 1,3 %
Teneur en ions Cl <sup>-</sup> :	≤ 0,1 %

### 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 visocrete 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.

#### Précautions d'emploi

En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité.

### IV.1.1.7.2.SIKAFLUID

#### Présentation

Le SIKAFUID est un superplastifiant de synthèse énergétique qui améliore la mise en place du béton en augmentant les résistances mécaniques

#### Domaines d'application :

- Le SIKAFUID s'utilise dans deux domaines privilégiés
- Amélioration de la maniabilité, à résistance égale, sans réduction d'eau.
- Le Sikafluid a la propriété de transformer un béton ferme ou plastique ou un béton fluide en conservant la résistance
- Le SIKAFUID est, dans ces cas, recommandé pour les bétons très ferrailés :
  - **Bâtiment** : planche, poutre, poteaux, panneaux
  - **Génie Civil** : ouvrage, d'art, réservoirs

Amélioration des résistances et de la maniabilité avec réduction d'eau partielle (5 à 10%) pour un dosage en SIKAFUID de 0.6 à 1.25% du poids du ciment

Le SIKAFUID est utilisé dans ces cas pour :

- Les bétons armés de toutes performances ;
- Les bétons préfabriqués (étuvé ou non).

**Caractères généraux** : par son action physico-chimique le SIKAFUID permet :

#### Sur béton frais :

- D'augmenter considérablement la fluidité du béton, donc de faciliter sa mise en place en diminuant les temps unitaires ;
- D'améliorer la pompabilité du béton.

#### Sur béton durci

- D'augmenter les résistances mécaniques ;
- D'accroître la compacité ;
- D'augmenter l'imperméabilité.

Le SIKAFUID est compatible avec tous les ciments, exception faite des liants aluminés

### Caractéristiques

#### Coloris

- marron foncé

#### Conditionnement

- fût de 250 kg
- conteneur de 1100 kg

#### Stockage

- le produit peut geler à basse température, en cas de gel prolongé, vérifié s'il n'a pas été déstabilisé

#### Conservation

- le produit stocké dans son emballage d'origine intact se conserve 3 ans

#### Données techniques

Densité :  $1.20 \pm 0.02$

PH :  $1.5 \pm 1.5$

Teneur en ions CL :  $\leq 0.1\%$

Teneur on Na<sub>2</sub>O éq :  $\leq 1\%$

Extrait sec :  $40 \pm 1.5\%$

#### Conditions d'application

##### Consommation, dosage :

Plage d'utilisation recommandée : 2.5% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Plage d'utilisation usuelle

**Mise en œuvre :** selon les lieux de fabrication du béton, nous préconisons les emplois suivants

- **Béton prêt à l'emploi**

Le SIKAFUID est ajouté dans l'eau de gâchage ou dans le malaxeur au moment de la confection du béton

### Chantiers et préfabrifications

Le SIKAFUID sera ajouté au béton au début de dernier tiers du temps de malaxage après la fin de l'introduction de l'eau de gâchage

#### IV.1.1.8.Conclusion

Suivant les résultats obtenus, après caractérisation des différents constituants à savoir (sable, ciment, brique réfractaire,), on peut conclure que ces derniers sont conforme aux exigences de la norme en vigueur pour leur emploi dans les bétons en général et les BFUP en particulier.

## ❖ DEUXIEME PARTIE

### IV.1. formulation et confection des différentes compositions de BFUP

#### IV.1.1.Formulations

La formulation des BFUP est beaucoup plus complexe à mettre en évidence à cause du nombre de paramètres qui rentre en jeu (ciment, sable, additions, adjuvants, fibres, eau) et de leurs natures par rapport à la formulation d'un béton ordinaire. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

La mise au point de ces formules de BFUP consiste à déterminer les quantités de chaque constituant en premier lieu :

- ❖ un rapport E/C très faible ( $< 0,25$ ) ;
- ❖ une augmentation de la compacité par optimisation du squelette granulaire ;
- ❖ l'emploi de sable fin ( $0,063 \text{ mm} < d_{\max} < 2 \text{ mm}$ ) afin d'améliorer l'homogénéité ;
- ❖ l'emploi d'ultra fine ;
- ❖ un dosage en superplastifiant proche de son dosage à saturation ;
- ❖ l'emploi de fibres naturelles (alfa) pour augmenter la ductilité

#### IV.1.2. Calcul de la composition du BFUP

Le calcul de la composition a été faite selon la méthode d'AFGC, le dosage de chaque constituant est présenté dans le tableau(IV.14)

## Partie pratique

**Tableau IV.14 : Dosage des constituants selon AFGC (pour 1m<sup>3</sup>)**

Ciment	Sable fin	Quartz broyé	Fumé de silice	Fibres métallique	Adjuvant (Extrait sec)	Eau de gâchage (litre)
710 Kg	1020 Kg	200Kg	230 Kg	160 Kg	10 Kg	140
1075 Kg	1030 Kg		160 Kg	220 Kg	35 Kg	200

Afin d'obtenir une composition optimale de notre BFUP pour un 1m<sup>3</sup>, on a fixé les paramètres suivants :

- Rapport E/L=0.25.
- Dosage du ciment à 900 kg/m<sup>3</sup>.
- Remplacer la fumée de silice par ces deux constituants :
  - Le sable de dunes (sable Oued Souf finement broyé).
  - Les déchets de brique réfractaire.
- Remplacer les fibres métalliques par les fibres naturelles (alfa).
- 1% de superplastifiant.

### IV.1.3.Détermination de la masse de chaque constituant pour 1m<sup>3</sup> :

Le calcul des autres constituants a été fait par rapport au dosage du ciment déjà fixé qui est à : **900 kg/m<sup>3</sup>**.

#### • Sable oued souf :

$$1075 \text{ kg / m}^3 \longrightarrow 1030 \text{ kg / m}^3$$

$$900 \text{ kg / m}^3 \longrightarrow X$$

$$X = 862.33 \text{ kg / m}^3$$

## Partie pratique

- **Sable oued souf finement broyé :**

$$900\text{kg} / \text{m}^3 \longrightarrow 100\%$$

$$Y \longrightarrow 10\%$$

$$Y = 90 \text{ kg} / \text{m}^3$$

- **Brique réfractaire broyée 10%, 20%, 30% :**

$$900\text{kg} / \text{m}^3 \longrightarrow 100 \%$$

$$Z_1 \longrightarrow 10 \%$$

$$Z_1 = 90 \text{ kg} / \text{m}^3$$

- Pour 20% de brique réfractaire :

$$Z_2 = 180\text{kg} / \text{m}^3$$

- Pour 30% de brique réfractaire :

$$Z_3 = 270\text{kg} / \text{m}^3$$

- **Eau totale :**

$$\text{On a : } E / L = 0.25 \longrightarrow (L = C + F)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C : \text{Ciment} = 810\text{kg} / \text{m}^3 \\ F : \text{Sable oued finement broyé} = 90 \text{ kg} / \text{m}^3 \end{array} \right.$$

$$E = 0.25 * (810+90)$$

$$E = 225 \text{ L}$$

## Partie pratique

---

- **Superplastifiant :**

Après détermination de point de saturation des trois superplastifiants cités déjà en haut, le dosage de ces derniers est de 1% l'équivalent de 9 kg/ m<sup>3</sup> par rapport du dosage de ciment

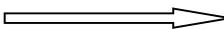
- **Sika® viscocrete® Tempo 12**

➤ L'extrait sec est de 30% d'où la quantité d'eau est de l'ordre de 70 %

**Densité = 1.02**

**Volume= 9/1.02      V = 8.82 L**

➤ La quantité d'eau contenant le superplastifiant est :

1L       0.7

8.82 L       X

**X= 6.17 L**

Eau = 225 – 6.17

**Eau = 218.83 L**

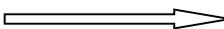
- **SIKAFLUIDE**

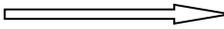
➤ L'extrait sec est de 40% d'où la quantité d'eau est de l'ordre de 60 %

**Densité = 1.20**

**Volume= 9/ 1.20      V = 7.5 L**

➤ La quantité d'eau contenant le superplastifiant est :

1L       0.6

7.5 L       X

**X= 4.5 L**

Eau = 225 – 4.5

**Eau = 220.5 L**

## Partie pratique

- **Fibres naturelle alfa :**

900 kg / m<sup>3</sup>  $\longrightarrow$  100%  
 Z  $\longrightarrow$  0.5 %

**Z = 4.5 kg / m<sup>3</sup>**

**Tableau IV.15 :** Formulation à base de TEMPO 12

Constituants Echantillons	Ciment (kg)	Sable (kg)	Eau (L)	Sable broyé (kg)	Brique Réfractaire (kg)	Fibre Alfa (kg)	Tempo 12 (kg)
<b>Béton T</b>	<b>900</b>	<b>863</b>	<b>288.83</b>	<b>280</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>9</b>
<b>BFUP 10% SB</b>	<b>810</b>	<b>863</b>	<b>218.83</b>	<b>90</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>9</b>
<b>BFUP 10% BR</b>	<b>810</b>	<b>863</b>	<b>218.83</b>	<b>-</b>	<b>90</b>	<b>-</b>	<b>9</b>
<b>BFUP 20% BR</b>	<b>720</b>	<b>863</b>	<b>218.83</b>	<b>-</b>	<b>180</b>	<b>-</b>	<b>9</b>
<b>BFUP 30% BR</b>	<b>630</b>	<b>863</b>	<b>218.83</b>	<b>-</b>	<b>270</b>	<b>-</b>	<b>9</b>

## Partie pratique

### IV.1.4. Composition du BFUP

**Tableau IV.16 : Formulation à base de Sikafluide**

Constituants Echantillons	Ciment (kg)	Sable (kg)	Eau (L)	Sable broyé (kg)	Brique Réfractaire (kg)	Fibre Alfa (kg)	Sika Fluide (kg)
<b>Béton T</b>	<b>900</b>	<b>863</b>	<b>290.5</b>	<b>280</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>9</b>
<b>BFUP 10% SB</b>	<b>810</b>	<b>863</b>	<b>220.5</b>	<b>90</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>9</b>
<b>BFUP 10% BR</b>	<b>810</b>	<b>863</b>	<b>220.5</b>	<b>-</b>	<b>90</b>	<b>-</b>	<b>9</b>
<b>BFUP 20% BR</b>	<b>720</b>	<b>863</b>	<b>220.5</b>	<b>-</b>	<b>180</b>	<b>-</b>	<b>9</b>
<b>BFUP 30% BR</b>	<b>630</b>	<b>863</b>	<b>220.5</b>	<b>-</b>	<b>270</b>	<b>-</b>	<b>9</b>

**Tableau IV.17 : Formulation à base de mélange (TEMPO 12 /SIKAFLUID)**

Constituants Echantillons	Ciment (kg)	Sable (kg)	Eau (L)	Sable broyé (kg)	Brique Réfractaire (kg)	Fibre Alfa (kg)	Mélange SP1+SP 2 (50/50) % (kg)
<b>Béton T</b>	<b>900</b>	<b>863</b>	<b>289.79</b>	<b>280</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>9</b>
<b>BFUP 10% SB</b>	<b>810</b>	<b>863</b>	<b>219.79</b>	<b>90</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>9</b>
<b>BFUP 10% BR</b>	<b>810</b>	<b>863</b>	<b>219.79</b>	<b>-</b>	<b>90</b>	<b>-</b>	<b>9</b>
<b>BFUP 20% BR</b>	<b>720</b>	<b>863</b>	<b>219.79</b>	<b>-</b>	<b>180</b>	<b>-</b>	<b>9</b>
<b>BFUP 30% BR</b>	<b>630</b>	<b>863</b>	<b>219.79</b>	<b>-</b>	<b>270</b>	<b>-</b>	<b>9</b>

## Partie pratique

**Tableau IV.18 :** Formulation avec fibre alfa à base de mélange (TEMPO 12 /SIKAFLUID)

Constituants Echantillons	Ciment (kg)	Sable (kg)	Eau (L)	Sable broyé (kg)	Brique Réfractaire (kg)	Fibre Alfa (kg)	Mélange SP1+SP 2 (50/50) % (kg)
	Béton T + 0.5% fibre	900	863	289.79	280	-	4.5
BFUP 10% BR + 0.5% fibre	810	863	219.79	-	90	4.5	9
BFUP 30% BR + 0.5% fibre	630	863	219.79	-	270	4.5	9

### IV.1.5.Le Malaxage

Le malaxage a été réalisé avec un malaxeur de laboratoire pour mortier 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.H.C.C » unité de OUED SMAR.



**Figure IV.11 :** Malaxeur de mortier

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

### IV.1.6. Le mode de malaxage

Dans notre travail on a procédé avec le mode suivant :

- ❖ Mélanger à sec de tous les matériaux sauf les fibres et l'adjuvant bien sûr, pendant 0.5 min, avec la vitesse lente.
- ❖ Deux tiers d'eau sont ajoutés et malaxés pendant 1.5 min aussi, avec la même vitesse.
- ❖ Le troisième tiers d'eau est mélangé avec l'adjuvant, puis le mélange est subdivisé en deux :
  - La moitié est ajoutée et malaxée pendant 2min encore à vitesse rapide
  - L'autre moitié est malaxée pendant 3 min à vitesse rapide

Ce qui fait un temps global de 6 min.

Cependant, les difficultés rencontrées lors du malaxage se situent au niveau de l'ajout des fibres, ceci nous a conduits à les mélanger manuellement une fois que le malaxage du mortier fut terminé.

### IV.1.7. Le moulage, démoulage et conservation des éprouvettes



**Figure IV.12** : Préparation du BFUP dans le moule prismatique 4x4x16 cm

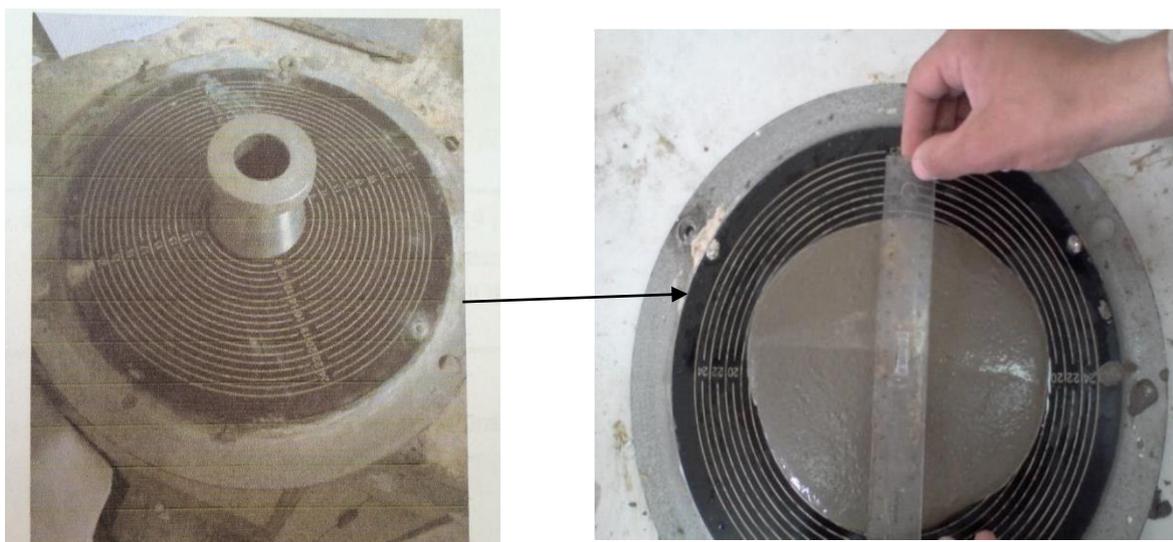
Des moules normalisés de 4x4x16 cm sont remplis avec le mortier issu du malaxeur, vibrés sur une table de secousse puis conservés à l'air ambiant.

Après 24 heures, on procède au démoulage et la conservation dans un bain d'eau pour 28 jours.

## IV.2.Caractéristiques physiques et mécaniques du BFUP

### IV.2.1. L'étalement

Les BFUP sont généralement auto-plaçant. Cette propriété est vérifiée par un essai d'étalement qui consiste à remplir de BFUP un moule tronconique dont le diamètre intérieur et la hauteur sont de 50 mm, à retirer le moule puis à mesurer l'étalement du BFUP.



**Figure IV.13 : Etallement à mini conne**

**Tableau IV.19 : Résultats de l'essai d'étalement des différents adjuvants**

Pourcentage Adjuvant	0.2%	0.4%	0.6%	0.8%	1.0%	1.2%	1.4%	1.6%
<b>TEMPO12</b>	8cm	10cm	12cm	15cm	18cm	19cm	18cm	18cm
<b>SIKAFLUID</b>	6cm	9cm	12cm	16cm	16cm	17cm	16cm	16cm
<b>TOMPO12+SIKAFLUID (50/50)%</b>	5cm	7cm	9cm	12cm	15cm	15cm	16cm	15cm

#### Commentaire

L'étalement augmente en augmentant le pourcentage des superplastifiants jusqu'à atteindre le seuil qui est le point de saturation, dont la quantité optimale de chaque superplastifiant est à :

## Partie pratique

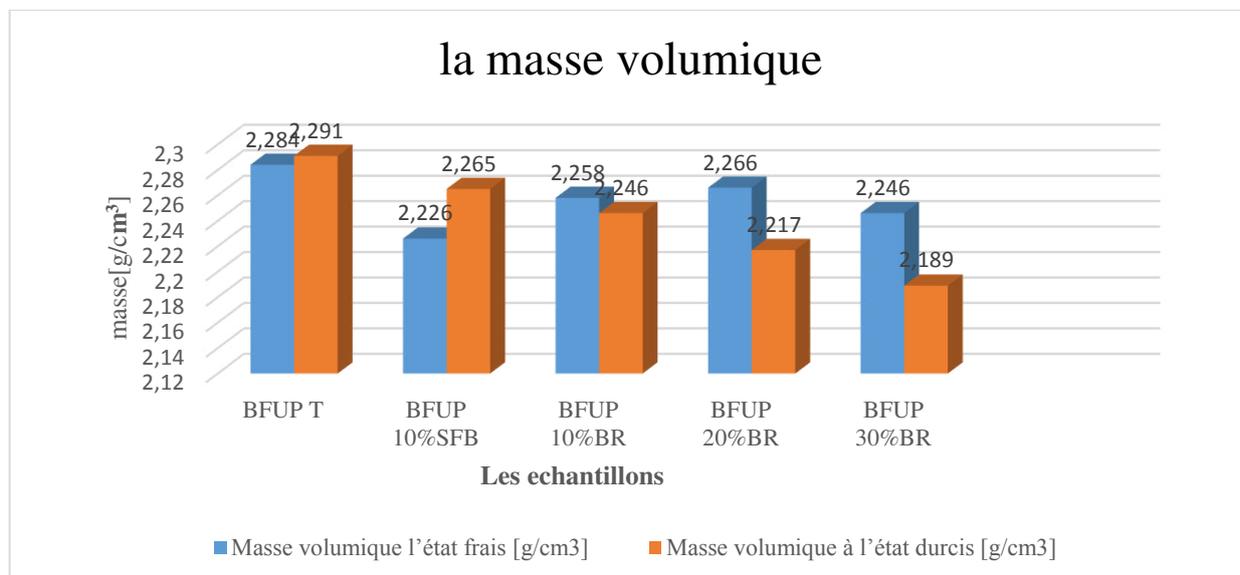
- 1.2% pour TEMPO12
- 1.2% pour SIKAFUID
- 1.4% pour le mélange TEMPO12 et SIKAFUID

### IV.2.2.Masse volumique

Cette mesure détermine le rendement volumique (le rapport de la masse sur le volume) de la composition de béton frais et durcis et permet de vérifier la validité de la formulation théorique.

**Tableau IV.20** : Masse volumique à l'état frais et durcis des différentes formulations

Echantillon Caractéristique	BFUP T	BFUP 10% SFB	BFUP 10% BR	BFUP 20% BR	BFUP 30% BR
Masse volumique à l'état frais [g/cm <sup>3</sup> ]	2.284	2.226	2,258	2,266	2,246
Masse volumique à l'état durcis [g/cm <sup>3</sup> ]	2,291	2,265	2,246	2,217	2.189



**Figure IV.14** : Masse volumique à l'état frais et durcis des différents mortiers

### Commentaire

D'après la figure précédente (figure IV.14), on constate que l'augmentation de la quantité de brique réfractaire fait diminuer la masse volumique quel que soit l'état du mortier (frais ou durci)

#### IV.2.3. La porosité & l'absorption

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

- On a pesé les éprouvettes séchées M1
- Les éprouvettes sont immergées pendant 48h dans l'eau
- Elles sont essuyées superficiellement et puis pesées M2

##### A- La porosité

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

$$\phi = \frac{V_{\text{vide}}}{V_{\text{total}}}$$

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

$$\rho = \frac{m}{v} \Rightarrow v = \frac{m}{\rho}$$

m : la masse de l'eau, elle est calculée par la formule  $M_h - M_s$

$M_h$  : la masse humide

$M_s$  : la masse sèche

**Tableau IV.21 : Porosité de BFUHP à base des différents adjuvants**

Echantillon Superplastifiant	BFUP T (%)	BFUP 10% SFB (%)	BFUP 10% BR (%)	BFUP 20% BR (%)	BFUP 30% BR (%)
<b>TEMPO 12</b>	<b>0.431</b>	<b>0.274</b>	<b>0.781</b>	<b>0.625</b>	<b>0.507</b>
<b>SIKA FLUID</b>	<b>0.687</b>	<b>0.395</b>	<b>0.834</b>	<b>0.743</b>	<b>0.687</b>
<b>TEMPO12+SIKAFLUID (50/50)%</b>	<b>0.985</b>	<b>0.861</b>	<b>1.26</b>	<b>1.14</b>	<b>1.04</b>

### Commentaire

Le tableau (IV.21), montre que la porosité diminue avec l'augmentation du pourcentage du déchet dans le cas des adjuvants Tempo 12 et Sikafluid utilisés séparément ainsi que dans le cas du mélange des deux superplastifiants. La porosité est réduite pour les variantes élaborées à base de sable des dunes par substitution au ciment.

### B- L'absorption

L'absorption se calcule selon la formulation :

**M1** : la masse sèche

**M2** : la masse humide

Les résultats sont inscrits dans le tableau suivant :

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

**Tableau IV.22** : Résultats de L'absorption(%) à base de différents superplastifiants

<b>Echantillons</b> <b>Superplastifiants</b>	<b>BFUP T</b>	<b>BFUP</b> <b>10% SFB</b>	<b>BFUP</b> <b>10% BR</b>	<b>BFUP</b> <b>20% BR</b>	<b>BFUP</b> <b>30% BR</b>
<b>TOMPO12</b>	<b>1.19</b>	<b>2.79</b>	<b>2.24</b>	<b>2.13</b>	<b>4.34</b>
<b>SIKAFLUID</b>	<b>1.77</b>	<b>1.82</b>	<b>2.12</b>	<b>2.64</b>	<b>2.97</b>
<b>TOMPO12+SIKAFLUID</b> <b>(50/50)%</b>	<b>2.82</b>	<b>1.36</b>	<b>1.95</b>	<b>2.08</b>	<b>2.12</b>

### Commentaire

D'après ce tableau(IV.22), on remarque que l'absorption d'eau augmente avec le pourcentage du déchet de briques et les variantes fabriquées à l'aide de sable sont moins affines à l'eau.

## IV.3.Caractéristiques Mécaniques des Mortiers Confectionnés

### IV.3.1.Sans Fibre

#### IV.3.1.1.Résistance à la flexion



**Figure IV.15** :L'appareil de flexion

Les essais de flexion sont réalisés sur l'appareil de flexion en plaçant l'éprouvette symétrique et centrée sur le plateau de la presse hydraulique pourvu d'un dispositif de flexion trois points puis une charge continue est appliquée sur l'éprouvette jusqu'à la rupture.

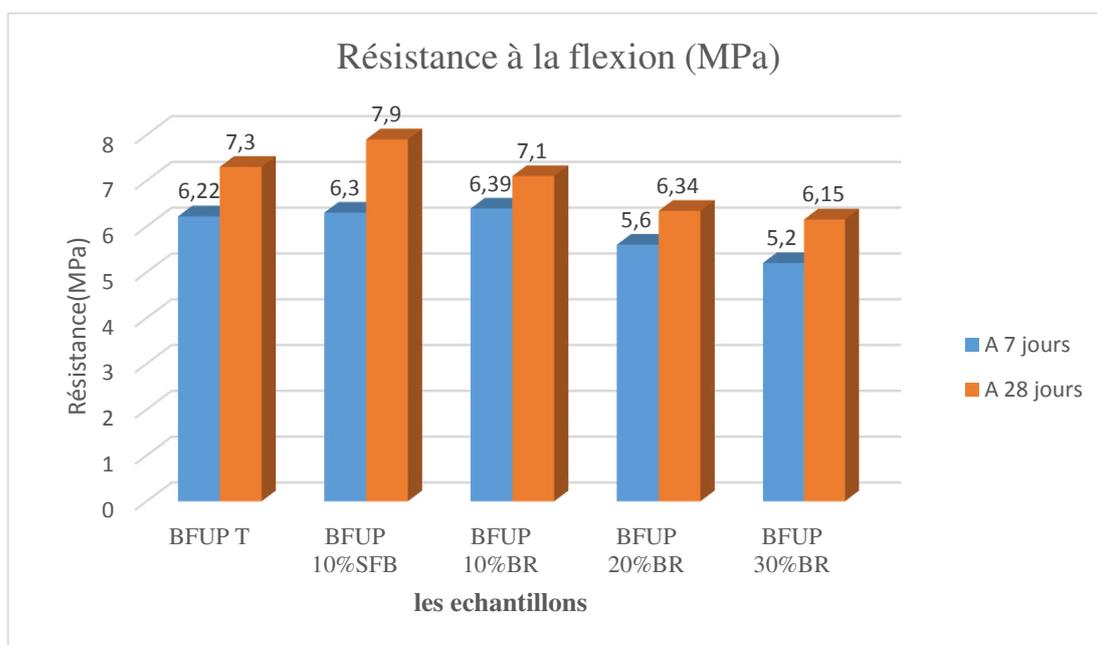
## Partie pratique

La charge P en KN et la résistance à la flexion  $R_f$  en MPa sont affichées sur l'écran de l'appareil où l'on effectue la lecture.

Le tableau suivant présente les résultats de la résistance mécanique (7 et 28 jours) à la flexion de différentes combinaisons des éprouvettes confectionnées.

**Tableau IV.23** : Résistance de flexion de différentes formulations à base de TEMPO 12

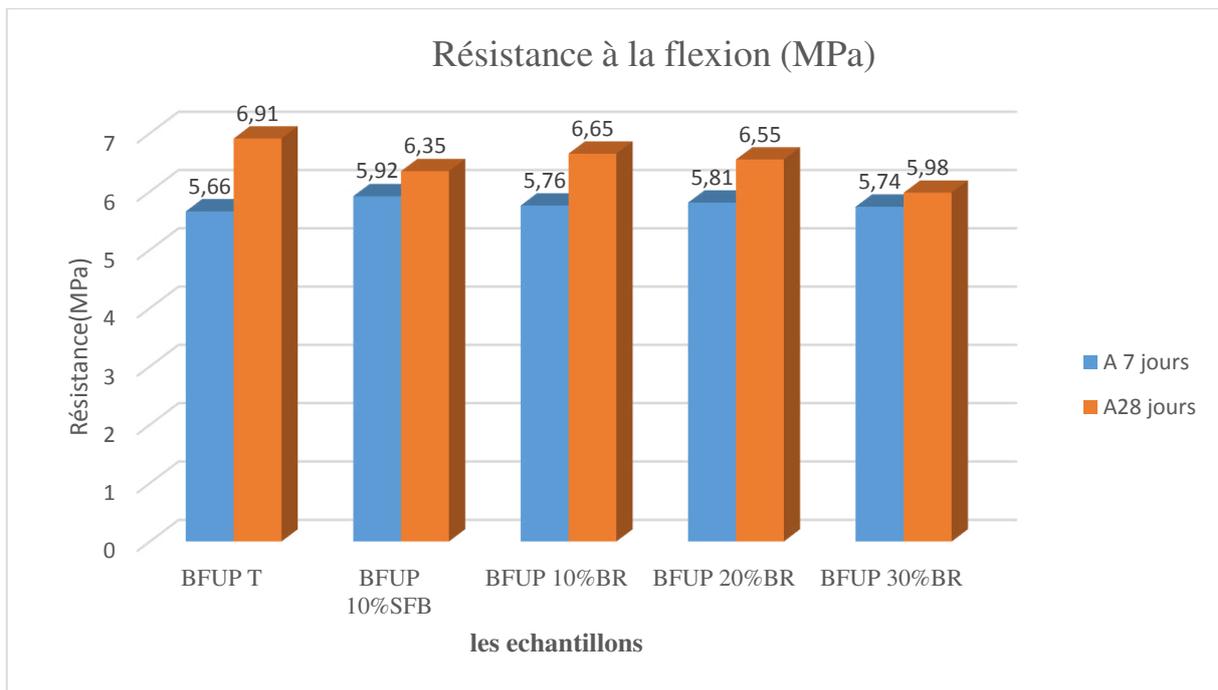
Résistance Echantillons	Résistance à la flexion (MPa)	
	A 7 jours	A 28 jours
<b>BFUP T</b>	<b>6.22</b>	<b>7.30</b>
<b>BFUP 10% SFB</b>	<b>6.30</b>	<b>7.90</b>
<b>BFUP 10% BR</b>	<b>6.39</b>	<b>7.10</b>
<b>BFUP 20% BR</b>	<b>5.60</b>	<b>6.34</b>
<b>BFUP 30% BR</b>	<b>5.20</b>	<b>6.15</b>



**Figure IV.16** : Résistance à la flexion des différentes formulations à base de TEMPO 12

**Tableau IV.24** : Résistance à la flexion de différentes formulations à base de SIKAFLLUID

Résistance Echantillons	Résistance à la flexion (MPa)	
	A 7 jours	A 28 jours
<b>BFUP T</b>	<b>5.66</b>	<b>6.91</b>
<b>BFUP 10% SFB</b>	<b>5.92</b>	<b>6.35</b>
<b>BFUP 10% BR</b>	<b>5.76</b>	<b>6.65</b>
<b>BFUP 20% BR</b>	<b>5.81</b>	<b>6.55</b>
<b>BFUP 30% BR</b>	<b>5.74</b>	<b>5.98</b>

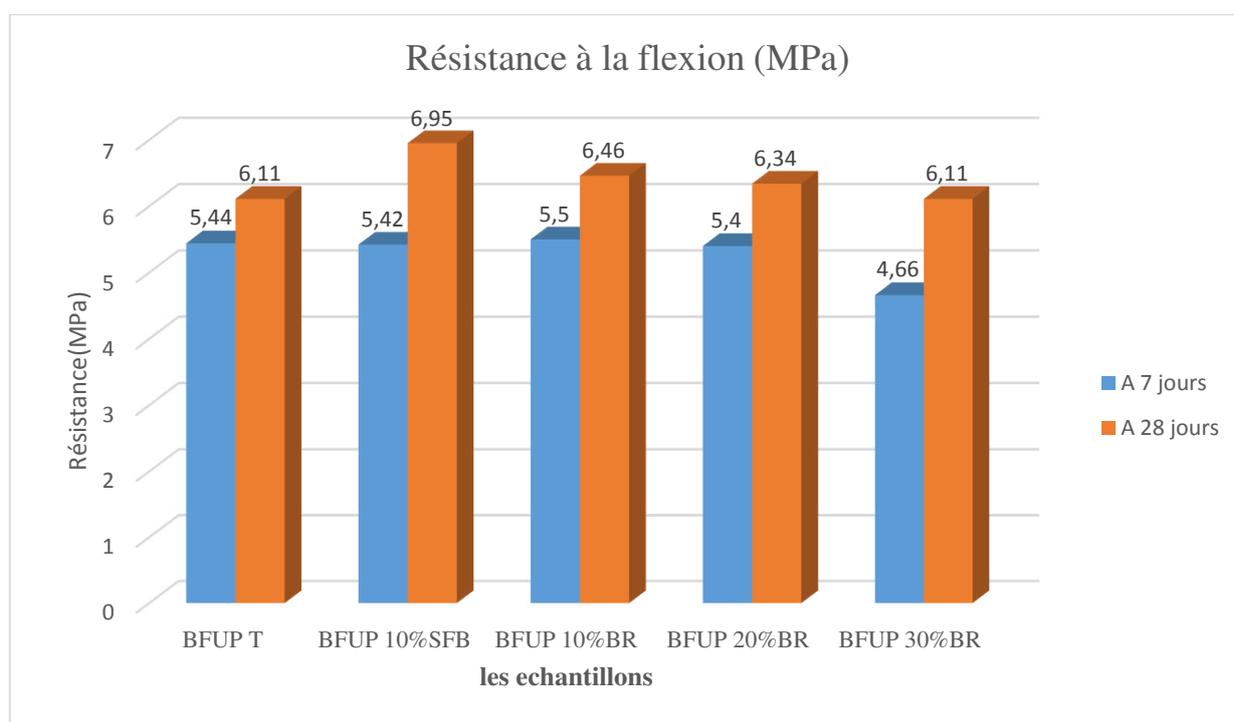


**Figure IV.17** : Résistance à la flexion de différentes formulations à base de SIKAFLLUID

## Partie pratique

**Tableau IV.25** : Résistance à la flexion des différentes formulations à base de mélange de TEMPO 12+SIKAFLUID (50/50)%

Résistance Echantillons	Résistance à la flexion (MPa)	
	A 7 jours	A 28 jours
<b>BFUP T</b>	<b>5.44</b>	<b>6.11</b>
<b>BFUP 10% SFB</b>	<b>5.42</b>	<b>6.95</b>
<b>BFUP 10% BR</b>	<b>5.50</b>	<b>6.46</b>
<b>BFUP 20% BR</b>	<b>5.4</b>	<b>6.34</b>
<b>BFUP 30% BR</b>	<b>4.66</b>	<b>6.11</b>



**Figure IV.18** : Résistance à la flexion des différentes formulations à base de mélange de TEMPO 12+SIKAFLUID (50/50)%

### Interprétation

D'après les figures (IV.16, 17,18), on remarque que les résistances des BFUP à la traction par flexion diminuent en fonction du taux de substitution du ciment par la poudre de déchet de brique réfractaire pour les trois adjuvants. On peut noter aussi que la meilleure variante est obtenue pour le taux de 10 % de sable et de déchet pour les trois adjuvants. Les BFUP élaborés à l'aide de l'adjuvant Tempo 12 donnent de meilleures résistances à la flexion trois points par rapport aux deux autres SIKAFUID et mélange de (TEMPO12 + SIKAFUID (50/50)).

#### IV.3.1.2. Résistance à la compression



**Figure IV.19** : L'appareil de compression

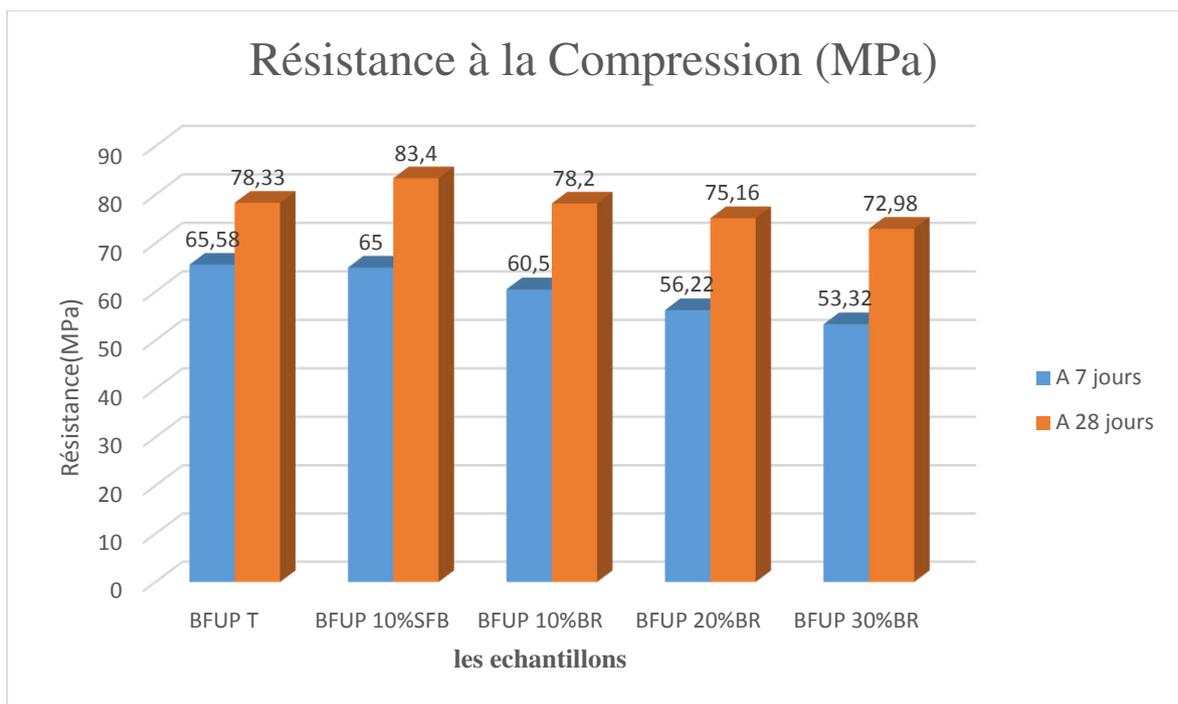
La résistance à la compression des mortiers a été évaluée sur les demi-prismes issus de la flexion trois-points. Le demi-prisme est centré entre les deux plateaux de l'appareil TONICOMP et un chargement est effectué à une vitesse constante de 0.5 KN/s jusqu'à la rupture.

On effectue la lecture de la charge d'écrasement  $P$  en KN et la résistance à la compression  $R_c$  en MPa sur l'écran de l'appareil. Les résistances à la compression des différentes combinaisons des mortiers confectionnés sont illustrées dans les tableaux suivants

## Partie pratique

**Tableau IV. 26** : Résistance à la compression de différentes formulations à base de TEMPO 12

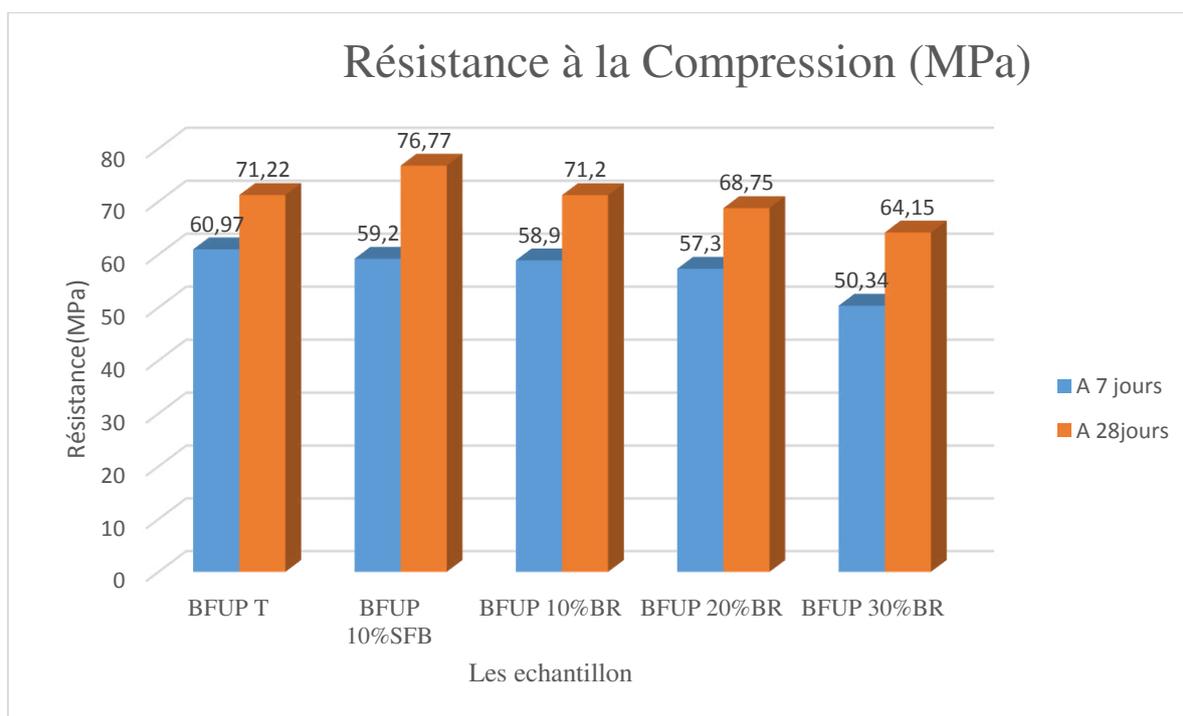
Résistance Echantillons	Résistance à la Compression (MPa)	
	A 7 jours	A 28 jours
<b>BFUP T</b>	<b>65.58</b>	<b>78.33</b>
<b>BFUP 10% SFB</b>	<b>65</b>	<b>83.4</b>
<b>BFUP 10% BR</b>	<b>60.5</b>	<b>78.2</b>
<b>BFUP 20% BR</b>	<b>56.22</b>	<b>75.16</b>
<b>BFUP 30% BR</b>	<b>53.32</b>	<b>72.98</b>



**Figure IV.20** : Résistance à la compression des différentes formulations à base de TEMPO 12

**Tableau IV.27** : Résistance à la compression de différentes formulations à base de SIKAFUID

Résistance Echantillons	Résistance à la Compression (MPa)	
	A 7 jours	A 28 jours
<b>BFUP T</b>	<b>60.97</b>	<b>71.22</b>
<b>BFUP 10% SFB</b>	<b>59.2</b>	<b>76.77</b>
<b>BFUP 10% BR</b>	<b>58.9</b>	<b>71.2</b>
<b>BFUP 20% BR</b>	<b>57.3</b>	<b>68.75</b>
<b>BFUP 30% BR</b>	<b>50.34</b>	<b>64.15</b>

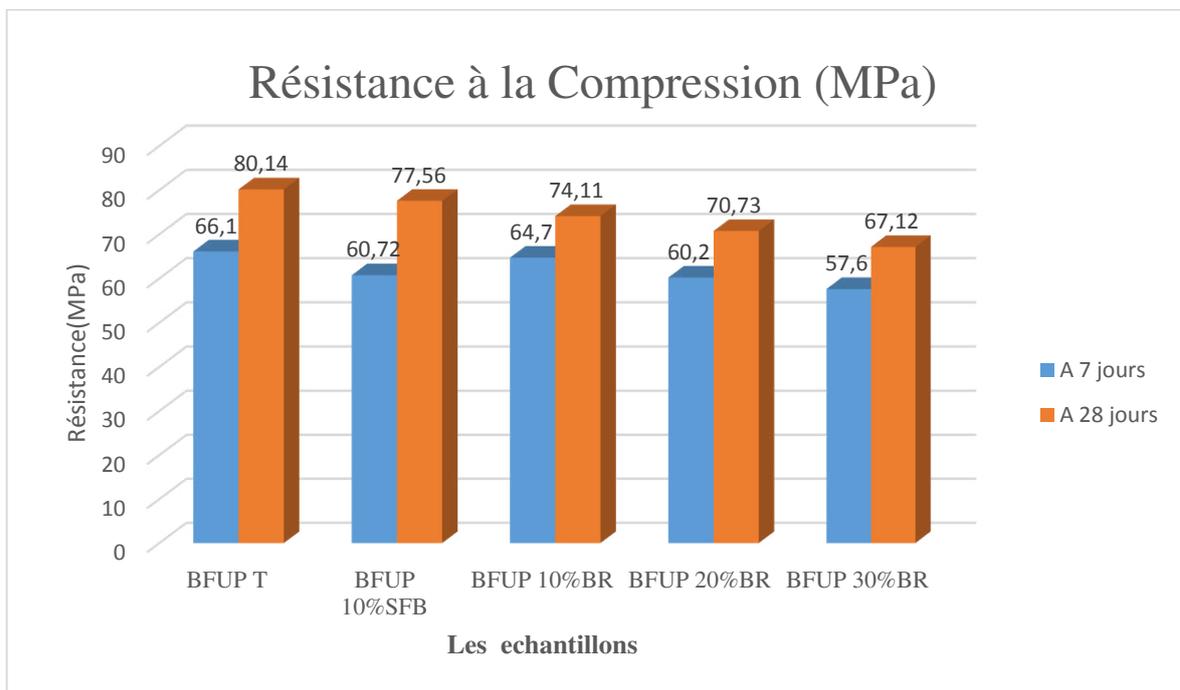


**Figure IV.21** : Résistance à la compression des différentes formulations à base de SIKAFUID

## Partie pratique

**Tableau IV.28** : Résistance à la compression des différentes formulations à base de TEMPO  
12+SIKAFLUID (50/50)%

Résistance Echantillons	Résistance à la Compression (MPa)	
	A 7 jours	A 28 jours
<b>BFUP T</b>	<b>66.1</b>	<b>80.14</b>
<b>BFUP 10% SFB</b>	<b>60.72</b>	<b>77.56</b>
<b>BFUP 10% BR</b>	<b>64.7</b>	<b>74.11</b>
<b>BFUP 20% BR</b>	<b>60.2</b>	<b>70.73</b>
<b>BFUP 30% BR</b>	<b>57.6</b>	<b>67.12</b>



**Figure IV.22** : Résistance à la compression des différentes formulations à base de TEMPO  
12+SIKAFLUID (50/50)%

### Interprétation

L'essai de compression est une référence pour qualifier la résistance mécanique des BFUP ou des bétons.

La règle principale de la résistance mécanique des BFUP est directement liée au rapport (E/C), c'est-à-dire un faible rapport conduit à une faible porosité donc une grande compacité et par conséquent une résistance mécanique élevée.

On peut faire la même constatation que pour les résistances à la flexion, il apparaît que les meilleures variantes sont obtenues pour l'adjuvant Tempo 12 et les taux de substitution du ciment de 10 % que se soit de sable des dunes ou de brique réfractaire.

### IV.3.2. Avec les fibres

#### IV.3.2.1. Traction des fibres alfa :

Les essais mécaniques sont des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportement des matériaux.

Cette expérience pour déterminer les propriétés mécaniques de type de fibre alfa (alfa traité chimiquement)

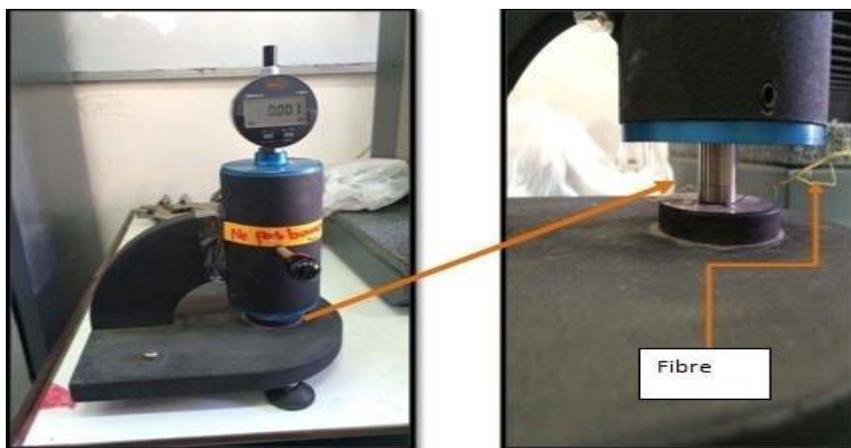
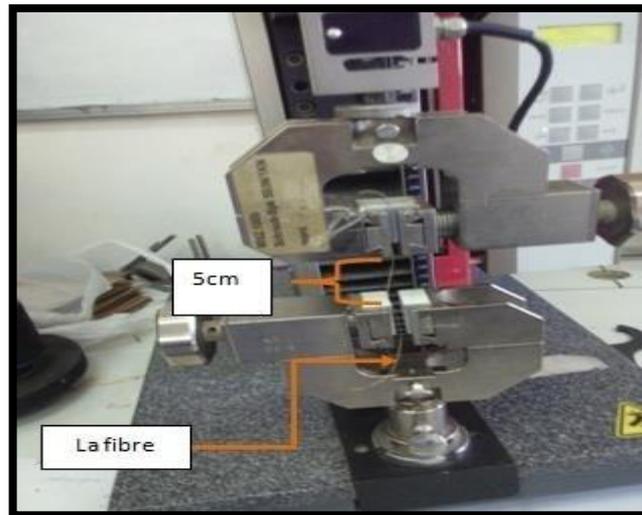


Figure IV.23 : mesure d'épaisseur de la fibre



**Figure IV.24 :** appareil de traction de la fibre

Les fibres supportent presque la totalité de l'effort axial. Par conséquent, elles contribuent essentiellement à la rigidité du composite et contrôlent le processus de sa rupture.

On a fait plusieurs essais de traction sur le type de fibre alfa (alfa traité chimiquement).

### **IV.3.2.2. Fibre alfa traité chimiquement :**

Les résultats de traction de la fibre alfa traitée chimiquement sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.29 :** Propriétés mécaniques de la fibre alfa traitée chimiquement.

<b>Contrainte (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>266,09</b>
<b>Rupture (%)</b>	<b>2,66</b>
<b>Module de Young (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>9765,67</b>

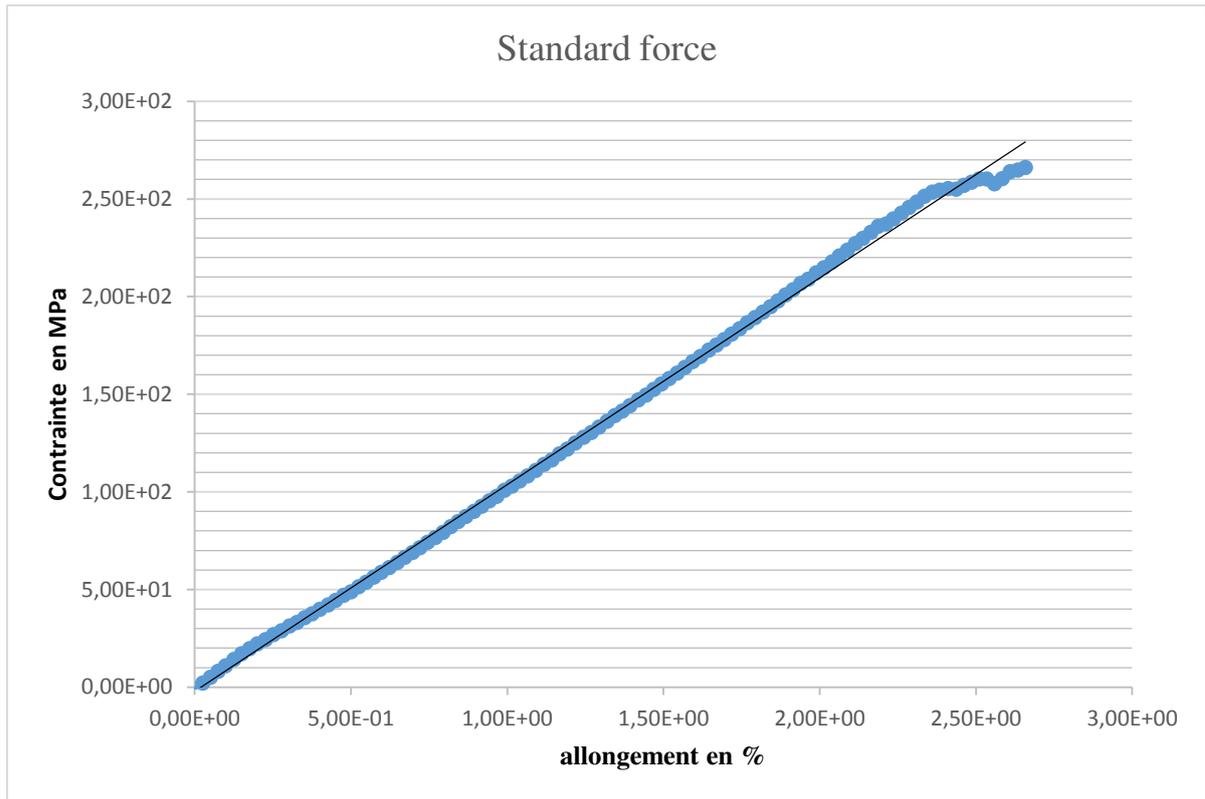
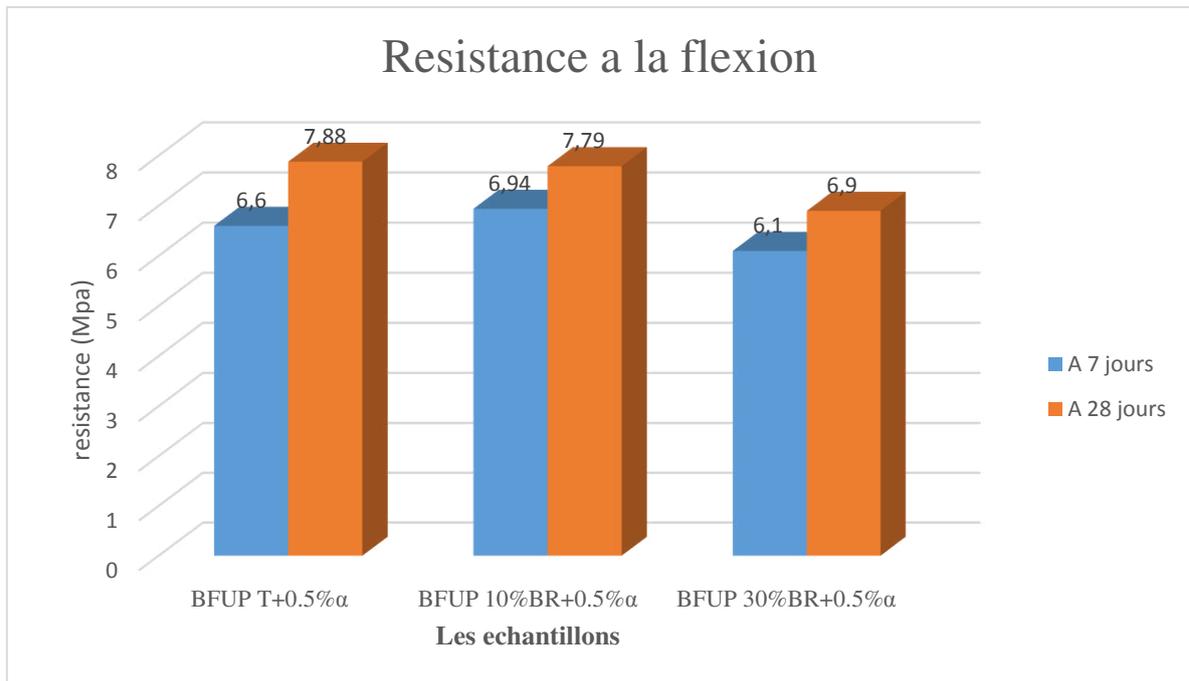


Figure IV.25 : Variation de la contrainte en fonction de l’allongement de la fibre alfa obtenue par traitement chimique

### IV.3.2.3. Résistance à la flexion

Tableau IV.30 : Résistance à la flexion des différentes formulations à base de TEMPO  
12+SIKAFLUID (50/50)% +0.5%  $\alpha$

Résistance Echantillons	Résistance à la flexion (MPa)	
	A 7 jours	A 28 jours
BFUP T+0.5% $\alpha$	6.60	7.88
BFUP 10% BR+0.5% $\alpha$	6.94	7.79
BFUP 30% BR+0.5% $\alpha$	6.10	6.90

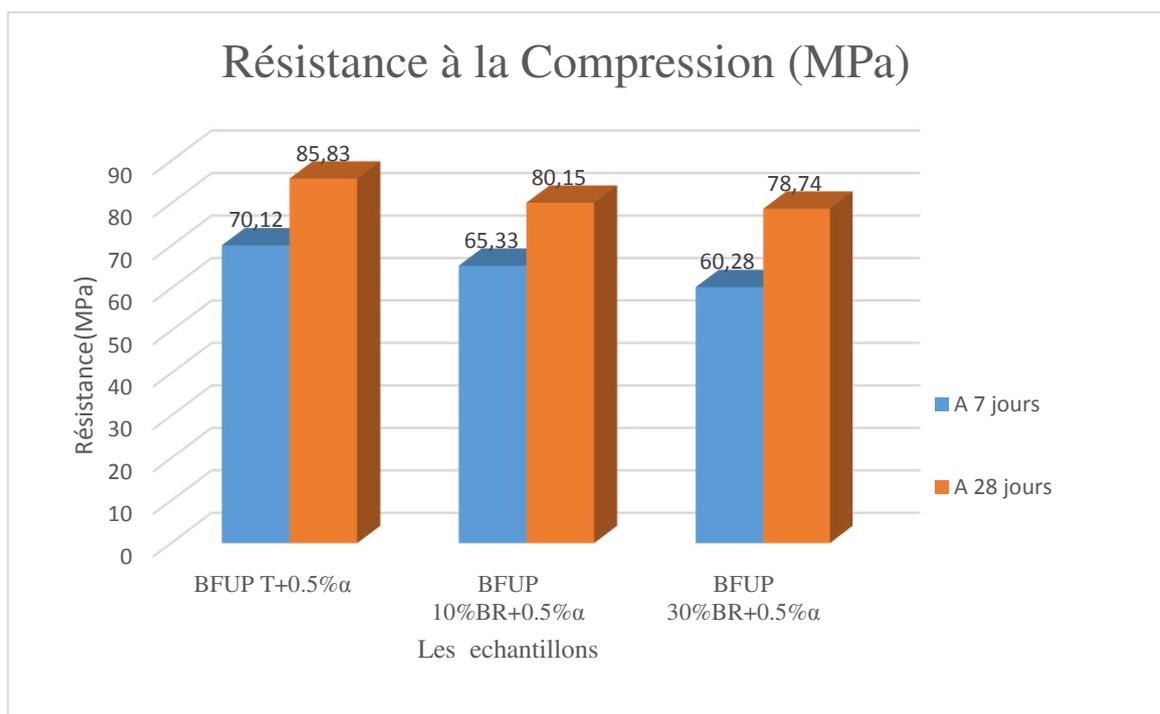


**Figure IV.26** : Résistance à la flexion des différentes compositions à base de TEMPO 12+SIKAFLUID (50/50)%

#### IV.3.2.4. Résistance compression

**Tableau IV.31** : Résistance à la compression des différents mortiers à base de TEMPO 12+SIKAFLUID (50/ 50) %+0.5% α

Mortier	Résistance à la compression (MPa)	
	A 7 jours	A 28 jours
BFUP T+0.5%α	70.12	85.83
BFUP 10%BR+0.5%α	75.33	88.15
BFUP 30%BR+0.5%α	70.28	78.47



**Figure IV.27** : Résistance à la compression des différentes formulations à base de TEMPO 12+SIKAFLUID (50/ 50) %+0.5% α

### Interprétation

D'après les figures (IV.26) et (IV.27), les résistances mécaniques des différentes compositions on remarque qu'elles dépendent de la nature et de la quantité d'ajout substitué au ciment. En effet ces résistances sont optimales avec le taux de substitution du ciment par 10% de brique réfractaire (Compression (88.15MPa) et flexion (7.79Mpa)).

On remarque aussi que les fibres apportent une amélioration des performances de ces BFUP et contribuent à une augmentation de la ductilité.

L'ajout de superplastifiant augmente les résistances mécaniques d'une façon remarquable grâce à son action sur les particules de ciment, qui permet d'éviter l'agglomération de ce dernier et de libérer l'eau emprisonnée dans ces agglomérats

La substitution de ciment par le déchet de brique réfractaire (finement broyée) conduit à une diminution des résistances mécaniques à court terme.

On remarque aussi que le TEMPO12 et le mélange avec SIKAFUID (50/50) % améliore mieux la compacité des mortiers par rapport à SIKAFUID.

Le rapport (E/C) joue un rôle important sur la variation des résistances mécanique mais aussi les fines particules qui comblent les vides dans la matrice et donnent une bonne compacité.

D'après les résultats obtenus on peut déduire que la substitution de ciment par le déchet de brique réfractaire influe négativement sur les caractéristiques mécaniques (diminue la résistance) des BFUP jusqu'à un certain seuil, dans notre cas la substitution de 10% par le déchet donne de bonnes résistances mécaniques. Ceci a un impact économique, écologique et scientifique.

### ❖ TROISIEME PARTIE

#### IV. Traitement thermique

##### IV.1. But du traitement thermique

L'effet de la température va entraîner une modification des composants de notre BFUP (pâte de ciment, sable, déchets de brique et le superplastifiant.) ainsi que sa structure. D'un point de vue macroscopique, il en résulte une modification des propriétés structurales et thermiques.

##### IV.2. Essai de microscope de chauffe

On a réalisé le test au microscope de chauffe où un petit cube de dimension 4x4x4 mm de deux compositions a été préparé puis introduit dans le microscope de chauffe doté d'une caméra, des photographies ont été prises marquant l'état des échantillons à des températures variables.

## Partie pratique

**Tableau IV.32** : Analyse thermique sur le microscope de chauffe (Echantillon 01 BFUPT + 0.5%  $\alpha$ )

<b>Code échantillon : BFUP T +0.5% <math>\alpha</math></b>	
<b>Température°C</b>	<b>Etat de produit</b>
<b>20</b>	<b>Etat initial</b>
<b>1250</b>	<b>Aucun changement d'état</b>
<b>1260</b>	<b>Début de retrait</b>
<b>1270</b>	<b>Retrait</b>
<b>1310</b>	<b>Début de fusion</b>
<b>1320</b>	<b>Fusion totale</b>

**Tableau IV.33** : Analyse thermique sur le microscope de chauffe (ECHANTILLON 02 :BFUP30%BR +0.5% $\alpha$ )

<b>Code échantillon : BFUP T +0.5% <math>\alpha</math></b>	
<b>Température°C</b>	<b>Etat de produit</b>
<b>20</b>	<b>Etat initial</b>
<b>1250</b>	<b>Aucun changement d'état</b>
<b>1260</b>	<b>Début de retrait</b>
<b>1280</b>	<b>Retrait</b>
<b>1340</b>	<b>Début de fusion</b>
<b>1350</b>	<b>Fusion totale</b>

### Interprétation

D'après les résultats représentés dans les tableaux (IV.32 et IV.33), on remarque que toutes les éprouvettes élaborées à base de déchet de brique réfractaire et de sable des dunes présentent des résistances thermiques importantes (Début de fusion à 1340 et 1310C°).

L'emploi de déchet de brique réfractaire par substitution au ciment dans les BFUP a permis également d'améliorer les résistances du béton, grâce à sa grande finesse qui contribue à une grande compacité (substitution autour de 10 à 15% de la quantité du ciment).

Les résistances mécaniques du BFUP varient en fonction de la densité du déchet de brique réfractaire. Donc plus ce dernier est dense, plus les performances mécaniques du BFUP augmentent.

Les déchets de briques réfractaires finement broyées 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,...

Pour compléter cette étude, il est recommandé de faire une analyse ATD-ATG à une température allant jusqu'à 1500 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.

### Conclusion générale

Les bétons fibrés à ultra haute 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. Notre travail pratique nous a permis d'étudier l'influence de substituer le ciment par les fillers de déchet de brique réfractaire et de sable des dunes, la nature du superplastifiant sur la formulation, les propriétés rhéologiques, physico-mécaniques et thermiques des BFUP. 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 cette étude, il ressort les points suivants :

- les résistances des BFUP à la traction par flexion diminuent en fonction du taux de substitution du ciment par la poudre de déchet de brique réfractaire pour les trois adjuvants. On peut noter aussi que la meilleure variante est obtenue pour le taux de 10 % de sable et de déchet pour les trois adjuvants. Les BFUP élaborés à l'aide de l'adjuvant Tempo 12 donnent de meilleures résistances à la flexion trois points par rapport aux deux autres Sikafluid et mélange de (Tempo12 + Sikafluid (50/50)).
- Les résistances à la compression suivent la même tendance que la flexion trois points et il apparaît clairement que les meilleures variantes sont obtenues pour l'adjuvant Tempo 12 et les taux de substitution du ciment de 10 % que se soit de sable des dunes ou de brique réfractaire.
- Les résistances mécaniques des différentes compositions dépendent de la nature et de la quantité d'ajout substitué au ciment. En effet ces résistances sont optimales avec le taux de substitution du ciment par 10% de brique réfractaire et de sable des dunes.

## Conclusion générale

---

- Les fibres apportent une amélioration des performances de ces BFUP et contribuent à une meilleure de la ductilité.
- L'ajout de superplastifiant augmente les résistances mécaniques d'une façon remarquable grâce à son action sur les particules de ciment, qui permet d'éviter l'agglomération de ce dernier et de libérer l'eau emprisonnée dans ces agglomérats. On remarque aussi que le TEMPO12 et le mélange avec SIKAFUID ((50/50) %) améliore mieux la compacité des mortiers par rapport à SIKAFUID. Le rapport (E/C) joue un rôle important sur la variation des résistances mécanique mais aussi les fines particules qui comblent les vides dans la matrice et donnent une bonne compacité.
- D'après les résultats obtenus on peut déduire que la substitution de ciment par le déchet de brique réfractaire influe négativement sur les caractéristiques mécaniques (diminue la résistance) des BFUP jusqu'à un certain seuil, dans notre cas la substitution de 10% par le déchet donne de bonnes résistances mécaniques. L'emploi de déchet de brique réfractaire par substitution au ciment dans les BFUP a permis également d'améliorer les résistances du béton, grâce à sa grande finesse qui contribue à une grande compacité (substitution autour de 10 à 15% de la quantité du ciment).
- Toutes les éprouvettes élaborées à base de déchet de brique réfractaire et de sable des dunes présentent des résistances thermiques importantes (Début de fusion à 1340 et 1310 C°).
- 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 CO<sub>2</sub> dégagée dans l'atmosphère.
- 3- Technico-mécanique : amélioration des propriétés physico-mécaniques et thermiques de ces bétons.

## **Conclusion générale**

---

Pour compléter cette étude, il est recommandé de faire une analyse ATD-ATG à une température allant jusqu'à 1500 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.

# ANNEXE

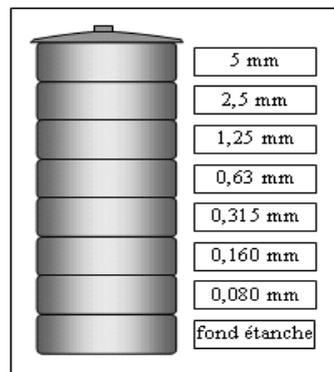
## ANNEXE I

### I. Les essais physico-chimiques et mécaniques des granulats

#### I.1. Analyse granulométrique par voie sèche (sur le sable)

##### a. Principe de l'essai

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



La somme des refus cumulés mesurés sur les différents tamis et du tamisât sur le fond (fillers) doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit en tête de colonne. La perte éventuelle de matériaux pendant l'opération de tamisage ne doit pas excéder plus de 2% du poids total de l'échantillon de départ.

## ANNEXE

Les résultats sont présentés comme suit :

<i>Ouverture</i>	<i>Poids (g)</i>	<i>Teneur en %</i>	<i>MF</i>
<i>Des tamis (mm)</i>	<b>Refus cumulé</b>	<b>Refus cumulé</b>	<b>Tamisa cumulé</b>
<i>4</i>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100</b>
<i>2,5</i>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100</b>
<i>1,25</i>	<b>424</b>	<b>21,2</b>	<b>78,8</b>
<i>0,63</i>	<b>1113</b>	<b>55,65</b>	<b>44,35</b>
<i>0,315</i>	<b>1714</b>	<b>85,7</b>	<b>14,3</b>
<i>0,16</i>	<b>1931</b>	<b>96,55</b>	<b>3,45</b>
<i>0,08</i>	<b>1976</b>	<b>98,8</b>	<b>1,2</b>
<i>Fon du tamis</i>	<b>1998</b>	<b>99,9</b>	<b>0,1</b>

Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Soit R2 la masse du deuxième refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R<sub>n</sub> aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne de tamis est également pesé.

### **b. Description de l'essai**

Le matériau sera séché à l'étuve à une température maximale de 105 °C. On emboîte les tamis les uns sur les autres, dans un ordre tel que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers pour une analyse complémentaire. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage.

Le sable étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci entre en vibration à l'aide de la tamiseuse électrique. Le temps de tamisage varie avec le type de machine utilisé, mais dépend également de la charge de matériau présente sur le tamis et son ouverture.

## ANNEXE II

### II. Détermination de l'équivalent de sable

#### II.1.Principe

L'essai est fait sur un « sable ». On n'utilise que la fraction des granulats passant sous tamis 5 mm Laver l'échantillon, dans des conditions normalisées, et laisser reposer.

#### On distingue

- L'équivalent de sable visuel (ESV)
- L'équivalent de sable avec piston (ESP)

#### II.2. Préparation de l'échantillon

Il faut tamiser au tamis de 5mm, éliminer le refus et recueillir tout le tamisât. Tamiser à sec comporte beaucoup d'inconvénients. Il faut donc tamiser par voie humide, et laver le refus sur le tamis, au-dessus d'un récipient plus grand, on laissera ensuite décanter c'est donc une opération relativement longue.

#### II.3. Mode opératoire

Le matériel et sable tamisé sont supposés préparés :

- Solution lavant dans une bonbonne de 5L à 1m au-dessus des éprouvettes.
- Dispositif sophronique amorcé, et relié au tube laveur.
- Deux éprouvettes propres (on prendra la Moyenne de deux résultats).
- Remplir les éprouvettes jusqu'au 1<sup>er</sup> trait.
- Verser la quantité de sable voulue.
- Éliminer les bulles d'air (frapper contre la paume de la main).
- Laisser reposer 10mn.
- Boucher les éprouvettes, et les agités : mouvement rectiligne, horizontal, sinusoïdale, 20cm d'amplitude, 30 allers et retours en 30s.
- Laver et remplir les éprouvettes, avec le tube laveur.
- Rincer le ronchon, au-dessus de l'éprouvette.

## ANNEXE

-Faire descendre le tube laveur en le faisant tourner entre les doigts : on lave ainsi les parois intérieures de l'éprouvette.

-Laver le sable en piquant la quantité du sable par le tube laveur; afin que toutes les particules fines soit remontées

-Sortir le tube laveur (et fermer le robinet) lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur.

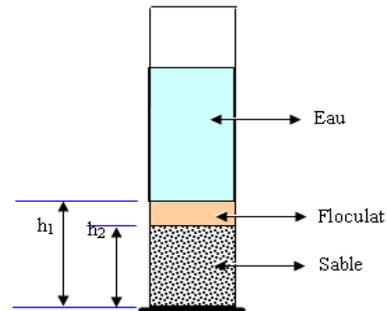
-Laisser reposer 20mn, éviter les vibrations et mesurer

$h_1$  et  $h_2$

Après le temps prescrit, mesurer :

-La hauteur  $h_1$  sable propre + élément fin.

-La hauteur  $h_2$  sable propre seulement par définition, l'équivalent de sable est :



$$ES = (h_2/h_1)100$$

## II.2. Détermination de la masse volumique absolue

### a. Principe de l'essai

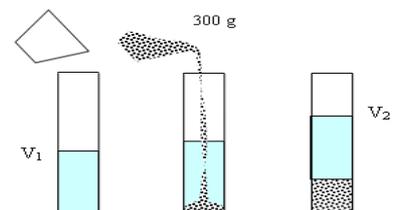
La masse volumique absolue  $\rho_s$  est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Il ne faut pas confondre  $\rho_s$  avec la masse volumique  $\rho$  qui est la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Les masses volumiques s'expriment en t/m<sup>3</sup>, en kg/dm<sup>3</sup>, ou en g/cm<sup>3</sup>.

### b. 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.

-Remplir une éprouvette graduée avec un volume  $V_1$  d'eau ;

-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 ;



## ANNEXE

---

-Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume  $V_2$ . La masse volumique est alors:  $P_S = \frac{M}{V_2 - V_1}$

### ANNEXE III

#### III. 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.



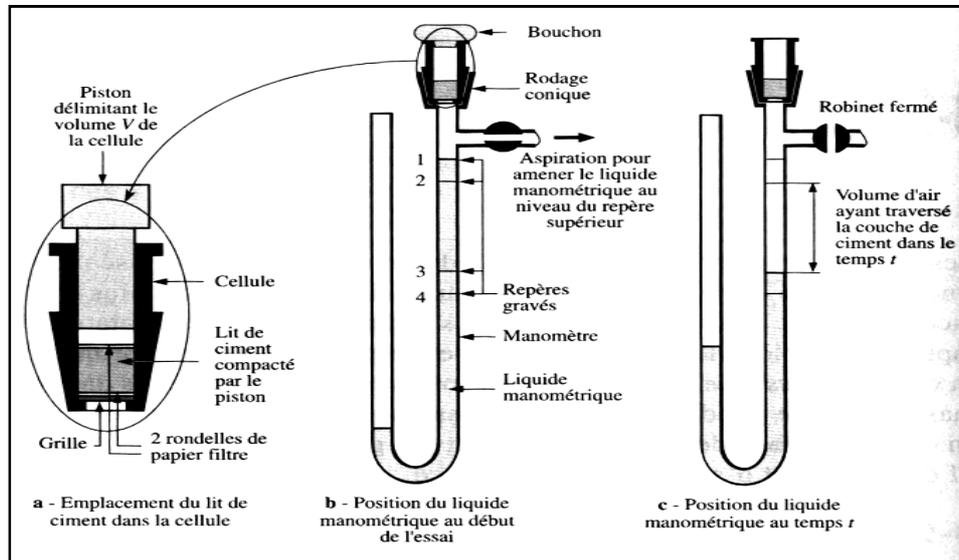
**Figure:** Perméabilimètre de Blaine

#### Spécification du perméabilimètre-Blaine

- la cellule : à un bord supérieur plan et perpendiculaire à son axe, elle s'assemble à l'ajustage par une liaison conique 19/35 ou de dimensions voisines.
- Le piston : son extrémité doit être droit et à bords vifs, il comprend un méplat (prolongé par échancrure à la tête) pour permettre le passage de l'air les tolérances de dimensions doivent faciliter un coulissement dans la cellule.
- La grille est composée de 30 à 40 trous de 1 mm de diamètre.
- La cellule, le piston et la grille sont en métal inoxydable.
- Les disques de papier filtre sont découpés à bord net à partir d'un papier filtre à filtration courante, texture moyenne.
- Le manomètre en (U) est en verre de 1 à 1.5 mm d'épaisseur, il est fixé de préférence en planchette support au moyen d'un collier.

## ANNEXE

- Le liquide effleurant au repos au trait inférieur doit être stable, non volatil et non hygroscopique de faible viscosité et de faible densité (Dibutylphtalate, huile minérale, extra fluide...).



### -Mode opératoire

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.
- En 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 se supporte par le bord supérieur de la cellule.
- Après compression de l'échantillon dans la couche soumise à l'essai et le papier filtre.
- 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

## ANNEXE

---

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.

### -Expression des résultats

La surface spécifique est calculée par la formule suivant :

$$S = K \frac{\sqrt{e^3 t}}{\rho (1 - e) \sqrt{\eta}}$$

Dans laquelle S : surface spécifique (cm<sup>2</sup>).

K : constant 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 des grains g/cm<sup>2</sup>

η : viscosité de l'air à la température d'essai (en poise).

## ANNEXE IV

### IV.I.ESSAI DE CONSISTANCE (EN 196-3)

#### Matérielutilisé

-salle climatisée : l'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de 20<sup>0</sup>C±1<sup>0</sup>C et dont l'humidité relative est supérieure à 90%.A défaut d'une telle humidité relative, l'échenillons testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à 20<sup>0</sup>C±1<sup>0</sup>C.

-malaxeur normalisé : avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (sites lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn).

## ANNEXE

-appareil de VICAT (du nom de l'ingénieur farçais).l'appareil est composé d'un moule tronconique ( $h=40$  mm,  $d_1=70$  mm et  $d_2=80$  mm) et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde de  $\phi=10$  mm.

-balance précisée à 0,1 g près.

-chronomètre précisée à 0,1 s près.

### Mode opératoire

On procède par tâtonnement :

-préparer 0.5 kg de ciment, une pâte pure de rapport E/C=0.26, verser l'eau dans la cuve du malaxeur contenant le ciment,

-mettre le malaxeur en marche et déclencher le chronomètre.

-la pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibrations excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule, puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

-la sonde est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse).La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée, relever la distance de séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

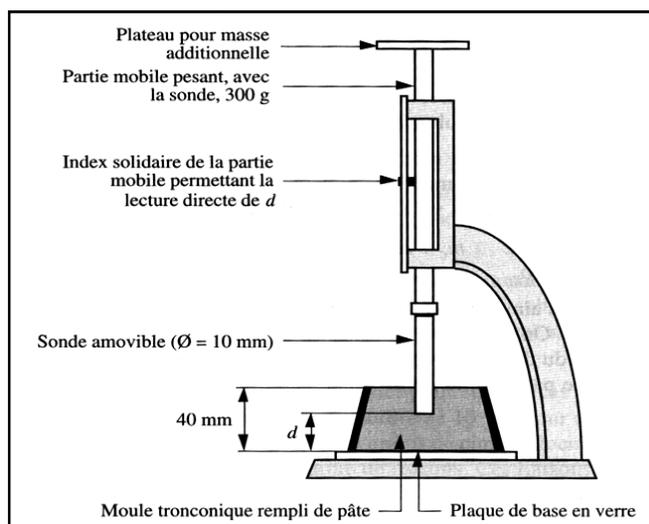
-la pâte sera à consistance normale si  $d=6\text{mm}\pm 1\text{mm}$ .

Si  $d>7\text{mm}$  : il n'y pas assez d'eau.

Si  $d<5\text{mm}$  : il ya trop d'eau.

Dans les 2 cas, jeter la pâte nettoyer et sécher le matériel et recommencer avec une nouvelle

### ESSAI DE PRISE (EN 196-3)



## ANNEXE

### Matériel utilisé

C'est le même appareil qui est utilisé (dans les mêmes conditions) à l'exception de la sonde qui cisaille l'échantillon, le diamètre est beaucoup plus petit ( $\Phi = 1.13 \text{ mm}$ ).

### Mode opératoire

Une fois la pâte à consistance normale obtenue, on procède au changement de la sonde de Vicat par l'aiguille de Vicat et on l'amène à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). L'aiguille alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance  $d$  séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

- recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés ( $\sim 10-15 \text{ mn}$ ) jusqu'à ce que  $d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ .

- cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de prise pour le ciment testé.

## ANNEXE V

### v. essai d'étalement au mini-cône d'abrams :

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 (mini-cône d'Abrams)

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

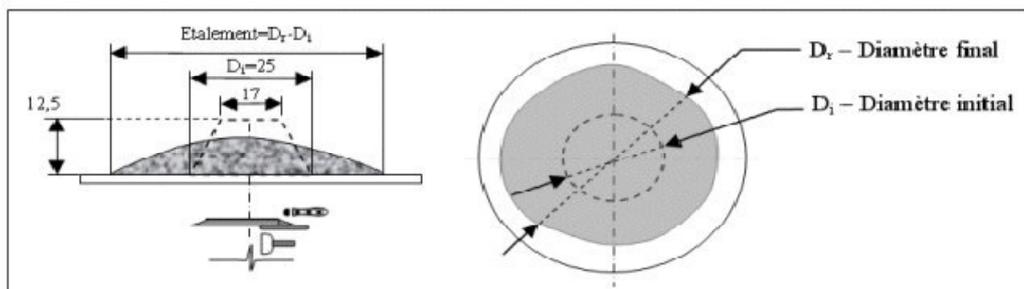


Figure : Essai d'étalement au cône à mortier (Ozawa et al, 1995)

## ANNEX VI

### VI. Les essais mécaniques

#### VI.1. Détermination de la résistance à la compression et à la traction (EN 196 1)

##### a. Objectif de l'essai

La résistance d'un mortier est directement dépendante du type de ciment donc, il s'agit de définir les qualités de résistance d'un ciment plutôt que d'un mortier.

**b. Conduite de l'essai**  
La norme EN 196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. Avec le mortier normal préparé comme indiqué au-dessous, on remplit un moule 4 x 4 x 16. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Après quoi le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide.



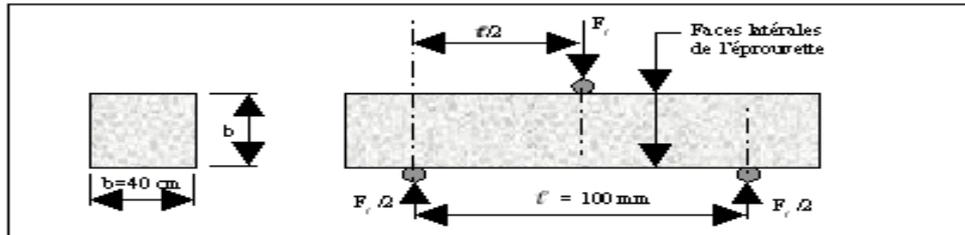
**Figure 2:** malaxeur des mortiers

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à  $20\text{ C}^{\circ} \pm 1\text{ C}^{\circ}$  jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. Les normes ENV 197-1 et NFP 15-301 définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2 (ou 7 jours) et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment. Si des essais sont réalisés à d'autres âges, ils devront être réalisés dans les limites de temps.

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure

## ANNEXE



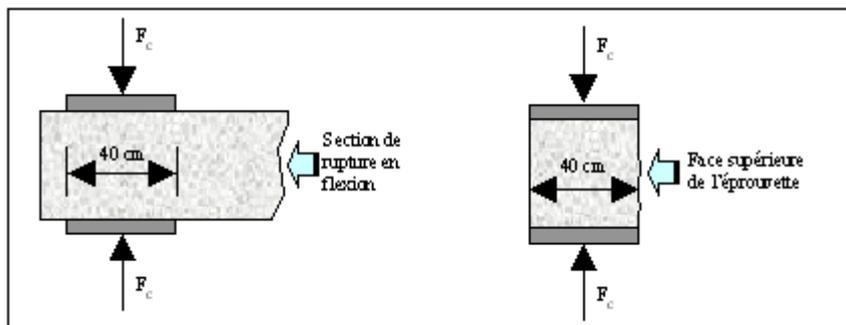
Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

Si  $F_f$  est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut  $F_f l / 4$  et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est

$$R_f = \frac{1,5 F_f \cdot l}{b^3}$$

Cette contrainte est appelée la résistance à la flexion. Compte tenu des dimensions  $b$  et  $l$ , Si  $F_f$  est exprimée en newtons (N), cette résistance exprimée en mégapascals (MPa) vaut :

$$R_f(\text{MPa}) = 0,234 F_f(\text{N})$$



Dispositif de rupture en compression.

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiquée sur la figure. Si  $F_c$  est la charge de rupture, la contrainte de

rupture vaudra :  $R_c = \frac{F_c}{b^2}$

## ANNEXE

---

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si  $F_C$  est exprimée en newton, cette résistance exprimée en méga pascals (MPa) vaut :

$$R_c = \frac{F_c(N)}{1600}$$



BFUP



Eprouvettes dans les solutions d'attaques



Etuve de séchage



Machine à secouer les épreuves E



Malaxeur de 5 litres



Appareil de Vicat manuel



Série de tamis

## Bibliographie

[1] : le béton réinventé dossier de presse octobre 2008 LAFARGE les matériaux au cœur de la vie.

[2] : Norme européenne NF EN 197-1, Éditée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe 92049 Paris février 2001.

[3] : Foliot A., le ciment, in, Le béton hydraulique, sous la direction de Jacques baron ; Raymond Sauterey, Presse de l'ENPC, Paris, 1982, pp.19-37.

[4] : THESE présentée en vue de l'obtention du titre de DOCTEUR de L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES Spécialité : Génie Civil par Maud CODINA  
Les bétons bas pH Formulation, caractérisation et étude à long terme Soutenance le 20 septembre 2007 Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA-UPS 135, Avenue de Ranguel 31077 TOULOUSE CEDEX 4.

[5] : Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie. Spécialité physique et chimie des Matériaux.

[6] : thèse de doctorat de l'université de Toulouse, apporte d'un renfort des fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçants armés, Youcef frithi ,2009.

[7] : thèse AYAD

[8] : collection technique cimbéton, béton et ouvrage d'art tome49.

[9] : béton de ciment, Denis trenblay, canada ,1983.

[10] : Association Française de Génie Civil Bétons fibrés à ultra-hautes performances Recommandations provisoires Janvier 2002).

[11] : document de recommandation **AFGC** « association française de génie civil ».

[12] : cours de ciment Sherbrooke GCI 712

[13] : MFE En Vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'étatTHEME FORMULATION DES BETONS DE SABLE AVEC AJOUT DE TUF Réalisé Par : KHALED Zakaria BELKHIR Abdelmounaim Sujet Proposé et suivi par : D<sup>f</sup> CHAID.R Promotion JUIN 2009 Département de Génie Des Matériaux Option : Liants Béton FSI BOUMERDES.

[14]Thèse de doctorat d'Adjlan : Béton de fibres (Université de BATNA)

[15] : thèse doctorat TAFRAOUI Ahmed. « Contribution à la valorisation de sable de d'une de l'erg occidental (Algérie) ». 13 Février 2009 p 15-50.

[16] : THÈSE Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE  
Spécialité : Matériaux, Mécanique, Génie civil, Electrochimie Arrêté ministériel : 7 août 2006  
Présentée par Ludovic MISSEMER Thèse dirigée par Evariste OUEDRAOGO et Codirigée  
par Yann MALECOT préparée au sein du Laboratoire Sols, Solides, Structures, Risques 3SR  
dans l'École Doctorale Ingénierie – Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétique,  
Procédés, Production (IMEP-2) Étude du comportement sous très hautes températures des  
Bétons

Fibrés à Ultra Hautes Performances : application au BCV®.

[17] : (cahier pratique le moniteur des travaux publics et de bâtiments 15 Avril 2011 le  
moniteur cahier détaché n 2 consultable sur [www.lemoniteur.fr](http://www.lemoniteur.fr) )

[18] : « Titre IV - Lutter contre les gaspillages et promouvoir l'économie circulaire - Ministère  
du Développement durable » [archive], sur [developpement-durable.gouv.fr](http://developpement-durable.gouv.fr) (consulté le 29  
mai 2015)

[19] : « InVS | BEH n°17 février 2009 / n°7- 8 - Numéro thématique - Incinération des ordures  
ménagères en France : effets sur la santé » [archive], sur [invs.sante.fr](http://invs.sante.fr) (consulté le 29 mai 2015)

[20] : Jacques Lachnitt, Les matériaux réfractaires, Que sais-je?, Presses Universitaires de  
France, Paris, 1983, 128 pages, ISBN 2130379427.

[21] : Thèse de doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon pour obtenir le  
grade de docteur par Frédéric THUMMEN.

[22] : A. NOUMOWE NCHAMBOU, Effet de hautes températures (20-600°C) sur le béton.  
Cas particulier du béton à hautes performances, Thèse de Doctorat : Institut National des  
Sciences Appliquées de Lyon, 1995, 232p.

[23] : Références Jean Peyroux (Arts et métiers), Dictionnaire des mots de la technique et des  
métiers, Librairie Blanchard, Paris, 1985.

[24] : E.Krause, T.Plaul et R.Zollner, « principes et techniques de caisson et de construction  
Des fours céramiques », Ed.Septima, Paris, 1973.

[25] : A.JOURDIN, « la technologie des produits céramique réfractaires », Paris Gauthier-  
Villard. p315-329, 1966.