

N°d'ordre :...../FSI 2017

République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES

Faculté des sciences de l'ingénieur
Département de génie des matériaux



Mémoire de fin d'études

En Vue de l'obtention du diplôme MASTER

Spécialité : Génie des matériaux

Thème

**ETUDE DE L'EFFET COMBINE DES AJOUTS SUR
LES PROPRIETES RHEOLOGIQUE ET PHYSICO-
MECANIQUE DES BETONS AUTOPLAÇANT FIBRES**

Réalisé Par :
MAICHE Abderrahmane
SAIDI Walid

Sujet Proposé et suivi par :
Pr. BENMOUNAH. A
Mr. BELLAL. A (CETIM)

BOUMERDES, Juin 2017

Remerciements

Nous remercions, en premier lieu, notre dieu qui a bien voulu nous donner la force pour effectuer le présent travail.

Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

Nous remercions tous les enseignants du département de génie des matériaux.

Nous présentons nos chaleureux remerciements aux membres du centre d'étude technologique industriel des matériaux de construction (CETIM) pour leur aide pendant la durée du stage.

En fin, nous tenons à remercier les membres du jury qui ont consacré un peu de leur temps pour examiner et évaluer notre travail.

« Dédicaces »

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents :

Ma très chère mère qui m'a encouragée et soutenu pendant mes études depuis mon enfance

Mon très cher père qui a tout fait pour m'aider dans mes Etudes

Mes deux sœurs Lydia et Sarah

Ma fiancée Hanane et sa famille

A mon binome SAIDI Walid et sa famille.

Enfin pour Tous les gens qui m'estiment espérant bien que je n'ai oublier Personne dans cette courte page.

Spécialement pour notre section

GENIE DES MATERIAUX

Abderrahmane MAICHE

« Dédicaces »

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents :

Ma très chère mère qui m'a encouragée et soutenu pendant mes études depuis mon enfance

Mon très cher père qui a tout fait pour m'aider dans mes

Etudes

Mes deux sœurs Lyhia et Majda

A mon binome MAICHE Abderrahmane et sa famille.

Enfin pour Tous les gens qui m'estiment espérant bien que je n'ai oublier Personne dans cette courte page.

Spécialement pour notre section

GENIE DES MATERIAUX

Walid SAIDI

Résumé

L'objectif de cette recherche consiste à étudier les propriétés physico-mécaniques des bétons autoplacant fibrés élaborés par substitution d'une partie de ciment par une combinaison d'ajout (laitier, pouzzolane et le sable de Boussaâda broyé et non broyé) allant jusqu'à un pourcentage de 10% en fonction d'un Superplastifiant.

Les résultats obtenus montrent que les BAPF a base d'ajout à 5% de SbB broyé développent, dès 28 jour, des résistances mécaniques mieux que les les BAPF a base d'ajout à 10% de SbB broyé et les BAPF a base d'ajout à 5% et 10% de SbB non broyé.

Mots clés : ciment substitué, laitier, pouzzolane e sable de Boussaâda broyé et non broyé, béton autoplacant fibré, résistances mécaniques.

PREAMBULE

Le CETIM < centre d'étude et de service technologique de l'industrie des matériaux de construction > est une EPA /SPA créée dans le cadre de redéploiement de l'ENDMC.
Ce document renferme une présentation de CETIM, qui rappelle ces principales missions et énumère les diverses activités pouvant être réalisées en collaboration avec le CETIM

PRESENTATION DE CETIM :

Un outil collectif pour accompagner les entreprise de production de l'industrie des matériaux de constructions dans leurs efforts de mis a niveau, de rentabilisation et de développement

LE CETIM DISPOSE :

- De laboratoire d'analyse et d'essai en phase d'accréditation pour tous les produits de l'industrie des matériaux de construction
- De structures de services spécialisés d'appui à la production
- D'équipes pluridisciplinaires et de recherche

LE CETIME COUVRE LES DOMAINES D'ACTIVITES SUIVANTES :

- Les liants hydrauliques : ciment
- Les liants aériens : plâtre et chaux
- Les bétons : les bétons lourds, les bétons légers et les bétons autoclaves
- Les granulas légers et lourds
- Les céramiques : fine réfractaire
- Les terres cuites : briques et les tuiles ; hourdis

LE CETIM A POUR MISSION ESENTIEL DE :

- Contribuer pour améliorer la qualité et la productivité dans l'industrie des matériaux de constructions
- Garantir la qualité des produits fabriqués
- Contribuer à la sauvegarde et à la préservation de l'environnement
- Contribué à la définition et la mis en place des règlement normes régissant les produits, matières des produits de l'industrie des matériaux de constructions
- Assurer les contrôles de conformité des règlements et normes
- Contribuer a la maitrise de la consommation de l'énergie
- Améliorer les produits existant et favoriser l'invocation d'autres produits
- Coller l'information technique utile aux industriels et le diffuser par les voies modernes de communication
- Développer la certification des produits et la gestion industrielle de la qualité
- Assurer une assistance multiforme aux opérateurs de la branche et leur dispense
- Contribuer a la maitrise de la technologie, aux transfère des connaissances ainsi qu'à leur diffusion et entretenir le lien avec l'industrie

Sommaire

Partie théorique

| | |
|---------------------------|----------|
| Introduction | 2 |
|---------------------------|----------|

CHAPITRE I : Généralités sur les BAP.

| | |
|---|----|
| I.1-Définition | 3 |
| I.2- Composition d'un BAP | 3 |
| I.3- Concept du béton auto plaçant | 4 |
| I.4- Caractéristiques du BAP | 5 |
| I.5- Les avantages de BAP | 5 |
| I.6- Constituanst de BAP | 6 |
| I.6.1-Le ciment | 6 |
| I.6.1.1- Classification des ciments en fonction de leur composition | 6 |
| I.6.1.2- Classification des ciments en fonction de leur résistance | 6 |
| I.6.1.3-Constitution des ciments | 7 |
| I.6.1.4-Composition minéralogique de ciment | 7 |
| I.6.1.5-Caractéristiques physico chimiques du ciment | 8 |
| I.6.1.6- Ciments pour les BAP | 11 |
| I.6.2-L'eau | 11 |
| I.6.3- Granulats | 11 |
| I.6.3.1- Les caractéristiques physiques | 12 |
| I.6.3.2- Les caractéristiques chimiques | 12 |
| I.6.4-Les ajouts minéraux | 13 |

| | |
|---|----|
| I.6.5- Les adjuvants | 17 |
| I.6.5.1-Les supeplastifiants | 17 |
| I.6.5.2-L'agent colloïdal | 17 |
| I.7- Caractéristiques du BAP à l'état frais | 18 |
| I.7.1-Essai d'étalement | 18 |
| I.7.2- Essai de boite en L | 19 |
| I.7.3-Essai de stabilité au tamis | 20 |
| I.8-Caractéristiques du BAP à l'état durcis | 22 |
| I.8.1- Resistances mécaniques | |
| | 22 |
| a) Résistance en compression | 22 |
| b) Résistance en traction | 22 |
| I.8.2-Retrait | 24 |
| I.8.3-Gonflement | 25 |
| I.9-Méthode de formulations des BAP | 25 |
| I.9.1- Différentes types des méthodes..... | 25 |
| a)- Méthode Japonaise | 26 |
| 1. Dosage des gravillons | 26 |
| 2. Dosage du sable | 26 |
| 3. Dosage du liant | 26 |
| 4. Dosage de l'eau et du super plastifiant | 26 |
| b)- Méthode Française | 27 |

CHAPITRE II : Les bétons autoplaçants fibrés

| | |
|---|----|
| II.1-Introduction : | 28 |
| II.2- Définition des bétons fibrés : | 28 |
| II.3- Définition des fibres : | 29 |
| II.4-Les types des fibres : | 29 |
| a) Choix du type de fibres : | 29 |
| b) Différents types de fibres : | 31 |
| II.5-Les caractéristiques et les propriétés des fibres : | 34 |
| II.6-Rôles des fibres dans le béton : | 35 |
| II.7- Les atouts des fibres..... | 36 |
| II.8-Mécanismes de fonctionnement des fibres dans le béton : | 36 |
| II.9-Domains d’application des bétons fibres : | 39 |
| II.10-Les béton autoplaçant renforcés de fibres : | 40 |
| 1-Introduction : | 40 |
| 2-Composition des BAPF: | 40 |
| 3- les propriétés des BAPF à l’état frais:..... | 40 |
| 4-Orientation et distribution des fibres : | 41 |
| 5-Comportement mécanique des bétons autoplaçant fibrés :..... | 42 |
| a)- Comportement à la flexion..... | 42 |
| b)- Comportement à la compression et à la traction | 42 |

CHAPITRE III : La rhéologie

| | |
|---|-----------|
| III.1-Introduction | 43 |
| III.2-Définition de la rhéologie | 43 |
| III.3-Paramètres rhéologiques des suspensions | 44 |
| a)Seuil de cisaillement | 44 |
| b) Viscosité plastique | 44 |
| c) Thixotropie | 45 |
| III.4-Stabilité rhéologique des suspensions | 46 |
| III.5-Rôle des adjuvants | 47 |
| III.5.1-Classification des adjuvants | 47 |
| a-Adjuvants qui modifient la prise et le durcissement | 47 |
| b-Adjuvants qui modifient la rhéologie | 47 |
| c-Adjuvants entraîneurs d'air dans le mélange | 47 |
| d-Adjuvants qui modifient la résistance du béton aux attaques physiques et chimiques | 47 |
| III.5.2-Les superplastifiants | 47 |
| III.5. 2.1- Effets des superplastifiants sur les betons | 49 |
| III.5.2.2- Les différentes classes des superplastifiants | 50 |

Partie pratique

CHAPITRE IV : Résultats et discussions

| | |
|---|-----------|
| IV.1-Caractéristiques des constituants | 52 |
| IV.2-La rhéologie des pâtes des ciments | 67 |
| IV.3-La formulation du BAP par la méthode japonaise | 71 |
| IV.4-Résultats et discussions | 80 |
| Conclusion | 85 |

INTRODUCTION

INTRODUCTION :

Ces dernières années, une nouvelle génération de béton a vu le jour : les bétons autoplaçants (BAP). Ces bétons sont très fluides et se mettent en œuvre sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe. Même dans des coffrages complexes et très encombrés, tout en donnant un produit final homogène. Toutefois, l'utilisation de ces bétons ne se répand que lentement à travers le monde.

Le problème de la formulation des bétons s'est renouvelé en profondeur au cours des dernières décennies, principalement du fait de l'utilisation croissante et souvent conjointe des superplastifiants et des agents colloïdaux d'une part et des additions minérales d'autre part. C'est dans le cadre des recherches sur les bétons autoplaçants, que le groupe de béton de la faculté des sciences appliquées de l'université de Sherbrooke a entrepris de réaliser des expériences en suivant des plans d'expériences visant à réduire le nombre d'essais nécessaires pour déterminer une formule de composition empirique et mieux comprendre les facteurs significatifs de la formulation qui affectent les propriétés caractérisant les BAP et les relations entre eux. Les modèles développés ne peuvent pas être utilisés pour faire des essais de mise au point d'un béton donné. Par contre, ils peuvent nous donner une première approche, l'obtention d'ordres de grandeur réalistes, et, ce qui est peut-être le plus important, une meilleure compréhension de la sensibilité des paramètres de composition, et de leur interdépendance. On remarque que nombre de paramètres considérés à juste titre comme importants dans la formulation des bétons, tels que la nature, la granulométrie ou la forme des granulats, la finesse et la composition chimique des liants ou encore la nature chimique des adjuvants, ne sont pas pris en considération. Pourtant, tout formulateur peu expérimenté soit-il, sait que deux bétons de composition identique, réalisés à partir de deux ciments de même catégorie issus de cimenteries différentes, n'auront pas les mêmes propriétés. [1]

Dans notre travail on va étudier l'influence de la pouzzolane, le laitier et le sable de Boussaâda broyé et non broyé, ajouter par substitution du ciment sur les BAPF à l'état frais et à l'état durci.

I.1-Définition :

- Le béton autoplaçant dite BAP est un béton fluide, très déformable, homogène et stable. Ce type de béton doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrées avec une vitesse dépendante de la viscosité du mélange, et se met en œuvre sans vibration ce qui constitue un grand avantage pour la réalisation des constructions.
- A l'état frais appelé autoplaçant lorsqu'il se compacte suffisamment grâce à son poids propre tout en ne présentant pas de ségrégation.

I.2- Composition d'un BAP :

Les constituants d'un BAP sont : ciment, gravier, eau et les superplastifiants. Les BAP se différencient des vibrés, par leurs caractéristiques à l'état frais, par leur composition (présence indispensable des fines minérales et de superplastifiants)

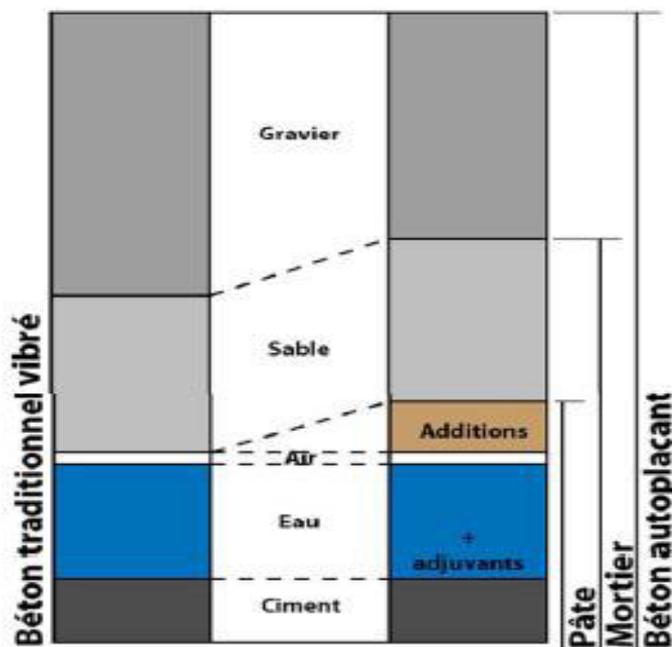


Figure I-1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.

Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.

1.3- Concept du béton auto plaçant :

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autocompactants ("self-compacting concrete", traduit par béton autoplaçants ou béton autonivellant). Outre leur facilité de mise en oeuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique). Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

Le rôle de la pâte est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement.

Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un défloculant, sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée. Le début du développement des BAP en France coïncide d'ailleurs à l'arrivée des superplastifiants de type polycarboxylate, à fort pouvoir défloculant. Ces adjuvants ont un double effet, électrique et stérique, qui leur permet de disperser au mieux les particules. La quantité de fines n'est pas non plus toujours suffisante pour empêcher la ségrégation. On a recours alors aux agents de viscosité. Ces adjuvants sont souvent des polymères, composés de longues molécules

Généralité sur les BAP

organiques, qui augmentent la viscosité de l'eau de gâchage. Ils assurent une meilleure stabilité du béton et le rendent moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats, courantes en centrale à béton. Cela étant, en pratique leur utilisation est au contraire peu répandue, car ils entraînent un surcoût, qui s'ajoute aux surcoûts dus au super plastifiant et aux additions. Evidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais. Il existe de part le monde divers essais pour caractériser l'ouvrabilité des BAP. [2]

I.4- Caractéristiques du BAP :

Un béton autoplaçant (BAP) permet de remplir des coffrages dont la complexité de forme ou la densité en ferrailage n'aurait pu être imaginée dans le cas d'un béton ordinaire. Pour cela, les BAP doivent avoir des propriétés à l'état frais bien déterminées à savoir :

- La fluidité : Elle est déterminée à l'aide de l'essai d'étalement au cône d'Abrams
- La capacité de remplissage : Elle est déterminée à l'aide de l'essai à la boîte en L
- La résistance à la ségrégation : Elle est déterminée à l'aide de l'essai de la stabilité au tamis.

I.5- Les avantages des BAP :

- Une diminution de risque de fissuration.
- Mise en place facile sans bourrage ni vibration.
- Excellentes caractéristiques de pompage.
- Résistance élevée aux attaques des sulfates.
- Très faible perméabilité.
- Faible retrait.
- Grâce à ses propriétés plastiques supérieures, ce béton produit un mélange très fluide sans ressuage ni ségrégation.
- Formulé avec des granulats naturels, fins et grossiers de densité normale, non-réactifs afin d'éliminer toute réaction alkali-granulat potentielle (RAG).
- Le système de management régissant la fabrication de tous les produits King est certifié **ISO 9001:2000**.

I.6- Constituent de BAP :

I.6.1-Le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique c'est à dire capable de faire prise dans l'eau, il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui en la mélangeant avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composants minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium, la proportion de chaux et de silice réactive devant être au moins de 50% de la masse de ciment. [6]

I.6.1.1- Classification de ciment en fonction de leur composition :

Les ciments constitués de clinker et des constituants énumérés le, sont classés, en fonction de leur composition, en cinq types principaux, ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffre romains dans leur notation européenne (**sols, granulats...**) :

- CEM I: ciment Portland (CPA)
- CEM II: ciment Portland composé (CPJ)
- CEM III : ciment haut Fournaux (CHF)
- CEM V : ciment composé(ou ciment au laitier et au cendres: CLC)
- CEM IV: ciment pouzzolanique (CPZ)

I.6.1.2- Classification des ciments en fonction de leur résistance normale :

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes "R" sont associées à ces trois classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées.

Ces classes sont notées, classe 32,5, classe 42,5, classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et les valeurs garanties selon le tableau I.3. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées.

Généralité sur les BAP

Tableau I-1: classification du ciment en fonction de leur résistance

| Résistance à la compression (MPa) | | |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Classe de résistance | 2 jours Limite inf | 28 jours Limite inf |
| 32.5N (Normale) 32.5R (Rapide) | ≥ 13.5 | $\geq 32.5 \geq 32.5$ |
| 42.5 42.5R | $\geq 12.5 \geq 20$ | $\geq 42.5 \geq 42.5$ |
| 52.5 52.5R | $\geq 20 \geq 30$ | $\geq 52.5 \geq 52.5$ |

I.6.1.3-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 CaSO_4), qui joue un rôle de régulateur de prise.
- D'additifs éventuels, qui confèrent au ciment des propriétés particulières.

I.6.1.4-Composition minéralogique de ciment :

Pendant la cuisson des matières premières dans le four rotatif, les oxydes se lient entre eux pour former les minéraux du clinker qui sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau I-2 : les minéraux de clinker.

| notation | Nom | Formule chimique | Teneur en % |
|-----------------------|--|---|-------------|
| C_3S | Silicate tricalcique (l'alite) | $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | 45à65% |
| C_2S | Silicate bi calcique (bélite) | $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | 15à35% |
| C_3A | Aluminate tricalcique (celite) | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ | 4à14% |
| C_4AF | Alumino-ferrite tétracalcique (félite) | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | 10à18% |

Le clinker ayant une faible proportion de la chaux libre CaO_L et de l'oxyde de magnésium MgO ainsi que des impuretés qui peuvent modifier sensiblement ses propriétés. [6]

I.6.1.5-caractéristiques physico chimiques du ciment :

a) L'hydratation :

L'hydratation du ciment se fait en contact avec l'eau ; les réactions d'hydratation de toutes les phases du ciment se passent au même temps et contribuent avec une intensité différente au dégagement de chaleur (réaction exothermique).

Les chaleurs d'hydratation des différents constituants du ciment sont :

- $C_3S = 500 \text{ j/g}$.
- $C_2S = 250 \text{ j/g}$.
- $C_3A = 1340 \text{ j/g}$.
- $C_4AF = 420 \text{ j/g}$.

La réaction d'hydratation peut se développer en quatre périodes principales :

- **Période initiale** : Au cours de laquelle le silicate tricalcique (C_3S) se dissout superficiellement pour former mono-silicate de calcium hydraté et l'ettringite.
- **Période dormante** : Au cours de laquelle la pâte reste fluide, les réactions précédentes se poursuivent moins rapidement pendant une durée de 2 à 3 (h).
- **Période de prise** : Au cours de laquelle la pâte acquiert une certaine consistance due à l'interpénétration des cristaux.
- **Période de durcissement** : Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement qui se développe environ 08 (h) après le début de l'hydratation et qui se poursuit pendant des mois voire des années avec une vitesse de plus en plus lente au cours de laquelle la résistance mécanique continue à croître.
- **L'indice d'hydraulicité** : L'indice d'hydraulicité ou indice de Vicat est le rapport de la fraction acide du ciment à la fraction basique. Il est donné par la formule (1).

$$I = \text{fraction acide} / \text{fraction basique} = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO})$$

La résistance chimique du ciment est d'autant meilleure que l'indice d'hydraulicité est plus élevé.

b) Finesse de mouture :

La finesse de mouture, également appelée surface spécifique de Blaine, exprimée en cm^2/g , représente la surface développée par une masse de **1g** de ciment. Elle est généralement comprise entre **3 000** et **3 500 cm^2/g** . Plus la finesse est grande plus les résistances sont précoces et élevées. Mais par contre, plus les risques de retrait sont apparus et par conséquence la naissance des fissurations.

c) **La prise** : Le temps de prise comprend le début de prise et la fin de prise, c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre le moment de gâchage et le durcissement du ciment.

- **Début de prise** : C'est le moment où le ciment commence à se cristalliser, c'est-à-dire où la pâte de ciment perd sa plasticité.
- **Fin de prise** : C'est le moment où le ciment a terminé son durcissement, c'est-à-dire où la pâte du ciment est complètement dure.

d) **La fausse prise** : La composition du ciment contient un peu de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), si le clinker est trop chaud, il se forme au cours de broyage un peu de plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$), dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la fausse prise. Dans ce cas il faut augmenter la durée de malaxage au lieu d'ajouter de l'eau.

e) **Le retrait** : C'est la diminution du volume apparent de la matière. Il est mesuré sur des éprouvettes prismatiques de mortier de **16 cm** de longueur et d'une section carrée de **4 x 4 cm^2** , conservées à l'air libre à une température de **20°C** et une hygrométrie de **50%**.

f) **L'expansion** : Les causes de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie libre. Les ciments doivent être stables car les risques de l'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries ; sa stabilité se détermine par l'essai **Le Chatelier**, qui consiste à mesurer l'écartement de deux aiguilles solidaires d'un moule rempli de la pâte de ciment tassée et conservée dans l'eau bouillante. La valeur de l'expansion mesurée doit être inférieure à 10mm pour tous les types de ciments courants, le pourcentage maximal de magnésium est limité, sa valeur spécifique par la norme doit être au plus **5%** pour les **CPA-CEMI** ainsi pour les clinkers des ciments courants.

g) Gonflement :

Bien que non normalisé, il est utile de rappeler alors qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est immergé dans l'eau, ses variations dimensionnelles étant environ **10%** de celles constatées à l'air.

h) Résistance à la compression :

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en Mpa. Le mortier utilisé est réalisé conformément à **la norme EN 196-1**. Le sable utilisé est un sable appelé "sable normaliser CEN EN 196-1". Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales. [3]

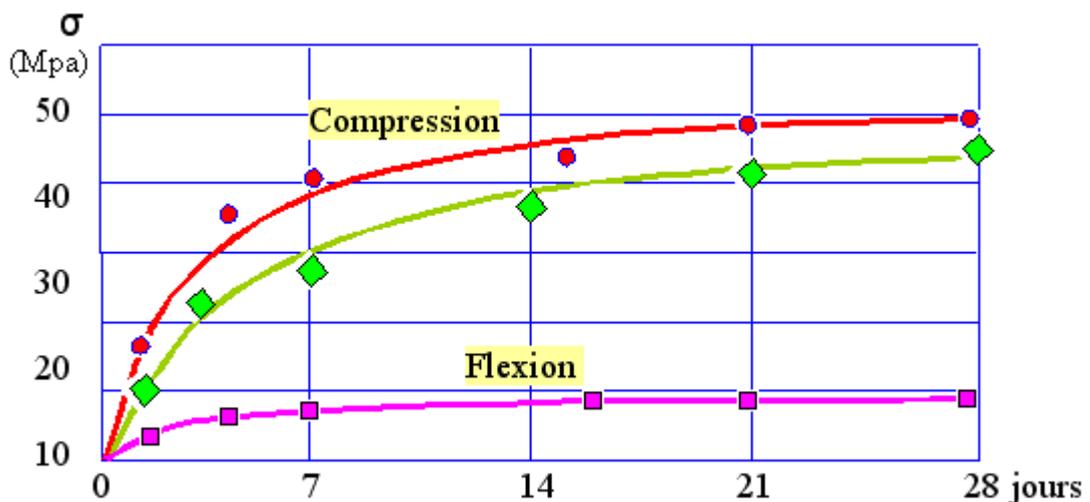


Figure I- 2: Resistance normale du mortier

I.6.1.6- Ciments pour les BAP :

En principe tous les ciments conformes à la norme SNEN 197-1 conviennent pour la fabrication de béton BAP

Les BAP peuvent être réalisés avec la plupart des ciments. Cependant, compte tenu des exigences de démoulage aux jeunes âges, les BAP utilisés dans l'industrie du béton contiennent presque toujours du ciment CPA-CEMI 52.5 ou 42.5 et CPJ-CEM II 42.5

I.6.2-L'eau :

Toute eau du réseau public d'eau potable convient à la fabrication de BAP. Les eaux recyclées de gâchage et de lavage ne conviennent que sous certaines conditions restrictives. En raison d'éventuels effets indésirables sur les propriétés du béton. Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable sur la viscosité et la capacité de remplissage du BAP, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est ainsi très important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats et tout spécialement du sable. Cas échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants. [5]



Figure I-3: l'eau de gâchage

I.6.3- Granulats :

Le granulat, qu'on appelle aussi agrégat roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. Les granulats roulés en vrac présentent un plus petit volume de vide intergranulaire, ce qui nécessite une plus faible quantité de pâte de ciment pour le remplir. La flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est cependant meilleure, en raison de leur plus grande surface spécifique à masse identique. Afin d'empêcher tout risque de blocage du BAP par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm. L'expérience a néanmoins montré qu'il était également possible d'utiliser des granulats de diamètre maximal différent.

Le mélange pour béton (granularité) est caractérisé par une teneur élevée en sable et en éléments fins. Le passant au tamis de 2 mm devrait être idéalement compris entre 38 et 42%. De même, la proportion de farines (0,125 mm) ne devrait pas être

trop faible, l'optimum étant situé entre 4 et 8%. Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment.

Afin d'assurer une bonne stabilité du BAP (éviter toute ségrégation), il est recommandé de choisir un sable spécialement optimisé, au besoin recomposé à partir de plusieurs fractions.

I.6.3.1- Les caractéristiques physiques :

Les caractéristiques physiques sont :

- La résistance à la fragmentation, mesurée par la méthode d'essai Los Angeles (LA).
- La résistance aux chocs (SZ).
- La résistance à l'usure, mesurée par la méthode d'essai « micro-Deval humide » (MDE).
- La résistance au polissage, mesurée par le « coefficient de polissage accéléré » (PSV).
- La résistance à l'abrasion (AAV) et sa forme scandinave, la résistance à l'abrasion provoquée par les pneus à crampons.
- La masse volumique réelle, et le coefficient d'absorption d'eau.
- La masse volumique en vrac, nommée aussi masse volumique apparente.
- La résistance à l'alternance gel-dégel.
- La stabilité volumique au séchage. [3]

I.6.3.2- Les caractéristiques chimiques :

Les caractéristiques chimiques sont :

- La teneur en chlorures.
- La teneur en composés contenant du soufre.
- La teneur en alcalins (sodium, potassium)
- La teneur en silice libre. [3]

I.6.4-Les ajouts minéraux :

Ils sont généralement catégorisés comme ajouts cimentaire ou minéraux .ces matériaux se ressemblent en ce que la plupart sont des sous-produits d'autres procédés et leur emploi judicieux est souhaitable non seulement du point de vue de la conservation de l'environnement et de l'énergie mais aussi pour les bénéfices techniques qu'ils apportent au béton .Les ajouts cimentaire ajoutés aux bétons font parti du système cimentaire complet. Ils peuvent être utilisés en supplément ou comme remplacement partiel du ciment portland ou du ciment composé dans le béton, selon les propriétés des matériaux et l'effet souhaité sur le béton. [4]

Ils existent 2 types des ajouts sont :

➤ **Les ajouts inertes :**

Les ajouts inertes sont des éléments naturels ou artificiels chimiquement inertes qui ne jouent aucun rôle dans le processus de fabrication, d'hydratation, ou de durcissement du ciment portland mais peuvent modifier les propriétés finales du produit, ils sont généralement utilisés au niveau du broyage du clinker.

Les roches carbonatées telle que le calcaire, craie, dolomie, sont largement utilisées comme ajouts naturels inertes au ciment.

La priorité est accordée aux roches les plus dures pour éviter un éventuel colmatage de la matière lors du broyage.

Les ajouts inertes sont moins connus dans la pratique de l'industrie cimentière, ils sont habituellement utilisés lorsque la cimenterie ne dispose pas de source d'ajouts minéraux actifs.

➤ **Les ajouts minéraux actifs :**

a) Rôle des ajouts minéraux actifs :

Le rôle des ajouts minéraux actifs consiste à fixer la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ du ciment qui se dégage lors de l'hydratation de C_3S pour former des compositions difficilement solubles (stables) qui contribuent à la résistance du ciment.

Les ajouts minéraux actifs améliorent la compacité du mortier et du béton, cette compacité donne une meilleure protection du ciment à l'agressivité des eaux douces et des sels.

Généralité sur les BAP

Les additions minérales sont des matériaux minéraux finement divisés pouvant être Partiellement substituées au ciment pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Les additions sont variées : le laitier granulé de haut fourneau, les calcaires, les pouzzolanes naturelles (siliceuses ou calciques), les fumées de silice, les cendres volantes. Les deux dernières additions ont des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'elles ne durcissent pas par elles-mêmes lorsqu'elles sont mélangées avec de l'eau, mais elles réagissent à température habituelle, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) dissous issu des réactions d'hydratation, pour former des composés de silicates et d'aluminates de calcium développant des résistances. Ces composés sont semblables à ceux qui sont formés lors du durcissement des matières hydrauliques.

Il existe deux types d'ajouts minéraux actifs

- **Ajouts minéraux actifs naturels :**

Les ajouts minéraux actifs d'origine sédimentaire sont les dolomites, les tripolis et les gaizes, ils se rapprochent par leurs compositions chimiques.

Les ajouts minéraux actifs d'origines volcaniques sont représentés par les pouzzolanes, les cendres, le tuf et la pierre ponce.

- **Ajouts minéraux actifs artificiels :**

Parmi les ajouts actifs artificiels on peut citer :

- Les déchets siliciques actifs.

- Les argiles cuites (déchetts de briques et de tuiles).

- Les cendres des combustibles.

- Les laitiers métallurgiques.

- Les déchets siliciques actifs obtenus à la suite de l'extraction de l'alumine à partir de l'argile renferment souvent l'anhydrite sulfurique à quantité élevée.

L'utilisation des ajouts minéraux actifs dans l'industrie du ciment est préférée grâce à leurs avantages par rapport aux ajouts inertes.

- **Le laitier granulé de hauts-fourneaux (LGHF) :**

C'est un matériau hydraulique latent, c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il a subi une activation convenable. Le laitier ne possède par lui-même aucune vertu liante, mais sous la forme broyée et en présence d'eau, il réagit

Généralité sur les BAP

chimiquement avec la chaux et l'eau pour former des composés possédant des valeurs liantes. Il est obtenu par le refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion de minerai de fer dans un haut fourneau. La trempe provoque la vitrification du matériau. Il est constitué, en masse, d'au moins deux tiers de CaO, MgO et SiO₂, le reste contenant Al₂O₃ et de faibles quantités d'autres oxydes.

La structure des laitiers de hauts fourneaux est essentiellement amorphe mais des phases cristallisées telles que la merwinite (de formule simplifiée 3CaO.MgO.2SiO₂) ou la ménilite (mélange de gehlenite 2CaO. Al₂O₃.SiO₂ et d'akermanite 2CaO.MgO.2SiO₂) peuvent être retrouvées en petite quantité dans le laitier vitrifié. Contrairement au clinker qui est soluble dans l'eau et s'hydrate en présence d'eau, le laitier vitrifié n'est soluble que dans une eau alcalinisée et a donc besoin, pour faire prise, d'un agent d'addition appelé « activant ». [8]

- **Matériaux pouzzolaniques :**

Les pouzzolanes sont des matériaux n'ayant pas des propriétés liantes en eux-mêmes mais qui, en se combinant avec la chaux à température ordinaire et en présence d'eau, forment des composés insolubles stables possédant des propriétés liantes. L'activité pouzzolanique désigne cette aptitude du matériau à fixer l'hydroxyde de calcium et à durcir sous l'eau. On distingue :

Les pouzzolanes naturelles : Les pouzzolanes sont des roches naturelles composées d'une large part de silice réactive, d'oxyde de fer et d'alumine. Elles sont généralement d'origine volcanique ou sédimentaire. Leurs propriétés pouzzolaniques sont soit naturelles, soit activées thermiquement. [8]

- **Les fillers calcaires :**

Les fillers calcaires sont très réactifs en présence de ciment, alors que les fillers siliceux sont pratiquement inertes. Cette réactivité dépend de :

- ✓ La nature du calcaire, son état de cristallisation (une calcite à réseau cristallin désorganisé donne une augmentation de résistance plus rapide qu'une calcite à réseau cristallin désorganisé),
- ✓ Le type de broyage (en plus de l'action propre due à l'augmentation de la finesse, le broyage peut désorganiser la structure et améliorer la réactivité).

- **Les cendres volantes :**

Le remplacement d'une partie du ciment par des volantes a une faible influence sur le seuil et la viscosité des pâtes de ciment. Certains auteurs remarquent cependant que

leur utilisation peut améliorer la fluidité ,car leur forme sphérique permet de réduire les frottements entre les grains de ciment .ferraris et al .Montre par ailleurs que le diamètre moyen des cendres volantes a une légère influence sur la valeur de seuil d'écoulement ,les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines (diamètre moyen 3,1 μ m).Associées a un super plastifiant ,les cendre volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire a l'obtention d'une certaine fluidité .

- **Les fumées de silice :**

La fumée de silice est un sous-produit du procédé de fusion utilisé dans la production de métaux siliceux et d'alliages ferrosiliceux. La fumée de silice possède une concentration élevée de dioxyde de silicone amorphe et se présente sous forme de très fines particules sphériques.

Elle est souvent appelée micro silice, poussière de cendres volantes riche en silice. Les fumées de silice présentent habituellement les caractéristiques suivantes:

teneur en comprise entre 85% et 98%; taille moyenne des particules comprise entre 0,1 et 0,2 μ m ; forme sphérique et un grand nombre d'agglomérats élémentaires; structure amorphe.

Les fumées de silice sont utilisées à l'état naturel, densifiées, ou sous forme de coulis mélangés à 50% d'eau par unité de poids.

Il ne faut pas oublier qu'on utilise ces ajouts cimentaires de deux manières différentes: comme substitut du ciment, pour réduire la quantité du ciment, en général pour des raisons économiques et, par conséquent, pour réduire la chaleur dégagée lors de l'hydratation et pour minimiser ainsi le risque de fissuration; comme ajout, pour améliorer les propriétés du coulis, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Pour des teneurs en fumée de silice et des rapports E/C faibles, les petites microsphères de la fumée de silice, qui sont 100 fois plus petites que les particules de ciment, déplacent l'eau piégée entre les grains de ciment; donc plus d'eau pour améliorer la maniabilité du mélange.

Les fumées de silice sont très efficaces pour réduire le ressuage et la ségrégation. Les mélanges contenant de la fumée de silice sont plus denses et plus imperméables que les mêmes mélanges sans fumée de silice. En effet, les

microsphères de La fumée de silice réagissent avec les cristaux de CH obtenus lors de l'hydratation du ciment, pour former des C- S-H secondaires qui ont une structure plus compacte. La fumée de silice est un produit dont la composition chimique ne varie que rarement ou pas dans une même production donnée. [8]

I.6.5- Les adjuvants :

On appelle adjuvant tout ingrédient, autre que le ciment portland, l'eau et les granulats, que l'on ajoute au mélange immédiatement avant ou pendant le malaxage.

I.6.5.1-Les supeplastifiants :

Les superplastifiants sont des adjuvants hauts réducteurs d'eau qui réduisent fortement les quantités d'eau nécessaires pour une consistance de béton souhaitée à l'état frais. Ils permettent d'augmenter les résistances initiales du béton via la réduction d'eau mais également la maniabilité et la pompabilité à la mise en œuvre. Ils favorisent la production de bétons fluides de types S4-S5, béton Auto-Plaçant (BAP), béton Auto-Nivelant (BAN), les bétons à Haute Performance (BHP) et bétons à très Haute Performance (BTHP). [3]

Selon certains auteurs, la quantité de super plastifiant adsorbé dépend:

- du type de ciment étudié.
- de la finesse des particules: plus les particules de ciment sont petites, plus la quantité de polymère adsorbé est grande.
- des rapports C_3S/C_2S et C_3A/C_4AF : plus ces rapports sont grands, plus la quantité de polymère adsorbé est élevée.

I.6.5.2-L'agent colloïdal :

Les agents colloïdaux sont des polymères utilisés afin d'augmenter la stabilité des mélanges (leur résistance la sédimentation, au ressuage et au lessivage). Ils servent à augmenter la viscosité plastique et le seuil de rigidité. Les agents colloïdaux sont de trois types dérivés de cellulose, contenant souvent de la cellulose éther non ionique: Polysacaride de micro-organismes, comme la *welun-gum*; polymères de type acrylique, contenant des acrylamides comme composants principaux.

Les agents colloïdaux peuvent agir selon trois mécanismes : par absorption : les molécules d'agent colloïdal absorbent de l'eau et prennent de l'expansion; par

Généralité sur les BAP

association : les différentes particules développent des liaisons par suite des forces de surface de Van DerWaals et des ponts d'hydrogène; par chevauchement : les polymères se chevauchent entre eux lorsqu'ils sont en grande concentration.

L'utilisation des agents colloïdaux réduit en général la fluidité des coulis. Ils doivent être incorporés à des superplastifiants pour optimiser à la fois la stabilité et la fluidité des coulis. Cependant, une étude en laboratoire est nécessaire a de voir la compatibilité de ces agents colloïdaux avec les différents types de super plastifiant : naphthalène, mélamine ou autres types. Cette étape est nécessaire, car les agents colloïdaux à base de cellulose sont parfois incompatibles avec les super plastifiants à base de naphthalène. Ils peuvent aussi causer l'entraînement de grandes bulles d'air. Un agent dés entraîneur d'air est parfois nécessaire avec certains agents colloïdes. [1]

I.7- Caractéristiques du BAP à l'état frais :

I.7.1-Essai d'étalement :

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow) on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de béton BAP. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm. La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette. Il est utile de documenter le résultat de cet essai au moyen de photographies. [1]

Lorsque la petite ouverture se trouve en bas, le remplissage du cône avec le BAP est facilité et son soulèvement est empêché. Dans ce cas il en résulte une valeur d'étalement plus élevée de 20 à 40 mm, par rapport à celle obtenue avec le cône disposé en sens contraire pour le même béton.

En 2002, les recommandations en termes d'étalement admissible définissaient la fourchette :

600-750 mm. Depuis, différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application. Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies :

Généralité sur les BAP

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm.

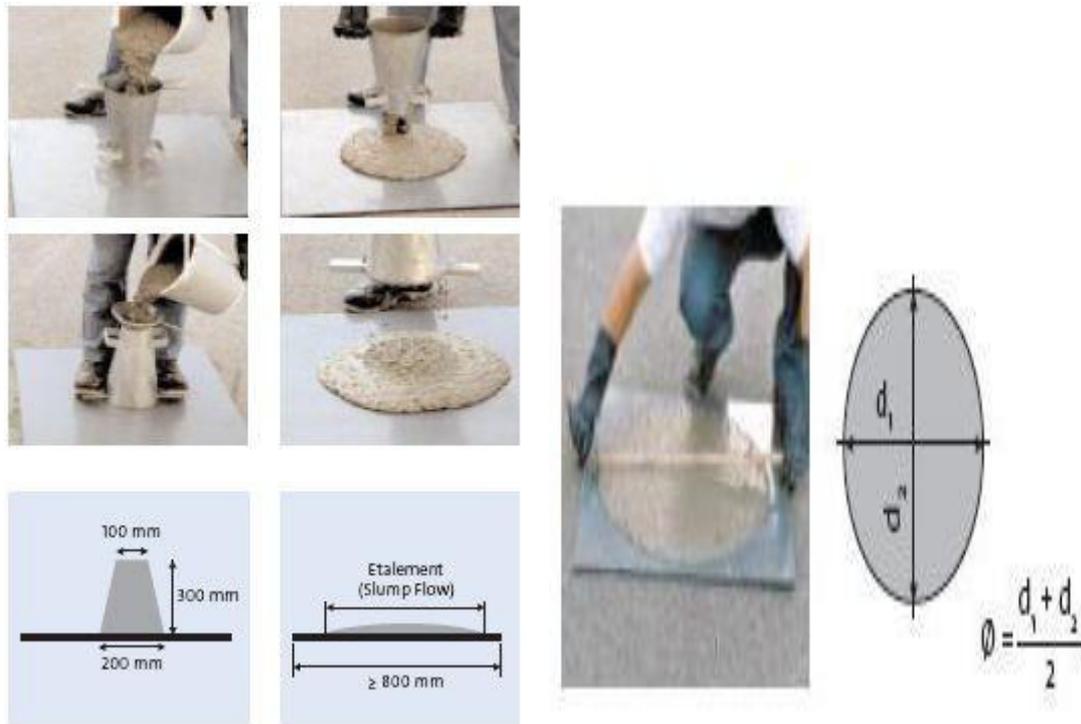


Figure I- 4: l'essai d'étalement.

I.7.2- Essai de boîte en L :

La procédure d'essai dans la boîte en L est la suivante : la partie verticale de la boîte est remplie de béton. Ensuite le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer au travers d'un grillage, formé de 3 barres d'armature \varnothing 14 mm distantes de 39 mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton (h_1 et h_2), afin de qualifier sa capacité d'auto nivellement. Le rapport h_2/h_1 devrait être supérieur à 0,80. L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini.

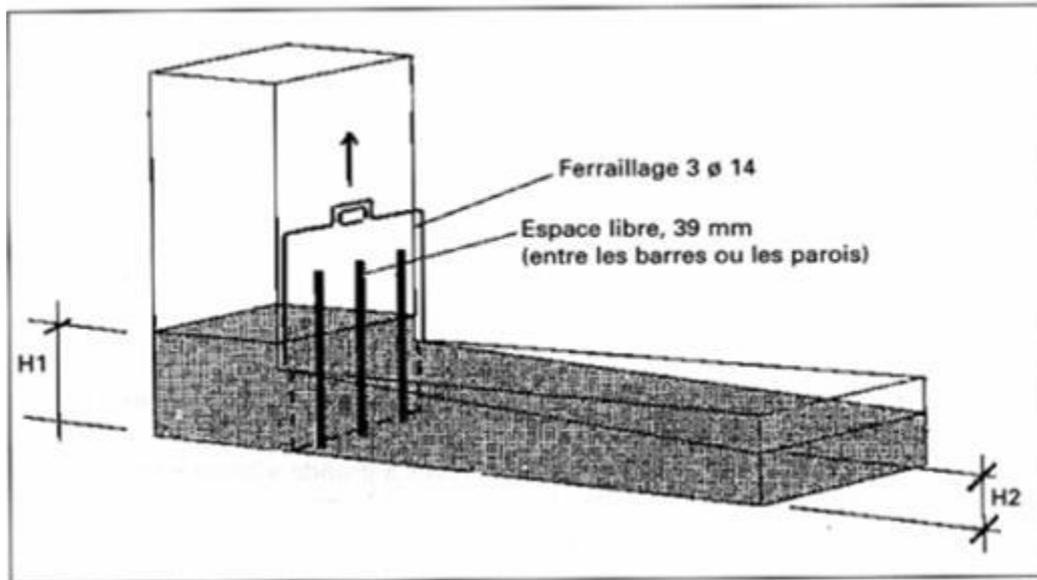


Figure I-5: boite en L.

I.7.3-Essai de stabilité au tamis :

A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de quinze minutes, une masse 4,8 kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5 mm. Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis.

Un pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation.

L'AFGC a proposé en plus un essai de mesure du ressuage, qui semble avoir été abandonné aujourd'hui, car peu pertinent (le ressuage est faible chez les BAP) et très contraignant (utilisation d'un liquide nocif). Le tableau ci-après donne les valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAP. [1]

Généralité sur les BAP

Tableau I-3 : les valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAP.

| | |
|--------------------------|---------------|
| Etalement | 60 cm à 75 cm |
| H2/H1 | ≥ 0.8 |
| Laitance | $\leq 15\%$ |
| Ecoulement à l'entonnoir | 9 à 25 s |
| T500 | $> 2s$ |
| Etalement modifié | Visuel |

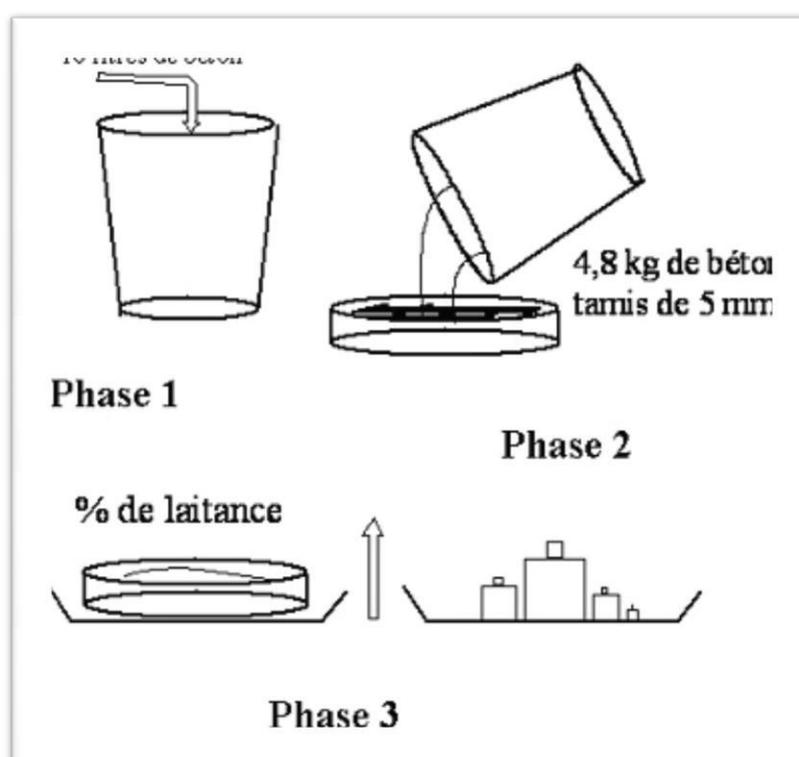


Figure I-7: stabilité au tamis.

I.7.3.1-Spécifications sur l'essai de ségrégation au tamis:

La valeur de stabilité au tamis, qui décrit la résistance à la ségrégation, est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité in situ du BAP.

Classe SR1 est généralement applicable aux dalles de faible épaisseur et peut également être utilisé dans les applications verticales avec une distance maximale de cheminement de 5 mètres et un intervalle d'écoulement supérieur à 80 mm.

Généralité sur les BAP

Classe SR2 est mieux adapté dans les applications verticales si la distance de cheminement est supérieure à 5 mètres et si l'intervalle d'écoulement est supérieur à 80 mm.

Elle convient également pour les applications verticales avec un intervalle d'écoulement maximum de 80 mm, si la hauteur de chute du béton est inférieure à 5mètre [1]

Tableau I.4 : classe de la résistance à la ségrégation.

| | Pourcentage de laitance |
|-----|-------------------------|
| SR1 | ≤ 20 |
| SR2 | ≤ 15 |



Figure I- 8 : la ségrégation du béton.

I.8- Caractéristiques du BAP à l'état durcis :

I.8.1- Resistance:

La résistance a été longtemps considérer qualité essentielle, pour ne pas dire la seule à rechercher pour un béton ; l'ouvrabilité et la résistance sont à étudier de pair car elles sont fonction de certains facteurs essentiels de la composition du béton.

Généralité sur les BAP

a) Résistance en compression :

La résistance en compression à 28 jours désignée par f_{c28} , elle se mesure par la compression axial de cylindre droit de révolution hauteur double de leur diamètre (16 x 32) ou bien sur des prisme cubique de coté $a = 15\text{cm}$.

b) Résistance en traction :

La résistance en traction à 28 jours désignée par f_{t28} , elle est mesurée par plusieurs essais

-Résistance en traction directe :

La mesure se fait par mise en traction des cylindres identiques aux précédents mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération doit avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite.

- Résistance en traction-flexion :

C'est l'essai est le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de coté a et de longueur $4a$. Pour une charge totale p , le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est :

$$M = pa/2$$

Toute fois, la comparaison des résistances obtenues en traction flexion avec celles mesurées en traction direct ou par fendage montre que ces dernières sont généralement et en moyenne inférieures de 40 % environ par rapport à la première : ceci peut s'expliquer par la plastification du béton dans la phase de pré rupture.



Figure I- 9: l'appareil pour déterminer la résistance à la traction

I.8.2-Retrait:

C'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise de ciment on peut l'assimiler à l'effet d'un abaissement de température entraînant un raccourcissement.

On indique ci-après les valeurs moyennes en mm/m :

-dans les régions très humides : $D1/1 = 1.5 \times 10^{-4}$ à 3×10^{-4} .

-dans les régions très sèches : $D1/1 = 5 \times 10^{-4}$

Le durcissement sous l'eau diminue beaucoup les effets de retrait. C'est pourquoi il convient de tenir les pièces humides en les arrosant pendant leur durcissement (cure du béton) à une époque où le béton est très jeune n'a encore qu'une faible résistance en traction et se fissurera facilement sous l'effet du retrait.

Selon le type d'ouvrage, on peut ne pas tenir compte des effets du retrait et des variations de température pour les constructions dont la longueur totale comprise entre joints est inférieure ou égale à 25m. Mais par exemple dans le cas de dallage ou chape, on doit prévoir des joints de dilatation pour éviter que des fissures ne se produisent, soit en limitant au coulage leurs dimensions, soit par sciage mécanique dans les heures qui suivent la prise, soit par mise en place au moment de coulage de profilés plastiques.

I.8.3-Gonflement :

La pâte du ciment et du béton mûris sont continuellement dans l'eau, après leur mise en place. Ils augmentent en volume et en masse. Ce gonflement est dû à l'absorption d'eau par le gel de ciment. Les molécules d'eau agissent contre des forces de cohésion et tendent à éloigner les particules du gel, créant ainsi une pression de gonflement.

Le gonflement est très important dans l'eau de mer et sous une haute pression, car des structures sous-marines profondes ; par cet effet, il s'en suit une intrusion des chlorures dans le béton.

I.9-Méthode de formulations des BAP :

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (Approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) Pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

Deux grandes familles prévalent actuellement :

- La première [Hayakawa 95, Nagataki 95] concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m³) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants.
- Une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [Peterson 96]. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

I. 9.1- Différentes types des méthodes :

a)- Méthode Japonaise :

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

1. Dosage des gravillons :

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m³. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

2. Dosage du sable :

Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

3. Dosage du liant :

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³).

Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

4. Dosage de l'eau et du super plastifiant :

Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

b)- Méthode Française :

Méthode française (LCPC) : proposée par [De Larrard et al, 1994] :

Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- les distributions granulaires
- les proportions du mélange
- la compacité propre
- la densité apparente

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- la proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple) .
- le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé
- les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.104

La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/ phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle.

La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton auto plaçant sont atteintes.

II.1-Introduction :

Eviter des ruptures fragiles est un des objectifs de toute conception en béton armé. Ce type de rupture est encore plus fréquent dans le cas d'un béton de résistance élevée, du fait que la ductilité est inversement proportionnelle à la résistance. Cependant, avec l'amélioration de ses propriétés mécaniques, ce matériau devient fragile et explosif, et donc moins ductile à la rupture [1].

Le béton de fibres est un matériau qui a connu ces derniers temps beaucoup de développements et nombreuses sont les études qui ont été effectuées durant les trois dernières décennies. On peut améliorer la résistance mécanique (post-fissuration) du béton en y incorporant des fibres (dosages traditionnels de l'ordre de 600 à 1200 g/m³). L'incorporation de celles-ci dans le béton rend ce dernier davantage ductile (moins fragile), multifissurants, capables de limiter la propagation de l'endommagement tout en assurant une durabilité accrue.

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

L'ajout des fibres métalliques a un effet positif sur les caractéristiques mécaniques des bétons. Dans ce domaine, on peut citer l'amélioration simultanée des propriétés mécaniques et de la ductilité. Par ailleurs, la formation et la propagation des fissures sont retardées et les tailles de ces fissures sont largement réduites. L'idée de renforcer les bétons avec des fibres métalliques paraît un bon moyen pour leur conférer une meilleure ductilité.

II.2- Définition des bétons fibrés :

Le béton fibré est un béton dans lequel est incorporé des fibres, Une technique récente, consiste à ajouter au béton des fibres afin d'en améliorer ces propriétés mécaniques (compression, fissuration, flexion).

A la différence des armatures les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement homogène, les fibres les plus couramment utilisées sont les fibres métalliques, les fibres organiques, les fibres synthétiques

II.3- Définition des fibres :

Le terme fibre se rapporte à un corps solide flexible, La fibre est un composant filiforme (rapport longueur /diamètres est très élevé : 25-1500) de faible longueur (5-60mm) et dont l'épaisseur est comprise entre 0.005-0.75mm les fibres sont disponibles sous différentes formes (rondes, plates, gaufrées) d'origine minérale, organique ou métallique, les fibres sont courtes et dispersées dans toute la masse de béton.

L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles depuis les trente dernières années ,l'intérêt de leur utilisation ne cesse de croître pour la fabrication de béton prêt à l'emploi ,du béton préfabriqué et du béton projeté fabriquer à partir soit d'acier soit de plastique ,de verre ,de matériaux naturels elles sont ajoutées au béton lors du malaxage [2].

II.4-les types des fibres :

a) Choix du type de fibres :

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 affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles) [3].

Leur géométrie est très variable (**Figure II-1**). Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post fissuration.

Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre et par frottement à l'interface avec la matrice [5].

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

Béton autoplaçant fibré

L'avantage des fibres à crochets ou ondulées est qu'elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice les rendant plus efficaces que les fibres droites. Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant une répartition non homogène dans le béton.

Les fibres droites sont généralement utilisées pour pallier à ce problème mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacité s'en ressent.

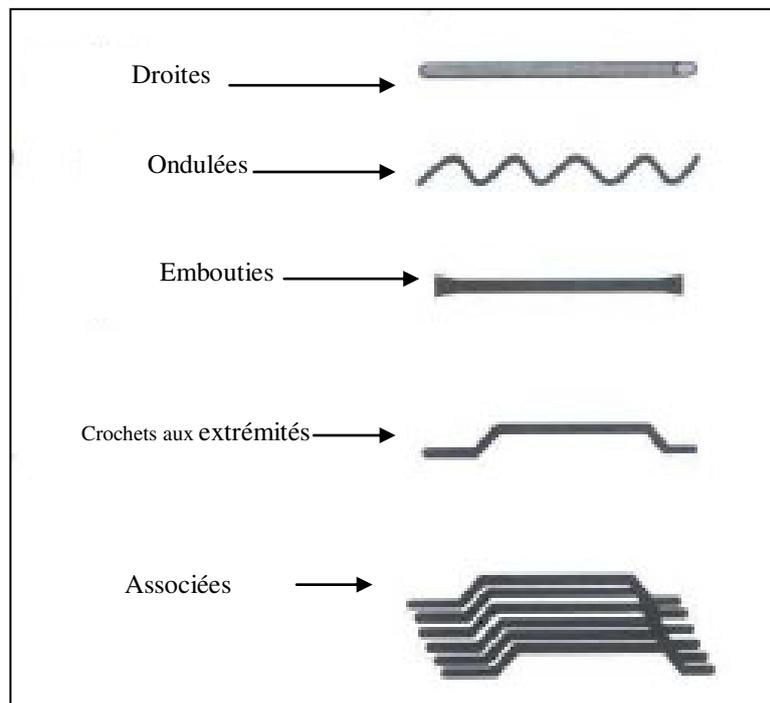


Figure II-1 : Différentes formes géométriques de fibres métalliques

L'élancement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métalliques). Pour un dosage en fibre donné, plus l'élancement est important, plus la maniabilité du béton diminue [4].

Rossi explique ceci par deux constatations empiriques:

- pour une longueur de fibre et un volume donnés, plus le diamètre de la fibre sera faible, plus la surface spécifique sera grande. Ceci conduit à des frottements plus importants entre la fibre et la matrice, mais aussi à un nombre

Béton autoplaçant fibré

de fibres élevé qui augmente la probabilité de contact entre celles-ci. Ceci conduit à une diminution de la maniabilité quand le rapport longueur/diamètre augmente.

- pour un rapport longueur/diamètre fixe et un dosage en fibres donné, si le diamètre diminue, la longueur va elle aussi diminuer. Selon le raisonnement précédent, ceci conduit à une diminution de la maniabilité ce qui est en décalage avec la réalité car dans ce cas, le poids unitaire de la fibre intervient. Plus elles seront grandes, plus elles auront tendance à passer à travers le fluide visqueux constitué par la pâte de ciment pour entrer en contact avec les granulats c'est-à-dire à des frottements solides et donc à une diminution de maniabilité.

En résumé, pour une maniabilité donnée, on peut utiliser un dosage important de fibres courtes ou un dosage faible de fibres longues.

De même, le rapport longueur de la fibre/diamètre du plus gros granulat est aussi un paramètre prépondérant concernant l'efficacité des fibres dans le béton. Rossi explique que dans le cas où la résistance de l'interface entre la matrice cimentaire et le granulat est inférieur à la résistance du granulat et de la matrice, les fissures se développent à cette interface avant de pénétrer dans la matrice. Si la longueur des fibres est proche du diamètre des plus gros granulats, une majorité d'entre elles ne pourront intercepter efficacement les fissures intergranulaires. Pour que les fibres interviennent au niveau de la structure, il est préconisé dans la littérature un rapport longueur de la fibre/diamètre du plus gros granulat de deux à trois.

Dans le cas où la résistance à l'interface entre la matrice cimentaire et les granulats n'est pas la plus faible, les fissures traversent à la fois la pâte et les granulats. Les fibres peuvent alors être pleinement sollicitées, et l'utilisation de fibres de longueur inférieure à trois fois le diamètre du plus gros granulat peut être envisagée.

b) Différents types de fibres :

Chaque type de fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propre :

Béton autoplaçant fibré

Dimensions (diamètre, longueur...), forme (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...), Résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique pacifique aux structures renforcées de fibre [2].

a- Les fibres métalliques :

Les fibres métalliques caractérisées par un module d'élasticité élevé, par conséquent, offre au béton une meilleure résistance à la traction, au choc et améliore sa ductilité en augmentation son pouvoir de résister aux déformations dues à la rupture, de même donne une ténacité appréciable, leurs forme et leur dimensions améliorent leur encreage et leur adhérence (fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités).



Figure II-2 : Les fibres métalliques.

b -Les fibres de fonte amorphe :

Ces types de fibres sont obtenus par refroidissement brusque d'un alliage métallique à base de fer, sont constituées de petits rubans de 1 à 3mm de largeur, contribuent à la limitation des fissures sous chocs [2].

c- Les fibres de verre :

Sous leur forme habituelle, sont caractérisées par une très grande fragilité aux chocs attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration, sous la forme de fibre de faible diamètres, le verre perd ce caractère caractéristique acquière de bonnes mécanique et sont utilisées pour fabriquer des éléments de faible épaisseurs, avec des matrices de pâte ou mortier ou de micro béton [2].



Figure II-3 : les fibres de verre.

d- Les fibres de polypropylènes :

Sont des produits d'origine pétrolière, découverts en 1954, ce matériau de synthèse a connu une extension dans l'industrie de textile ou ils apportent les avantages suivants :

- disponibilité à prix relativement faible
- résistance aux attaques en milieux alcalins et corrosifs.
- augmentation notable de la résistance aux chocs.
- limite l'ouverture des fissures.

Ces fibres sont fréquemment utilisées dans les bâtiments, en particulier dans la réalisation des panneaux décoratifs, revêtement de façade de tuyaux et pieux [2].



Figure II-4 : Les fibres de polypropylènes.

Quelques exemples de trois grandes familles de fibres:

1- Les fibres métalliques :

- acier
- inox
- fonte (amorphe).

2- Les fibres organiques :

- polypropylène ;
- polyamide ;
- acrylique.
- mélange polypropylène/polyéthylène ;
- kevlar ;
- aramide ;
- carbone.

Béton autoplaçant fibré

3- Les fibres minérales :

- verre;
- wollastonite ;
- basalte ;
- mica.

II.5--Les caractéristiques et les propriétés des fibres :

Chaque famille de fibres présente des caractéristiques et des propriétés spécifiques

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

| <i>Caractéristiques et propriétés spécifiques de chaque famille de fibres</i> | | | | | |
|---|--|-------------------------------|---|-------------------------------------|--|
| | <i>Masse volumique (en g/cm³)</i> | <i>Diamètre moyen (en µm)</i> | <i>Résistance à la traction (en N/mm²)</i> | <i>Module d'élasticité (en GPa)</i> | <i>Allongement à la rupture (en %)</i> |
| Fibres métalliques | 7,85 | 50 - 1000 | 1000 - 2500 | 150 - 200 | 3 - 4 |
| Fibres de verre | 2,6 | 9 - 15 | 2000 - 3000 | 80 | 2 - 3,5 |
| Fibres polypropylène | 0,9 | > 4 | 500 - 750 | 5 - 10 | 10 - 20 |

Pour faciliter leur utilisation, les fibres doivent :

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

Remarque :

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

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

- être déformables sans être fragiles ;

Béton autoplaçant fibré

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

II.6-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 [6]

Elles peuvent également dans certaines applications remplacer les armatures passives. Selon les fibres utilisées (forme et nature) et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives a :

- la cohésion du béton frais.
 - la déformabilité avant rupture.
 - la résistance à la traction par flexion.
 - la ductilité et la résistance post fissuration.
 - la résistance aux chocs.
 - la résistance à la fatigue.
 - la résistance à l'usure.
 - la résistance mécanique du béton aux jeunes âges.
 - la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures.
 - la tenue au feu.
 - la résistance à l'abrasion.
- 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-a**.
- Transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes **Figure II-5-b**.

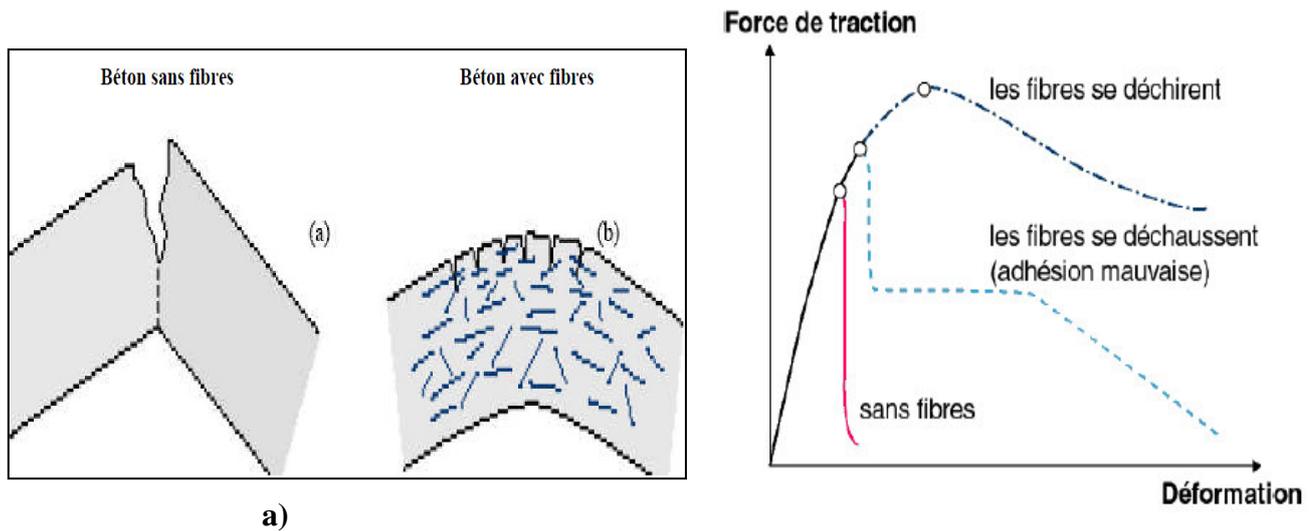


Figure II-5: illustration de l'apport du renfort par des fibres.

II.7- Les atouts des fibres

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

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

II.8-Mécanismes de fonctionnement des fibres dans le béton :

Rossi a décrit le comportement vis-à-vis de la fissuration du béton renforcé de fibres et des structures en béton fibré en fonction de la sollicitation imposée. Dans le cas des efforts de traction, des microfissures apparaissent, suivies de leur connexion et de la formation de macrofissures, jusqu'à la rupture de la structure. Les fibres peuvent couvrir les microfissures, et retarder la formation des macrofissures conférant ainsi une capacité portante résiduelle et une ductilité à l'échelle de la structure [8].

Béton autoplaçant fibré

De plus, l'action des fibres est grandement influencée par leur orientation et le mode d'application des efforts. Dans le cas de fissures provoquées par les efforts en traction, les fissures s'ouvrent selon la direction normale à leurs lèvres et les fibres travaillent en traction.

Dans le cas des fissures provoquées par des efforts de compression, il y a des mouvements tangentiels par rapport aux lèvres des fissures, les fibres sont donc fléchies et travaillent dans des conditions moins favorables (faible rigidité en cisaillement). C'est pourquoi les effets d'un renfort de fibres sont peu visibles en compression pour les bétons de compacité courante.

Les propriétés du béton renforcé de fibres sont le résultat de plusieurs facteurs comme les propriétés de la matrice, la distribution des fibres et les conditions d'interface entre les fibres et le béton, il existe deux stades de comportement lors du chargement d'un béton renforcé de fibres. Au départ, les déformations sont les mêmes pour les fibres et pour la matrice. Le mécanisme de résistance est le transfert des efforts de la pâte aux fibres par des cisaillements qui augmentent linéairement jusqu'au stade de fissuration. Après cet événement, si l'effort de cisaillement demandé est plus grand que la résistance au cisaillement fibre- matrice, le mécanisme de résistance principal devient le frottement, au cours du déchaussement de la fibre [9].

Durant un essai sur du béton renforcé de fibres, lors du chargement jusqu'au pic, les fibres n'interviennent pas. Durant cette phase, les fibres se déforment comme le béton. A l'approche du pic de résistance, des microfissures se développent jusqu'à la localisation d'une macrofissure. Les fibres entrent en jeu une fois l'ouverture de cette macrofissure suffisante.

Elles pontent à ce moment la fissure en transmettant les efforts au béton dans lequel elles sont ancrées. Les efforts résiduels repris diminuent ensuite au fur et à mesure que les fibres se cassent ou se déchaussent en fonction de leur nature et de celle de la matrice qui les enveloppe.

Il est donc nécessaire d'avoir une ouverture de fissure suffisante afin que les fibres soient sollicitées. C'est pour cela que les fibres interviennent peu durant la phase de chargement et de développement des microfissures. De plus, les fibres doivent avoir des dimensions compatibles avec le type de fissures, le niveau de résistance du béton et la taille des granulats.

Pour les microfissures, il est conseillé d'utiliser des fibres courtes et en grande quantité, et pour les macrofissures, des fibres longues en moins grande quantité afin

Béton autoplaçant fibré

d'assurer une bonne ouvrabilité. Dans le cas où la rupture peut arriver à l'interface matrice-granulats, il est recommandé d'utiliser des fibres d'une longueur correspondante à 2 à 3 fois le diamètre maximal des granulats de manière à assurer un ancrage suffisant dans la matrice cimentaire [10].

L'effet des fibres est donc surtout perceptible en traction. Un béton sans renforts, une fois fissuré, n'est capable de supporter que de faibles efforts par endommagement et ponts de matière. Ceci se traduit par une chute brutale de contraintes reprises, comme le montre la courbe de comportement en traction directe correspondant à une teneur en fibre de 0% sur la figure 1. Avec un renfort de fibres, les contraintes dans la fissure sont transmises au béton. Les fibres, en cousant la fissure, assurent une continuité structurale et permettent au béton d'avoir un comportement ductile en lui conférant une capacité portante post-fissuration [11].

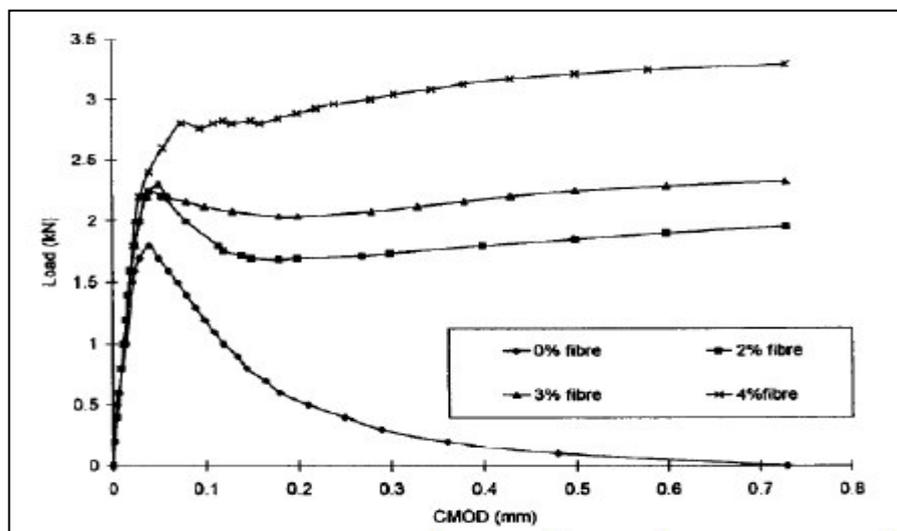


Figure II-6 : Comportement en traction directe en fonction du pourcentage en fibres métalliques.

L'étude du comportement en traction par flexion permet de mieux mettre en évidence l'effet d'un renfort de fibres via le gradient de déformation. L'addition de fibres entraîne une augmentation de résistances et une augmentation de la ductilité (**Figure II-6**). Le comportement post-fissuration est significativement amélioré.

L'augmentation de la résistance résiduelle est due aux ponts et liaisons créés par les fibres, placés stratégiquement et qui cousent les fissures. Lorsque les résistances résiduelles sont supérieures à la résistance au pic, on dit que le béton a un comportement ductile durcissant. Le processus de rupture se développe lors de la perte

Béton autoplaçant fibré

de ces liaisons et du déchaussement des fibres ou de la rupture de ces dernières. Ce phénomène est fonction de la forme, de la taille des fibres et de leur adhérence à la matrice cimentaire.

Le comportement en compression n'est que peu influencé par la présence des fibres. Les fissures créées ne permettent pas aux fibres d'être sollicitées suffisamment pour améliorer significativement le comportement du béton.

Néanmoins, le comportement des bétons renforcés de fibres, quel que soit le type de sollicitation, dépend fortement du type de fibres choisi, de leur géométrie, de leur distribution et de leur orientation ainsi que de la compacité du béton qui les contient.

II.9-Domains d'application des bétons fibres :

Tableau II-2 : Domaines d'application des bétons fibres.

| Types de fibres | Dosage courant | Domaine d'application privilégié | Exemples d'application |
|-----------------------------|--|--|---|
| Fibres métalliques | 0.5 à 2% en volume 40 à 160 kg/m ³ | Renforts pour bétons structurels et armature structurelle | -dallages, sols industriels, planchers dalles de compression -éléments préfabriqués -voussoirs de tunnels, poutres, conteneurs, tuyaux -béton projetés en travaux souterrains, stabilisation de pente et ouvrages d'assainissement -pieux de fondation, semelles filantes |
| Fibres polypropylène | 0.5 à 2% en volume 0.5 à 2 kg/m ³ | Limitation de la fissuration liée au retrait Amélioration de la tenue au feu des bétons | -dallages -voussoirs de tunnels Revêtements d'ouvrages souterrains -mortiers projetés -parements esthétiques |
| Fibres de verre | 1 à 2% | Réalisation d'éléments préfabriqués très minces | -parements architectoniques -panneaux de façade -éléments décoratifs |

II.10-Les béton autoplaçant renforcés de fibres :

1-Introduction :

Malgré les améliorations appréciables obtenues au niveau du comportement mécanique des bétons, l'incorporation des fibres dans le béton restent problématique du point de vue de l'ouvrabilité et de réparation homogène des fibres .pour remédier a ces problèmes, l'association des fibres avec le béton autoplaçant (BAP) parait prometteuse .en effet, ce béton de dernière génération se caractérise par une excellente maniabilité que lui permet de se mettre en place sous l'effet de la simple gravité. L'absence de vibration de ces matériaux évite une distribution hétérogène des fibres dans la matrice.

L'addition des fibres influe directement sur la rhéologie des bétons à l'état frais et donc de manière similaire sur l'ouvrabilité des BAP, d'après GROTH, cette influence est fonction du dosage en fibres et leurs caractéristiques géométriques notamment l'élanement. Ces propriétés ont été mises en évidence par différents essais à l'état frais.

2-Composition des BAPF:

La composition de mélange du béton autoplaçant renforcé de fibres est souvent un compromis entre conditions sur l'état frais et durci, la forme des fibres diffère de celle des agrégats, en raison de la longue forme ovale et/ou d'une superficie plus élevée l'ouvrabilité du béton est affectée. Le contenu pratique de la fibre est limité : une diminution soudaine d'ouvrabilité se produit à un certain contenu de fibre, qui dépend de la composition du mélange et du type appliqué de fibre.les paramètres touchant sur le comportement du béton dans l'état frais ont été variés dans plusieurs études expérimentales pour trouver leur effet sur les caractéristiques principales du BAP.

3- les propriétés des BAPF à l'état frais:

Les bétons autoplaçant fibrés ont des propriétés qui ont été mises en évidence par différents essais à l'état frais, par exemple l'essai d'étalement «SLUMP FLOW», l'essai de V-FUNNEL qui permet d'évaluer notamment le risque de blocage .pour bien déterminer l'effet des fibres, ces essais ont également été effectués avec un béton autoplaçant de référence. GRUNEWALD à réalisé les différents essais d'ouvrabilité sur les différentes compositions des bétons à l'état frais.

❖ Effets sur l'étalement

L'analyse de ces résultats montre que l'étalement diminue lorsque la teneur en fibres augmente. Le degré de diminution dépend de la teneur en sable dans la composition de référence. On remarque aussi sur la (**Figure II-7-a**) une ovalisation de la galette pour les compositions renforcées de fibres métalliques ayant une grande surface spécifique: Dramix 80/30 PB), ce qui indique que l'étalement est contrecarré par les fibres dans une ou plusieurs directions. En outre, pour certaines compositions voir (**Figure II-7-b**) avec des fibres plus longues (ex : Dramix 80/60 BN), une ségrégation des granulats et des fibres au centre de la galette a été remarquée. La (**Figure II-7-c**) illustre l'aspect de la galette dans le cas intermédiaire, provoquant ainsi une ovalisation de la galette et une accumulation des particules au milieu

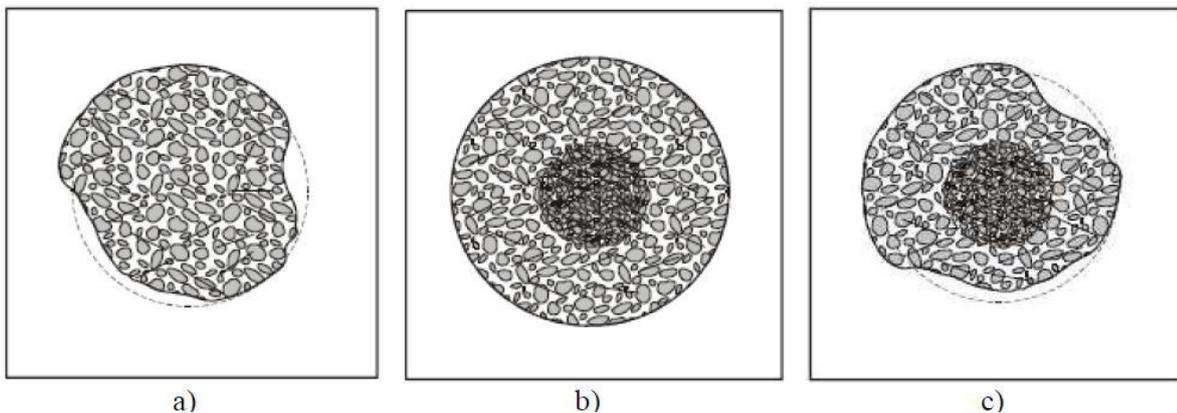


Figure II-7 : Effets des fibres sur l'étalement des BAP

4-Orientation et distribution des fibres :

L'orientation et la distribution des fibres affectent les performances et les caractéristiques des BAP fibrés à l'état durci. Petersson a réalisé une étude sur la distribution des fibres métalliques dans la boîte en L qui a consisté à réaliser des photographies aux rayons X des sections transversales du béton durci. Les conclusions retenues sont que les fibres étaient relativement bien distribuées, bien qu'une légère ségrégation des fibres fût observée par rapport aux gros granulats. Par ailleurs, il a été constaté que la majorité des fibres étaient orientées dans le sens de l'écoulement ; cet effet était plus prononcé pour des fibres de plus grande longueur.

Groth et Nemegeer a aussi conclu que l'écoulement oriente les fibres. Même si l'écoulement propre aux BAP confère aux fibres une orientation préférentielle, le même auteur est arrivé à la conclusion selon laquelle, aux dosages en fibres courants, l'effet de ce renfort est relativement le même pour un béton vibré ou autoplaçant du moment qu'ils ont la même classe de résistance et le même type et dosage en fibres. Cette conclusion a été tirée en se basant essentiellement sur les performances en flexion.

5-Comportement mécanique des bétons autoplaçant fibrés :

Les propriétés mécaniques permettant de caractériser un BAP fibré à l'état durci sont les résistances à la compression, à la traction, et à la flexion. Les fibres influent directement sur l'ouverture de la fissure et donc sur la rigidité et la ductilité après fissuration.

a)- Comportement à la flexion

Une augmentation de la quantité de fibres conduit à une amélioration de la rigidité, et du comportement en flexion des bétons autoplaçants renforcés de fibres.

b)- Comportement à la compression et à la traction

La résistance à la compression n'était pas significativement sensible à l'adjonction de fibres dans un BAP.

La résistance au jeune âge est quelque peu faible, probablement due à un effet retard de l'hydratation des mélanges et/ou des fillers, lié aux adjuvants. Néanmoins, à long terme, la résistance correspond à celle d'un béton ordinaire avec un même rapport E/L. Les résistances à la compression visées à 28 jours ont été atteintes pour tous les types de bétons, avec une très légère diminution des rapports R_{comp}/R_{trac} entre 7 et 28 jours. Cette réduction modérée est probablement due à l'amélioration de l'adhérence des fibres avec le béton dans le temps, mécanisme dont dépend fortement la résistance à la traction.

III.1-Introduction :

On recherche à formuler des bétons à l'état frais dont la mise en œuvre nécessite le minimum d'intervention humaine. Dans cette gamme, on retrouve les Bétons Auto-Plaçant (BAP), les Bétons Auto-Nivelant(BAN), les Bétons Pompés. Les écoulements rhéologiques de tels bétons sont améliorés par l'utilisation d'adjuvants de plus en plus performants. Cependant les mécanismes d'action de ce polymère en présence du ciment compliquent généralement la rhéologie de ces bétons.

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique.

La rhéologie donne les relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume, en tenant éventuellement compte de leur histoire et des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps. Ces relations dites de comportement, font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées[1].

III.2-Définition de la rhéologie :

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps. Les procédés de préparation de produits (solutions, pâtes...etc) ou de formage de pièces (en métallurgie, en plasturgie...etc) nécessitent inmanquablement l'écoulement de la matière, il est donc nécessaire de connaître le comportement de cette matière pour déterminer les forces à mettre en jeu.

La rhéologie se décompose en plusieurs sortes d'études :

- **rhéologie expérimentale** : détermination expérimentale des relations de comportement (entre contraintes et déformation ou vitesse de déformation) [2].
- **rhéologie structurale** : explication des comportements à partir de la structure du matériau [2].
- **rhéologie théorique** : fournir des modèles mathématiques en nombre limité des comportements indépendamment de la structure microscopique [2].

III.3-Paramètres rhéologiques des suspensions :

a)Seuil de cisaillement :

Le seuil de cisaillement est la contrainte minimale à atteindre pour que le fluide s'écoule. Il correspond à l'énergie minimale qu'on doit apporter pour briser le potentiel d'interaction physico-chimique des particules.

Les valeurs du seuil de cisaillement des suspensions sont identifiées à l'aide du modèle de Legrand

La **figure III-1** montre que le seuil de cisaillement est diminué avec le décroissement de la concentration volumique solide des suspensions. Cela peut être expliqué par la diminution de l'interaction physico-chimique entre les particules nanométriques de silice [3].

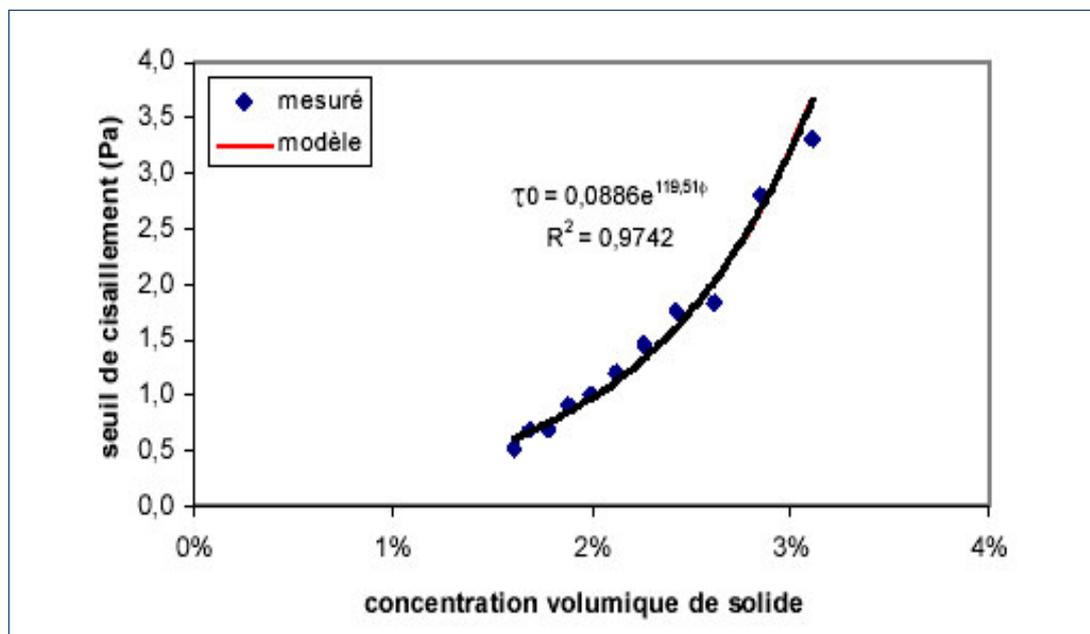


Figure III-1 : Evolution du seuil de cisaillement en fonction de la concentration volumique solide des fluides saturants (2% nano silice en extrait sec).
Modélisation par le modèle de Legrand

b) Viscosité plastique :

La viscosité est définie, pour un fluide newtonien, comme le rapport de la contrainte de cisaillement τ sur le gradient de vitesse de cisaillement ϵ , son unité est le **Pa.s** .

Elle représente alors la résistance à l'écoulement d'un fluide.

Pour les fluides non newtoniens, il peut être défini une viscosité, comme étant le rapport τ / ϵ , il s'agit alors d'une viscosité apparente .il est aussi d'usage de définir

La rhéologie

une viscosité dynamique représentant la résistance à l'écoulement du fluide pour un gradient de vitesse donnée, comme la dérivée en ce point de la courbe $\tau = f(\dot{\epsilon})$ [4].

La **figure III-2** montre que la viscosité plastique croît selon l'augmentation de la concentration volumique solide du fluide saturant. La loi d'évolution est de type linéaire. Selon cette évolution, le seuil de cisaillement augmente aussi [3].

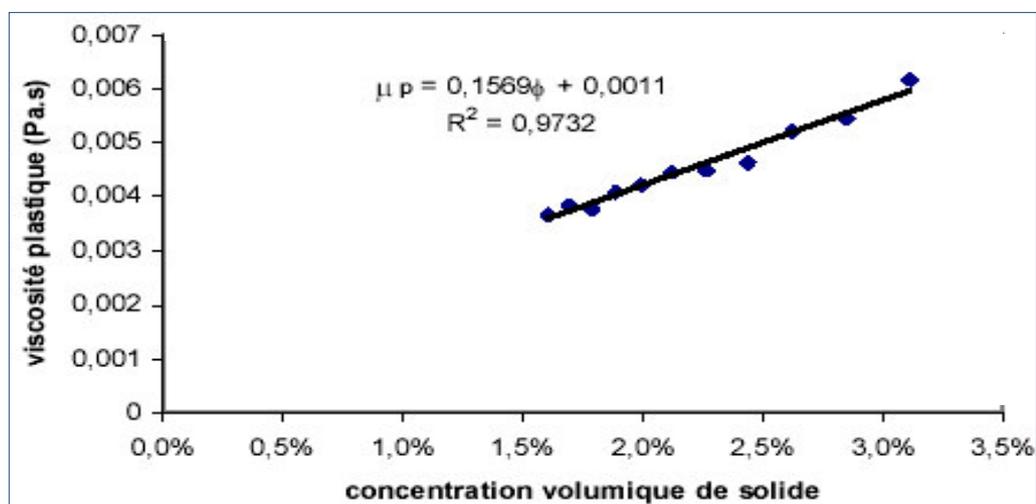


Figure III-2 : Evolution de la viscosité plastique en fonction de la concentration volumique solide des fluides saturants

c) Thixotropie :

La thixotropie étant un comportement dépendant du cisaillement et du temps, il est souhaitable de maintenir l'un des deux facteurs constant (le cisaillement) et d'observer l'évolution de la structure en fonction du temps. Pour caractériser la thixotropie, plusieurs méthodes ont été utilisées. La thixotropie peut être caractérisée de manière simple par un indice. Pour mesurer l'indice de thixotropie on se place à gradient de vitesse constant et on mesure la diminution de viscosité entre le temps 0 et le temps T. Il s'agit d'une grandeur sans dimension. Plus l'indice est élevé, plus le caractère thixotrope est marqué [2].

Une autre façon d'évaluer la thixotropie est la mesure de l'aire comprise entre les courbes d'écoulement montantes et descendantes d'un rhéogramme, mais c'est une mesure très arbitraire. Cette surface dépend en effet non seulement du volume de l'échantillon, de la gamme de gradient de vitesse couverte, mais aussi du temps mis à couvrir cette gamme. Par ailleurs, elle ne donne aucune information sur la reprise de la structure thixotrope (Jacques Bouton, 1996). C'est Bouton qui a associé les différentes méthodes avec un enchaînement automatique, comme la mesure à vitesse imposée, contrainte imposée, l'essai de fluage pour préciser la structure initiale du

matériau. La courbe d'écoulement obtenue par incrémentation progressive de la contrainte permet une bonne mesure du seuil d'écoulement. La boucle d'hystérésis obtenue entre les courbes d'écoulement à vitesse de déformation imposée croissante et décroissante caractérise la déstructuration thixotrope. L'essai dynamique en oscillation forcée en fonction du temps, sous fréquence constante et faible amplitude de déformation caractérise la restructuration (J. Bouton *et al.*, 1996).

Aicha F. Ghezal et Kamal H. Khayat (Aicha *et al.*, 1996) ont réalisé des mesures de thixotropie en examinant le comportement de la contrainte de cisaillement en fonction du temps à un taux de cisaillement constant. Cette méthode est apparemment adaptée à l'interprétation de l'effet de la condition d'écoulement de différente force entre les particules du système considéré.

III.4-Stabilité rhéologique des suspensions :

L'utilisation de rapports eau/ciment (E/C) élevés est nécessaire pour obtenir une bonne maniabilité et une bonne pénétrabilité du coulis. Cependant, la quantité d'eau utilisée pour de tels mélanges excède celle qui est nécessaire à l'hydratation du ciment [NONVEILLER, 1989]. Dès que le coulis se trouve au repos, le phénomène de sédimentation apparaît immédiatement, l'eau en excès surnagera au-dessus des particules de ciment qui vont sédimenter au fond de la fissure.

Durant le malaxage, les grains de ciment sont dispersés et suspendus dans l'eau. Toute suspension de ciment a tendance à sédimenter par gravité. Toutefois, ce phénomène affecte le seuil de rigidité et la pénétrabilité. À cause du ressuage, conséquence directe de la sédimentation, une grande partie des fissures injectées restent remplies avec l'eau de ressuage. La perte d'eau affecte la maniabilité des pâtes de ciment dans le temps. Ceci provoque une augmentation rapide de la viscosité plastique et du seuil de rigidité des mélanges. Injectés sous pression, les coulis de ciment doivent présenter une bonne stabilité qui se traduit par une bonne fluidité. Pour un minimum de pression d'injection et, en même temps, une bonne cohésion à éviter les risques de ségrégation. En effet, si le coulis est susceptible au phénomène de la ségrégation, on risque d'avoir un blocage d'écoulement pendant les travaux d'injection. Dans la plupart des cas, la solution envisagée est d'augmenter la pression d'injection, mais cela peut aggraver la propagation des fissures d'un côté et, d'un autre côté, nuire à la qualité du coulis.

Un coulis de ciment doit être stable dans le temps et avoir un temps de prise assez long pour faciliter son transport et sa mise en place. Un coulis de ciment est stable, si la sédimentation due à la gravité est nulle ou maintenue au minimum. Le critère utilisé est d'évaluer le rapport de la hauteur d'eau au-dessus du volume initial du coulis (1000 ml). Un coulis est considéré stable si ce rapport est de 5% après deux heures [LOMBARD 1985] [4].

III.5-Rôle des adjuvants :

Les adjuvants sont des produits organiques et inorganiques qui, quand ils sont ajoutés en petite quantité, modifient certaines propriétés des bétons. Au vu de leur grand nombre, la classification des adjuvants devient difficile. Cette classification est rendue encore plus difficile par le fait que certains adjuvants peuvent avoir plus d'une fonction. La classification la plus utilisée est celle qui se base sur la fonction principale de chaque adjuvant [5].

III.5.1-Classification des adjuvants : (selon F. Massazza)

a- Adjuvants qui modifient la prise et le durcissement :

- Accélérateurs
- Retardateurs

b- Adjuvants qui modifient la rhéologie :

- Réducteurs d'eau : plastifiants et superplastifiants
- Adjuvants affectant la viscosité

c- Adjuvants entraîneurs d'air dans le mélange :

- Adjuvants entraîneurs et desentraîneurs d'air
- Adjuvants producteurs de gaz
- Adjuvants producteurs de mousse

d-Adjuvants qui modifient la résistance du béton aux attaques physiques et chimiques :

- Adjuvants antigél
- Inhibiteurs de corrosion
- Produits qui améliorent la résistance aux attaques chimiques

III.5.2-Les superplastifiants :

L'apparition des bétons autoplaçant et des bétons Hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP). Les superplastifiants permettent en

La rhéologie

effet de défloculer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau initialement piégée entre les floccs est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange *figure II-5*. Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place [5].

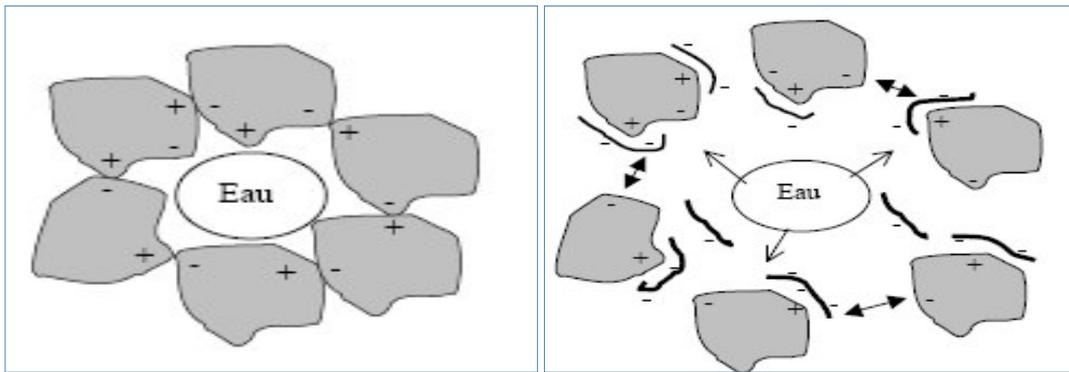


Figure III-3: Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment.

L'ajout d'un superplastifiant permet ainsi d'augmenter significativement la fluidité des BAP que ce soit du point de vue de leur étalement ou du point de vue de leur seuil d'écoulement.

La **figure III- 4** montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en superplastifiant.

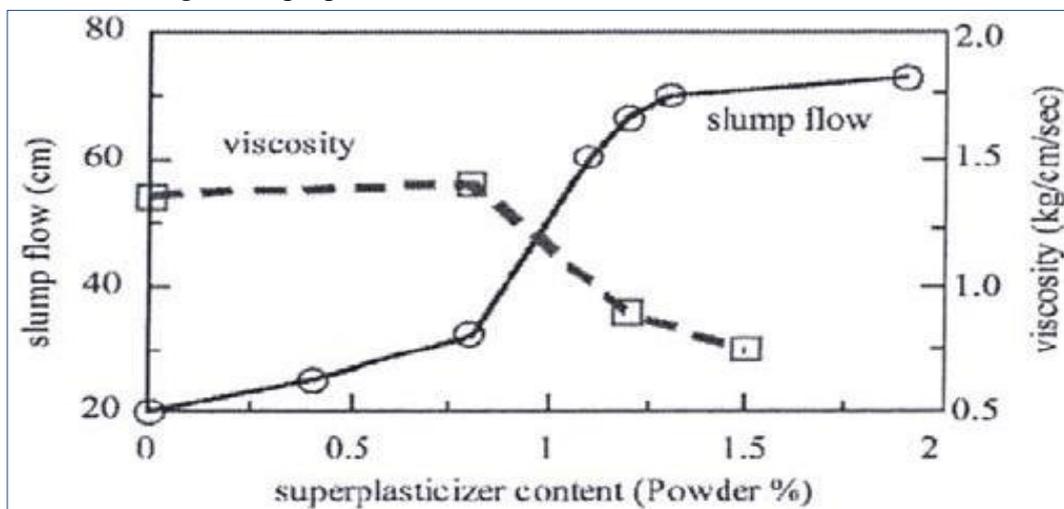


Figure III-4 : Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton

La rhéologie

Or, nous avons vu que l'étalement et le seuil d'écoulement étaient liés. Les superplastifiants permettent donc également de réduire le seuil d'écoulement. Par ailleurs, l'interprétation physique du modèle de Bingham et du modèle de Herschel-Bulkley montre que le seuil d'écoulement est généré par les frottements intergranulaires et que la viscosité dépend du degré de défloculation. Nous avons vu que la viscosité dépend également de la fraction volumique solide (φ).

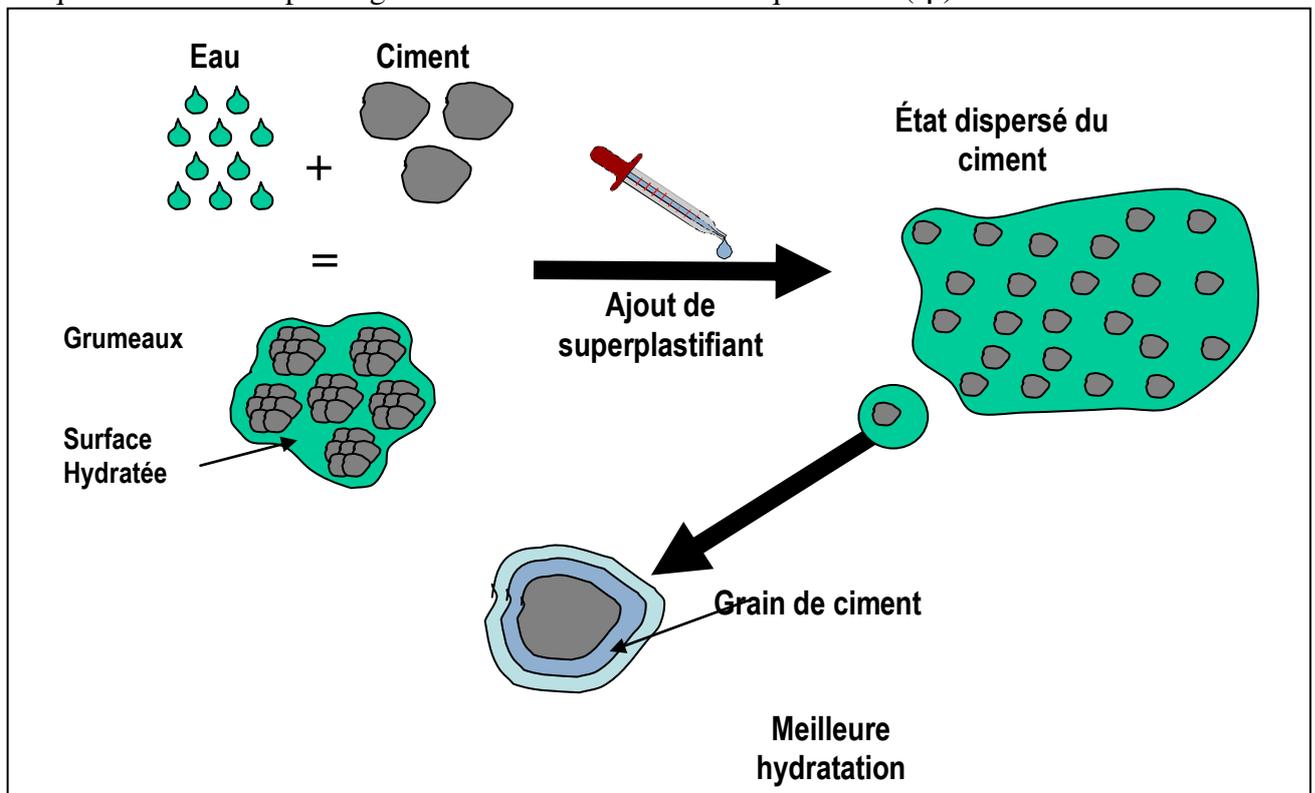


Figure III-5 : Mode d'action des superplastifiants

III.5. 2.1- Effets des superplastifiants sur les betons :

a) Effet sur le béton frais :

- ❖ Amélioration de l'ouvrabilité.
- ❖ Diminution de la teneur en eau.
- ❖ Maintien de l'ouvrabilité dans le temps
- ❖ Diminution de ressuage et de la ségrégation
- ❖ Amélioration de la pompabilité du béton
- ❖ Réduction du retrait hydraulique.

b) Effet sur le béton durcis :

- ❖ Amélioration des résistances mécaniques à court et à long terme.
- ❖ Diminution du retrait.
- ❖ Amélioration de compacité du béton.
- ❖ Diminution de coefficient de compacité de la matrice du ciment

III.5.2.2- Les différentes classes des superplastifiants :

Les superplastifiants sont des poly électrolytes organiques, appartenant à la catégorie des dispersants polymériques.

Les superplastifiants sont généralement classés en quatre groupes

1. les polycondensats de formaldéhyde et de mélamine sulfonée (PMS),
2. les polycondensats de formaldéhyde et de naphthalène sulfoné (PNS),
3. les lignosulfonates modifiés (MLS)
4. les autres incluant les esters d'acides sulfoniques, les polyacrylates et les poly carboxylates.

Objectif et méthodologie du travail :

Cette étude a pour objectif de formuler un béton autoplaçant avec différents ajouts (laitier, pouzzolane, sable Boussaâda (broyé et non broyé)) renforcé de fibres métalliques par la méthode japonaise afin de connaître l'influence des ajouts et les fibres métalliques sur le comportement de ces bétons à l'état frais (caractéristiques rhéologiques) et à l'état durci (caractéristiques physico-mécaniques).

Pour cela, nous avons réparti le travail en quatre parties :

Première partie : une caractérisation des matières premières :

- sables (OUED SOUF).
- Gravier 3/8 et 8/15 (SETIF).
- le ciment CPJ 42,5 N Mâtine LAFARGE.
- Superplastifiant «SUPERIOR 12WG» TEKNACHEM.
- Laitier (HADJAR).
- Sable(BOUSAADA).
- Pouzzolane (BENI SAF).
- Fibre métallique (GRANITEX).

Deuxième partie : Etude rhéologique sur pâte (ciment + fines + eau + adjuvant).

Troisième partie : Optimisation de la composition de BAP renforcé de fibres métalliques avec les différents ajouts.

Calcul de la composition par la méthode japonaise.

Quatrième partie : résultats, interprétation.

Conclusion.

Partie I :

Dans cette partie, nous exposons les différentes caractéristiques des constituants

IV.1-Caractéristiques des constituants :

Dans cette partie, on traite la détermination des caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton. La connaissance de leurs caractéristiques est impérative à toute recherche ou étude d'investigation, puisque chacune pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. C'est pour cette raison qu'on procède à la caractérisation de chaque constituant de béton.

IV.1.1-L'eau de gâchage :

L'eau utilisée est une eau potable (de robinet).

IV.1.2 - Le Gravier :

IV.1.2 .1-Gravier (3/8) de Sétif:

L'analyse granulométrique de ce gravier est faite selon la norme (NF EN 933-1)

Cette analyse nous a permis de connaître et de déterminer la classe réelle du gravier.

Tableau IV-1 : Analyse granulométrique du gravier (3/8) de SETIF.

| Tamis ouverture (mm) | Masse des refus cumulés Ri (g) | Pourcentage refus cumulés (%) | Pourcentage tamisât cumulés (%) |
|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 8 | 0 | 0,0 | 100,0 |
| 6,3 | 48 | 2,4 | 97,6 |
| 5 | 632 | 31,9 | 68,1 |
| 4 | 837 | 42,3 | 57,7 |
| 3,15 | 1248 | 63,0 | 37,0 |
| 2,5 | 1512 | 76,4 | 23,6 |
| 2 | 1610 | 81,3 | 18,7 |
| 1,25 | 1664 | 84,0 | 16,0 |
| 1 | 1695 | 85,6 | 14,4 |
| 0,63 | 1752 | 88,5 | 11,5 |
| 0,5 | 1768 | 89,3 | 10,7 |
| 0,315 | 1786 | 90,2 | 9,8 |
| 0,25 | 1791 | 90,5 | 9,5 |
| 0,125 | 1806 | 91,2 | 8,8 |
| 0,08 | 1810 | 91,4 | 8,6 |
| 0,063 | 1812 | 91,5 | 8,5 |
| Fonds de tamis | 1812 | 91,5 | 8,5 |

Tableau IV-2 : Caractéristiques physiques de gravier (3/8) de SETIF.

| Caractéristiques | Résultats | Unités |
|----------------------------|-----------|-----------------|
| La densité | 2.79 | g/cm^3 |
| L'absorption d'eau | 0.5 | % |
| La masse volumique réelle | 2.78 | g/cm^3 |
| La masse volumique Imbibée | 2.79 | g/cm^3 |
| La teneur en eau | 1.01 | % |
| Micro Deval | 14.4 | % |
| Los Angles | 25.52 | % |
| La porosité | 1.33 | % |

a) Composition minéralogique :

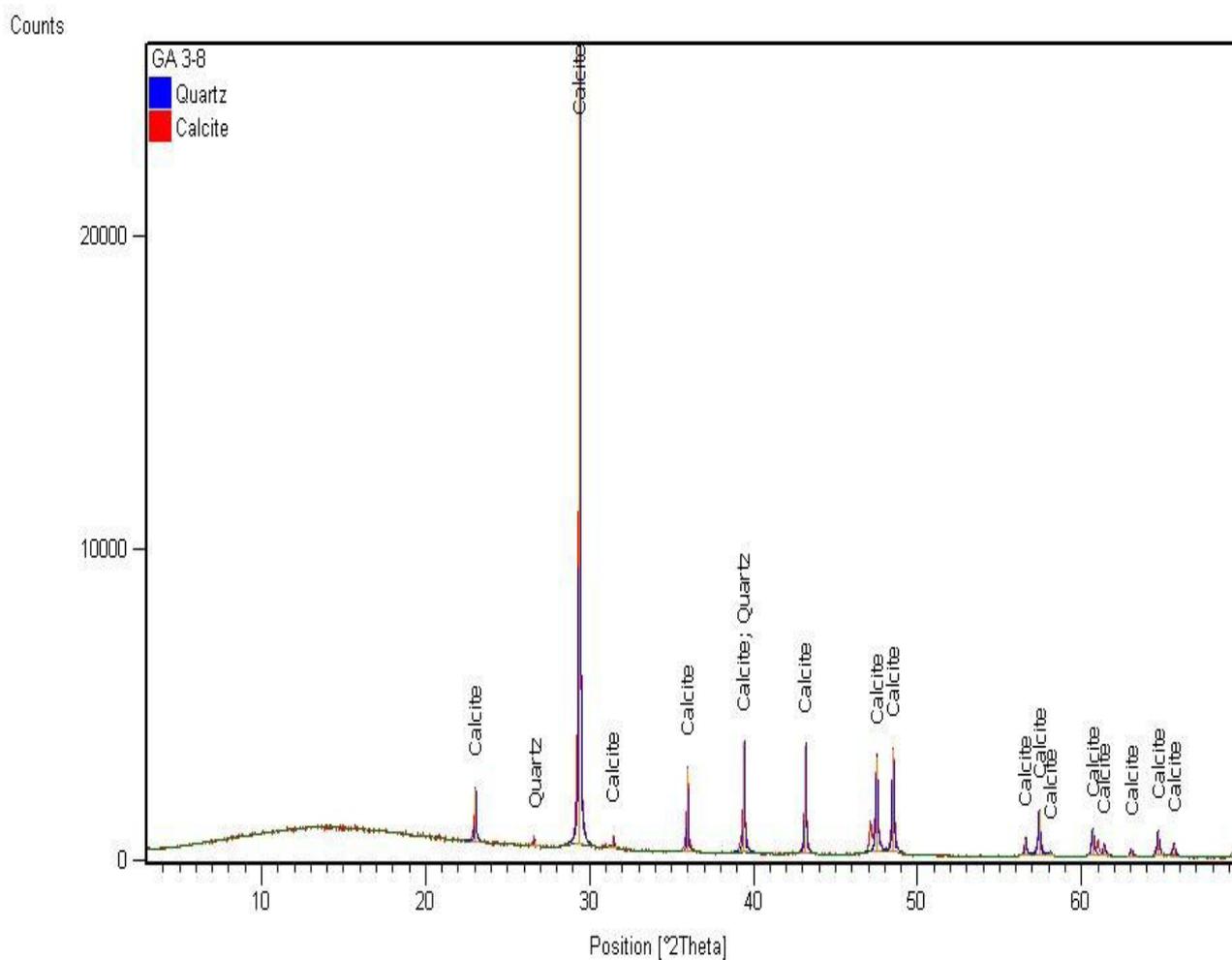


Figure IV-1: Diffractogramme des RX de gravier (3/8)

IV.1.2.2-Gravier (8/15) de SETIF:

Tableau IV-3 : Analyse granulométrique du gravier 8/15.

| Tamis Ouverture (mm) | Masse des refus cumulés Ri (g) | Pourcentage refus cumulés (%) | Pourcentage tamisât cumulés (%) |
|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 20 | 0 | 0,0 | 100,0 |
| 16 | 81 | 2,5 | 97,5 |
| 12,5 | 839 | 25,7 | 74,3 |
| 10 | 1988 | 60,9 | 39,1 |
| 8 | 2851 | 87,4 | 12,6 |
| 6,3 | 3193 | 97,9 | 2,1 |
| 5 | 3246 | 99,5 | 0,5 |
| 0,063 | 3246 | 99,5 | 0,5 |
| Fonds de tamis | 3250 | 99,6 | 0,4 |

Tableau IV-4: Caractéristiques physiques de gravier 8/15.

| Caractéristiques | Résultats | Unités |
|----------------------------|-----------|-------------------|
| La densité | 2.76 | g/cm ³ |
| L'absorption d'eau | 0.42 | % |
| La masse volumique réelle | 2.71 | g/cm ³ |
| La masse volumique Imbibée | 2.72 | g/cm ³ |
| La teneur en eau | 0.06 | % |
| Micro Deval | 13 | % |
| Los Angles | 29.84 | % |
| La porosité | 1.12 | % |

a) Composition minéralogique :

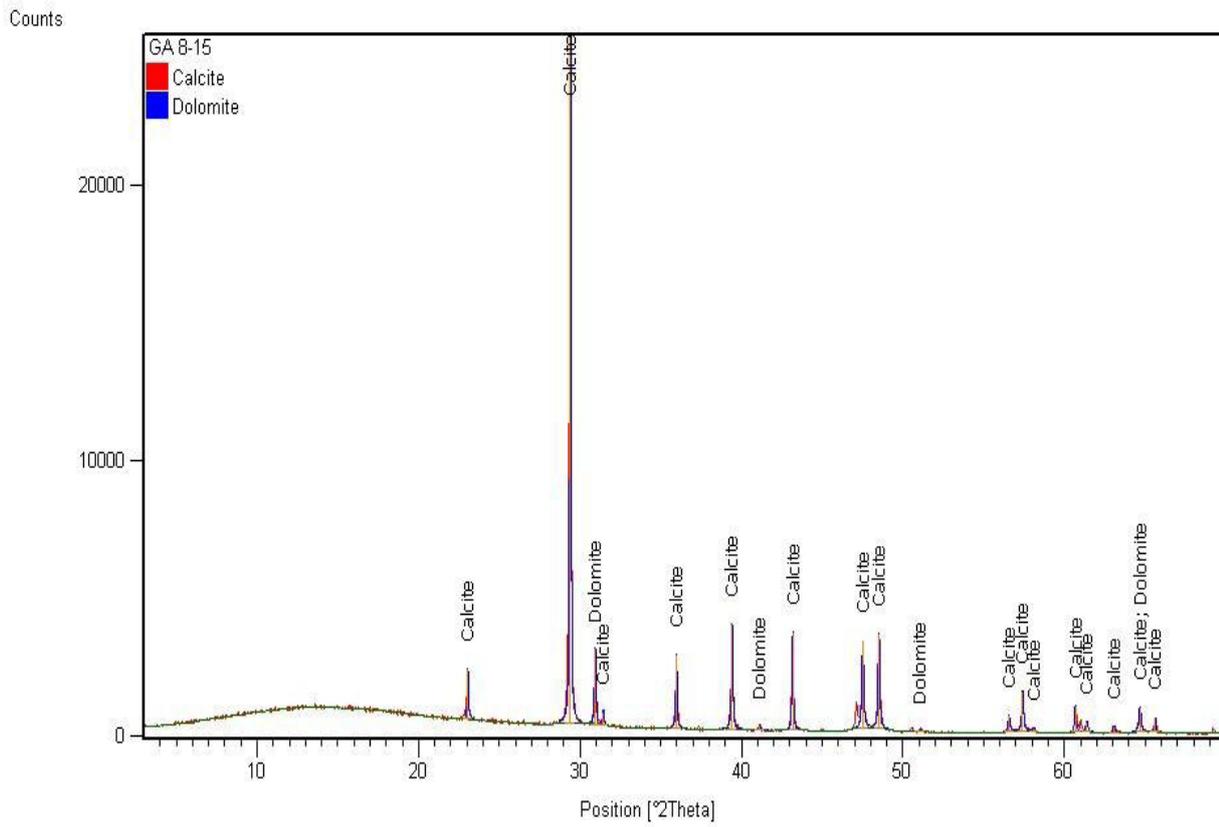


Figure IV-2: Diffractogramme des RX de gravier (8/15).

IV.1.3-Le Sable :

Le sable utilisé est : sable moyen d'OUED SOUF

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

| Masse sèche totale : $M_1 = 636$ g Masse sèche après lavage : $M_2 = 631$ g | | Masse sèche des fines retirées par lavage : $M_1 - M_2 = 5$ g | | |
|--|--------------------|--|-----------------|-----------------------|
| Ouverture des tamis (mm) | Poids (g) | Teneurs (%) | | Module de finesse (%) |
| | Refus cumulés (Ri) | Refus cumulés | Tamisât cumulés | |
| 6.3 | 00 | 00 | 100 | 2.56 |
| 5 | 5 | 0.78 | 99.22 | |
| 4 | 9 | 1.41 | 98.59 | |
| 3.15 | 13 | 2.04 | 97.96 | |
| 2.5 | 20 | 3.14 | 96.86 | |
| 2 | 29 | 4.55 | 95.45 | |
| 1.25 | 73 | 11.47 | 88.53 | |
| 1 | 106 | 16.66 | 83.34 | |
| 0.63 | 242 | 38.05 | 61.95 | |
| 0.5 | 329 | 51.72 | 48.28 | |
| 0.315 | 491 | 77.20 | 22.80 | |
| 0.250 | 540 | 84.90 | 15.1 | |
| 0.125 | 619 | 97.32 | 2.68 | |
| 0.08 | 629 | 98.89 | 1.11 | |
| 0.063 | 630 | 99.05 | 0.95 | |
| Fond de tamis | 631 | 99.21 | 0.79 | |

Tableau IV-6 : Caractéristiques de sable de Ouedsouf

| Caractéristiques | Résultants | Unité |
|----------------------------|------------|-------------------|
| Masse volumique apparente. | 1647 | Kg/m ³ |
| Masse volumique absolue. | 2630 | Kg/m ³ |
| Tenure en eau. | 1.62 | % |
| Tenure en fines | 1.83 | % |
| E.S | 65 | % |

Analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1 ENR. N° 0767/17

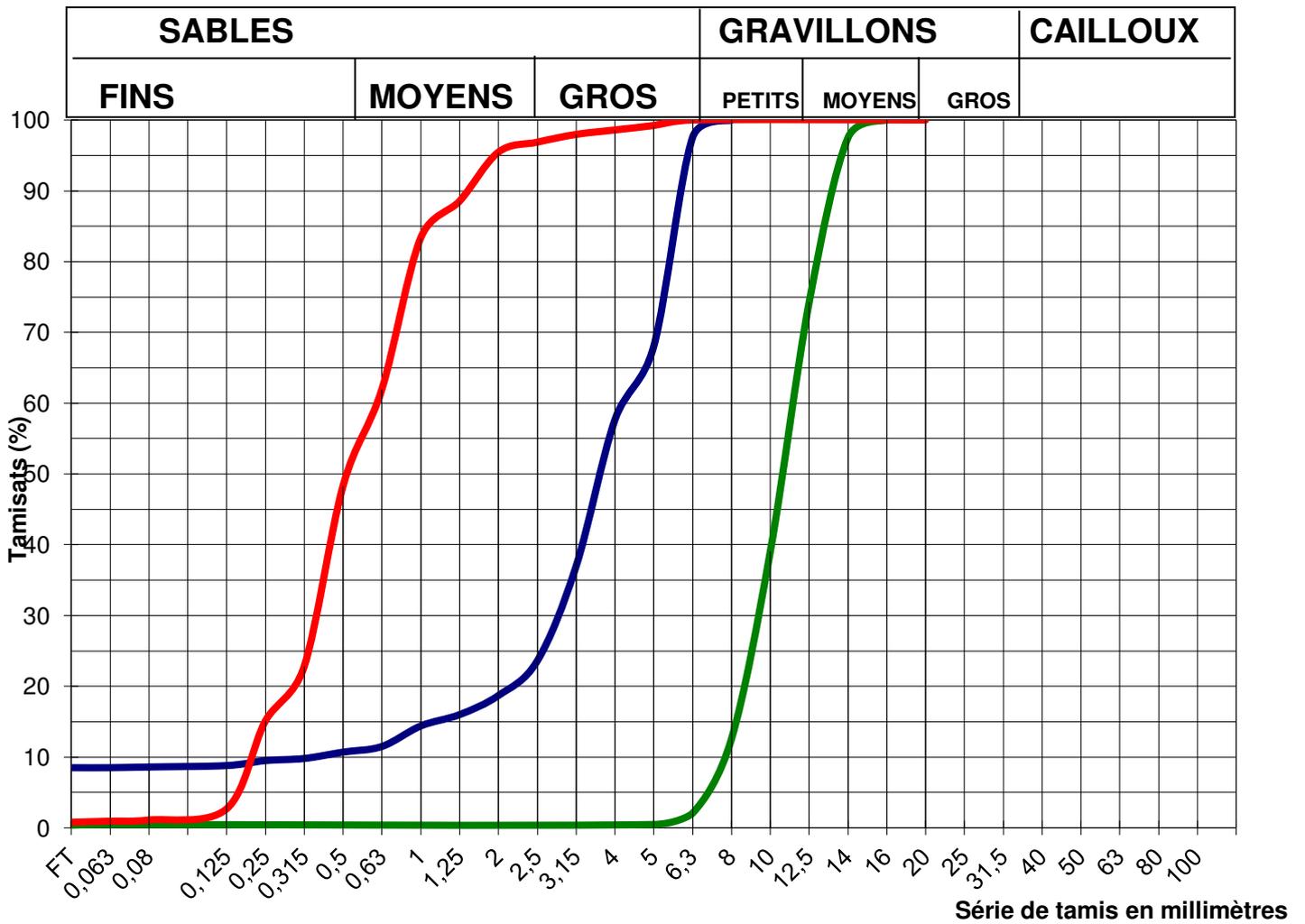


Figure IV-3: Analyse granulométrique par tamisage

IV.1.4-Le Ciment :

Le type de ciment choisi est un « CEM II - 42.5 » de M'sila de nom commercial MATINE et dont les caractéristiques sont les suivantes :

IV.1.4.1- Composition chimique :

Tableau IV-7: Composition chimique du ciment.

| Eléments | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | MgO | Chlorures | Ins | PAF |
|----------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------|------------------|------|-----------|-----|------|
| % | 60.4 | 20.71 | 5.45 | 3.36 | 2.37 | 0.23 | 0.65 | 2.15 | 0.07 | - | 4.28 |

IV.1.4.2- Composition minéralogique :

Tableau IV-8 : Composition minéralogique du ciment.

| Eléments | C2S | C3S | C3A | C4AF | CaO _L | Gypse | Calcaire |
|----------|-----|-----|-----|------|------------------|-------|----------|
| % | 52 | 22 | 03 | 18 | 01 | 04 | 13 |

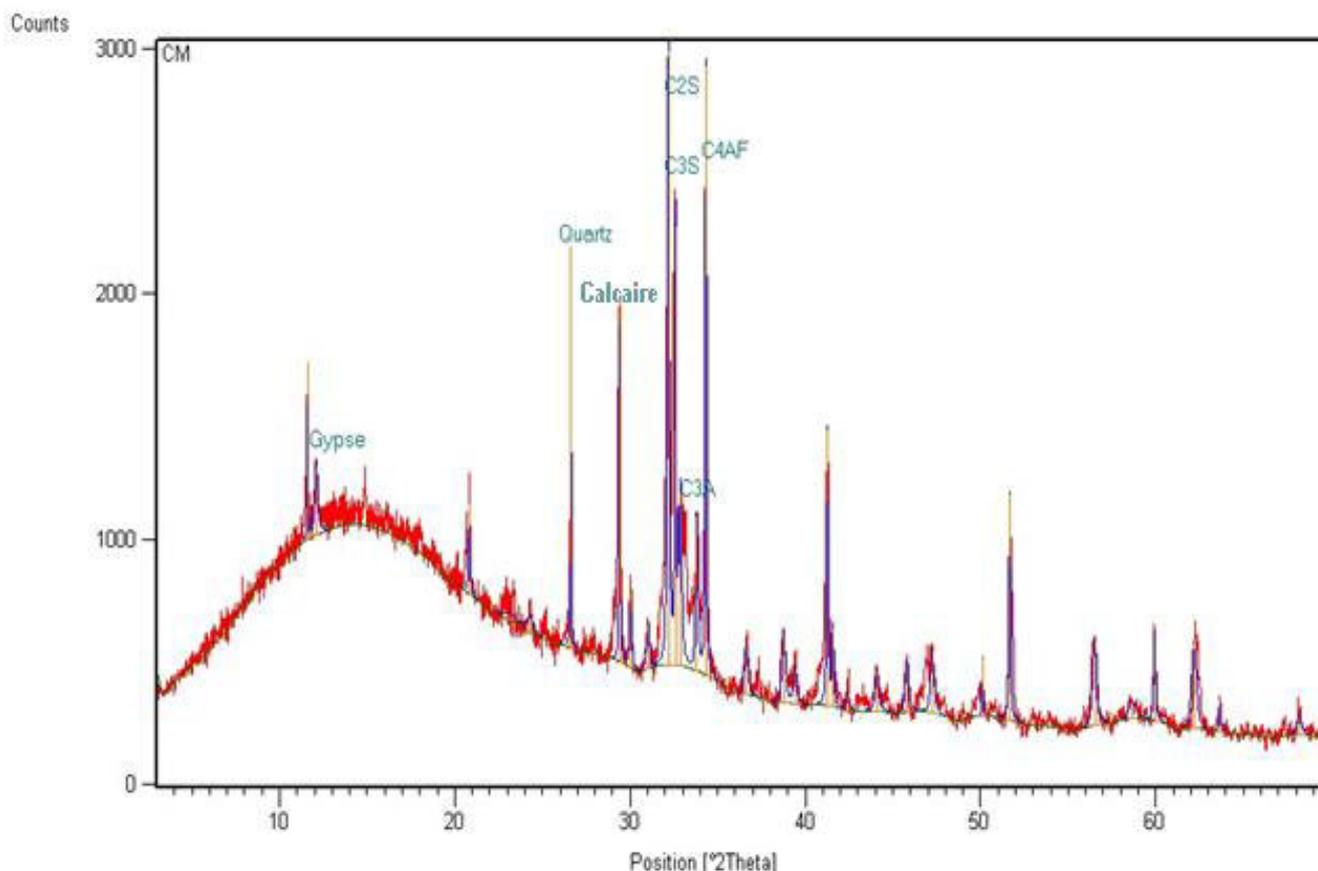


Figure IV-4: Diffractogramme des RX de ciment

IV.1.4.3- Caractéristiques physiques :**Tableau IV-9:** Caractéristiques physiques du ciment.

| Caractéristique | Résultats | Unités | Normes |
|--------------------|-----------|----------------------|-------------|
| Consistance normal | 27.4 | (%) | NF EN 196-3 |
| Début de prise | 165 | (min) | NF EN 196-3 |
| Fin de prise | 235 | (min) | NF EN 196-3 |
| SSB | 4227 | (Cm ² /g) | NF EN 196-6 |
| Masse spécifique | 3.01 | (g/cm ³) | NF EN 196-5 |
| Retrait a 28 jours | < 1000 | (μm/mm) | NF EN 197-7 |

IV.1.4.4-Caractéristiques mécaniques :**Tableau IV-10:** Caractéristiques mécaniques du ciment.

| Essais | Age (J) | | |
|-----------------------------------|---------|---------|----------|
| | 2 jours | 7 jours | 28 jours |
| Resistance a la compression (MPa) | 35.81 | 40.4 | 48.87 |
| Resistance a la flexion (MPa) | 4.41 | 6.37 | 8.35 |

IV.1.5-L'Adjuvant :

Superior 12WG permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

a) Description :

SUPERIOR 12 WG est un super plastifiant de très hautes performances destiné aux bétons exigeants un long maintien d'ouvrabilité.

Il permet l'élévation des résistances initiales et finales qu'il confère au béton.

Sa conception a base de poly-carboxylates, permet d'obtenir d'excellent résultat avec la majorité des types de ciment.

b) Propriétés chimiques et physiques :

- Aspect Liquide
- Couleur Brun
- pH (20°C) $6,5 \pm 1$
- Densité (20°C) $1,06 \pm 0,01$
- Teneur en chlorures $\leq 1\%$
- Extrait sec..... 30 ± 2

c) Caractéristiques :

Les super plastifiants **SUPERIOR 12 WG** permettent :

- Un rapport E/C très faible ;
- Ouvrabilité optimale ;
- Des résistances initiales et finales sont exigées.

d) Domaines d'application :

- Bétons fluides;
- Bétons auto – plaçants ;
- Bétons préfabriqués ;
- Bétons autonivelants ;
- Bétons transportés sur de longues distances.

e) Dosage :

- Le dosage varie entre 0.5 à 2% du poids de ciment soit 0.45 à 1.8 litre pour 100kg de ciment.
- Le dosage optimal est déterminé en fonction des caractéristiques désirées, selon la composition du béton.
- Des essais de convenance sur chantier sont nécessaires pour optimiser le dosage de l'adjuvant.

f) Mode d'emploi :

L'addition du SUPERIOR 12 WG ne doit jamais se faire sur un béton sec (c à d avant l'ajout de l'eau). Il sera absorbé par les agrégats et le sable d'où son inefficacité avec le ciment.

Il est conseillé d'ajouter le SUPERIOR 12 WG dans le béton après l'ajout des composants et environ 90% de l'eau de gâchage nécessaire.

Terminer le mélange en ajoutant graduellement l'eau restant (10%) jusqu'à l'obtention de la consistance désirée. Les dosages sont évalués au poids du ciment

IV.1.6-Caractérisation des ajouts :

IV.1.6.1-Caractérisation des fillers calcaires:

Tableau IV-11 : Caractéristiques physiques de fillers calcaires.

| Caractéristiques | Résultats |
|---|-----------|
| Masse spécifique (g/cm ³) | 2.70 |
| Surface spécifique (cm ² /g) | 5022 |

a) Composition chimique:

Tableau IV-12: Composition chimique de calcaire.

| Eléments | PAF | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | TiO ₂ | SO ₃ |
|----------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|
| % | 41.26 | 3.03 | 1.10 | 0.82 | 52.99 | 0.46 | 0.10 | 0.06 | 0.12 | 0.06 | 0.01 |

b) La composition minéralogique

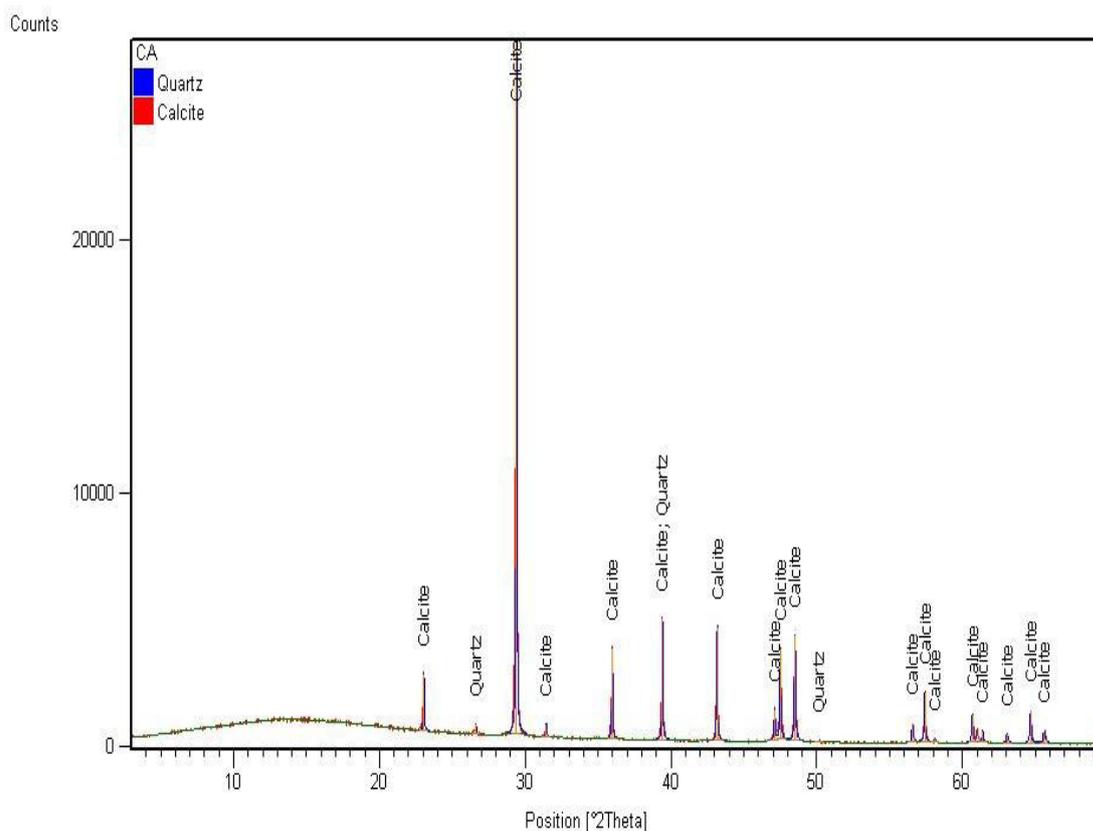


Figure IV-5: Diffractogramme des RX de calcaire.

IV.1.6.2-Caractérisation de laitier:

Tableau IV-13 : Caractéristiques physiques de laitier

| Caractéristiques | Résultats |
|---|-----------|
| Masse spécifique (g/cm^3) | 2.94 |
| Surface spécifique (cm^2/g) | 7968 |

a) Composition chimique:

Tableau IV-14: Composition chimique de laitier

| Eléments | PAF | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | TiO ₂ | SO ₃ |
|----------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|
| % | 2.21 | 38.45 | 8.45 | 6.05 | 38.58 | 4.28 | 0.89 | 0.55 | 0.02 | 0.22 | 0.30 |

b) La composition minéralogique :

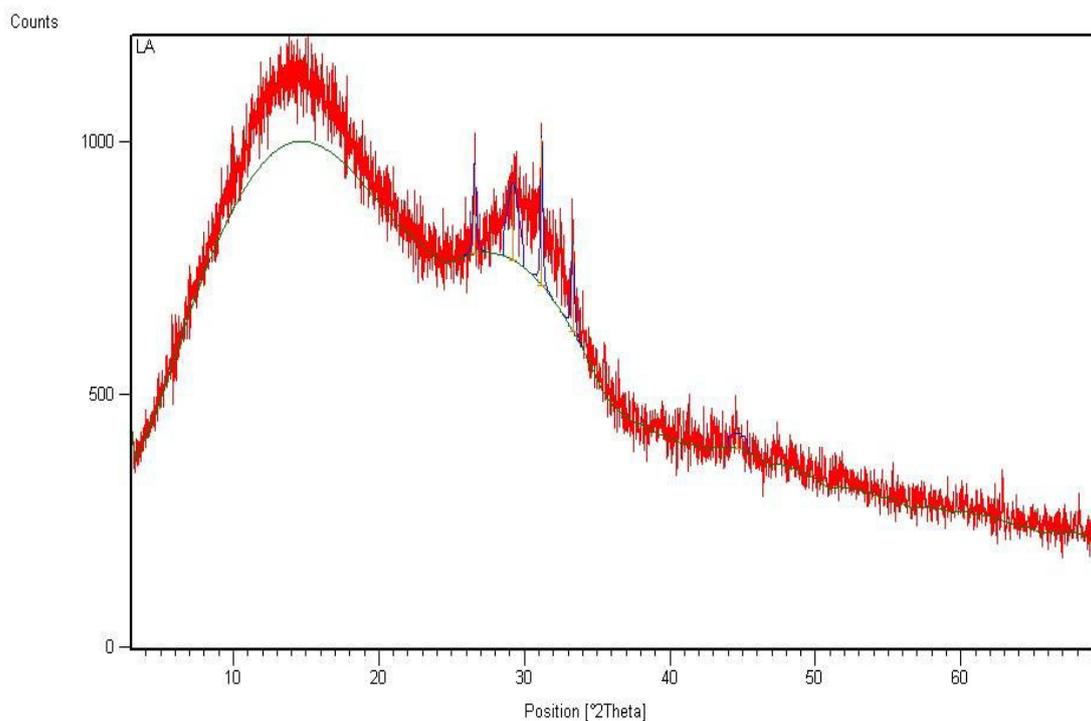


Figure IV-6: Diffractogramme des RX de laitier.

IV.1.6.3-Caractérisation de la pouzzolane:

Tableau IV-15 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane.

| Caractéristiques | Résultats |
|---|-----------|
| Masse spécifique (g/cm ³) | 2.91 |
| Surface spécifique (cm ² /g) | 8345 |

b)- Composition chimique:

Tableau IV-16 : Composition chimique de pouzzolane.

| Eléments | PAF | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | TiO ₂ | SO ₃ |
|----------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|
| % | 5.87 | 44.86 | 17.55 | 9.33 | 10.57 | 4.32 | 1.34 | 3.25 | 0.75 | 2.13 | 0.01 |

b) La composition minéralogique :

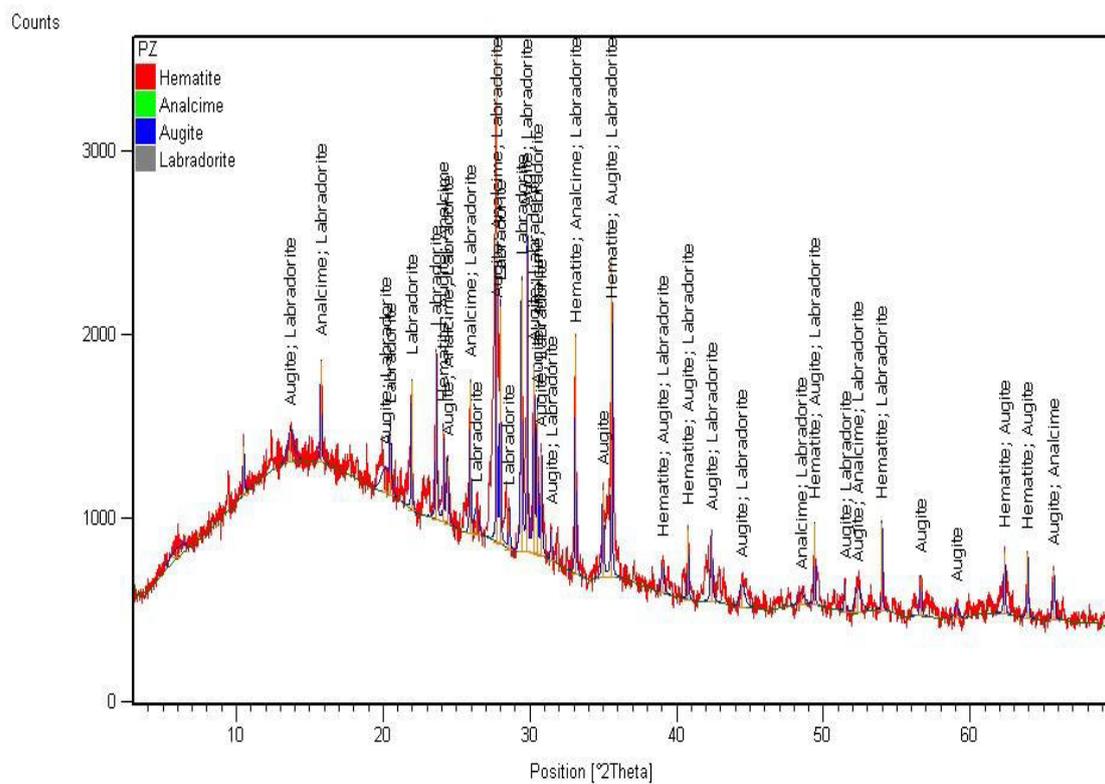


Figure IV-7: Diffractogramme des RX de la pouzzolane.

IV.1.6.4-Sable fin de Boussaâda:

Tableau IV-17: Caractéristiques physiques de sable fin :

| Carac-téristiques | Résultats | Unités |
|---------------------------|-----------|----------------------------|
| La masse spécifique | 2.63 | g/cm^3 |
| Equivalent de sable | 28.8 | % |
| Bleu de méthylène | 2.2 | % |
| L'absorption d'eau | 0.72 | % |
| La masse volumique Imbibé | 2.63 | g/cm^3 |
| La masse volumique réelle | 2.61 | g/cm^3 |
| La teneur en eau | 1.57 | % |
| SSB (sable broyé) | 5423 | (Cm^2/g) |

a) Composition chimique :

Tableau IV-18:Composition chimique de sable fin.

| Eléments | PAF | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | TiO ₂ | SO ₃ |
|----------|-----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|
| % | 2.3 | 93.61 | 0.94 | 1.28 | 1.33 | 0.05 | 0.37 | 0.02 | 0.02 | 0.08 | 0.02 |

b) Composition minéralogique :

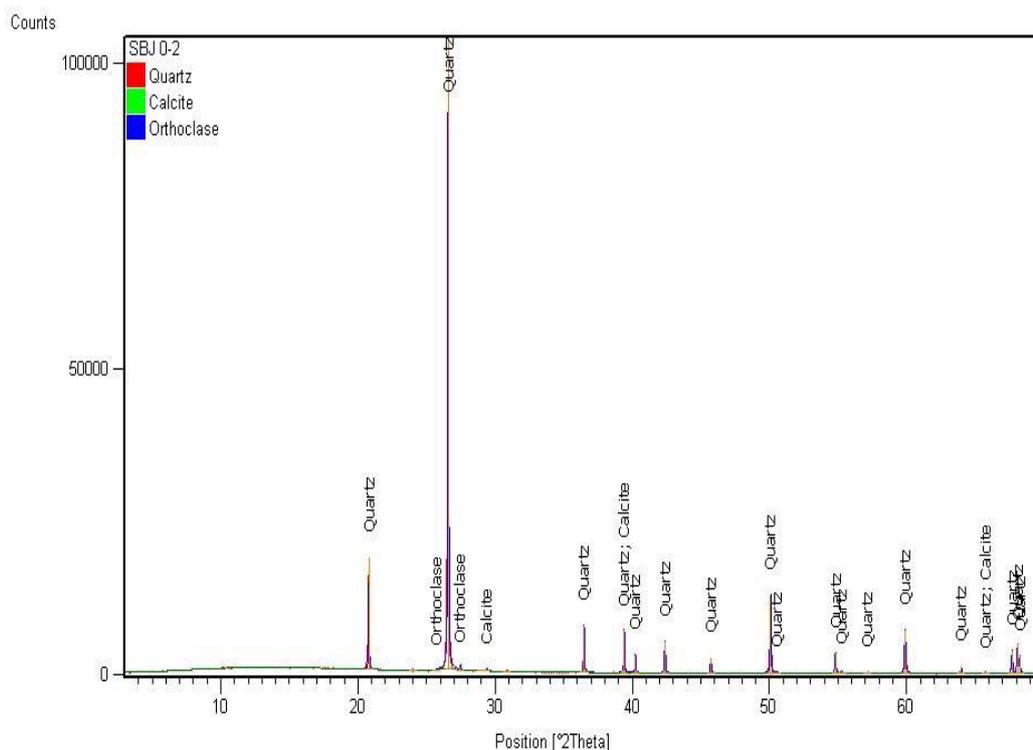


Figure IV-8: Diffractogramme des RX de sable fin.

IV.1.7-La fibre métallique :

- **Caractéristiques des fibres métalliques :**

- a) **Description :**

MEDAFAC est une fibre d'acier ondulée ses caractéristiques techniques lui permettent d'améliorer les résistances mécaniques du béton.



Figure IV-9 : Fibre métallique

- b) **Domaines d'applications :**

- Dallage industriel
- Parking.
- Atelier mécanique.

- c) **Propriétés :**

Grace à ses propriétés MEDAFAC permet :

- D'augmenter les résistances mécaniques surtout en flexion.
- Très bonne résistance à l'abrasion.

- d) **Caractéristiques :**

Tableau IV-19 : Caractéristiques de la fibre métallique.

| | |
|----------|------|
| Longueur | 50mm |
| Largeur | 2mm |
| Densité | 7.6 |

- e) **Mode d'emploi :**

L'introduction des fibres MEDAFAC se fait :

- soit à la centrale à béton avec les agrégats ou en fin de mélange.
- soit dans le camion à malaxeur sur chantier avec un malaxage supplémentaire de quelques minutes à grande vitesse.
- soit dans la bétonnière sur chantier avec un malaxage supplémentaire de quelques minutes.

Dans tous les cas veiller à garantir une parfaite homogénéité du mélange béton-fibres.

f) Mise en place du béton :

Une bonne homogénéité du matériau est nécessaire pour lui garantir son efficacité et le mode de vibration dépend essentiellement du type du béton utilisé.

Finition :

Dans le cas où la surface du béton reste brute une attention particulière sera portée au talochage manuel ou mécanique afin que toutes les fibres soient réintégrées dans la matrice béton, les autres finitions traditionnelles (saupoudrage, chape incorporée ou rapportée) ne nécessitent aucune précaution particulière un produit de cure MEDACURE doit être appliqué sur la surface finie du dallage afin d'éviter un séchage trop rapide du matériau.

g) Dosage :

Le dosage de fibre MEDAFAC à utiliser peut varier de 20 à 40 kg/m³.

Le dosage optimal doit être déterminé en fonction du type de béton et des effets recherchés.

h) Conditionnement et stockage :

Les fibres d'acier MEDAFAC sont conditionnées en cartons de 20 ou 25kg et se conservent environ trois années à l'abri de l'humidité.

i) Précaution de l'emploi :

Manipulation non dangereuse.

Partie II :

IV.2-La rhéologie des pâtes des ciments :

Cette partie est consacrée à l'étude de point de saturation en super plastifiant de pâte cimentaire (**CPJ de M'sila**), et qui a pour but de voir l'influence des polycarboxylates sur le comportement rhéologique.

Pour mieux comprendre les propriétés rhéologiques des pâtes cimentaires, les essais de rhéologie ont été réalisés au laboratoire URMPE avec le viscosimètre (AR2000).

Le comportement rhéologique de la pâte du ciment, mortier et béton dépend du taux de cisaillement et de la viscosité d'un système.

L'appareil que nous avons utilisé est un appareil à cylindres coaxiaux à la géométrie « vanne ».

Cet appareil permet de mesurer les viscosités apparentes et plastiques du coulis ainsi que le taux de cisaillement et l'éventuelle présence de thixotropie.

➤ La composition des pâtes utilisées :

On fixe la quantité du ciment ainsi que celle d'eau et on fixe le pourcentage des ajouts à (5%) et à (10%) (Laitier, pouzzolane, sable de Boussaâda broyé) et le dosage de superplastifiant va aller de 0.5 jusqu'à 2% pour SUPERIOR 12 WG.

Le rapport : $E/C+F=0.38$.

Pâte à 5% :

- Ciment (85g).
- pouzzolane (5g).
- laitier (5g).
- SBb (5).
- Eau (38ml) $E/C+F=0.38$.
- SUPERIOR 12 WG de 0.5 jusqu'au point de saturation.

Pate à 10% :

- Ciment (70g).
- pouzzolane (10g).
- laitier (10g).
- SBb (10).
- Eau (38ml) E/C+F=0.38.
- SUPERIOR 12 WG de 0.5 jusqu'au point de saturation.

IV. 2.1-L'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement des pates cimentaires :

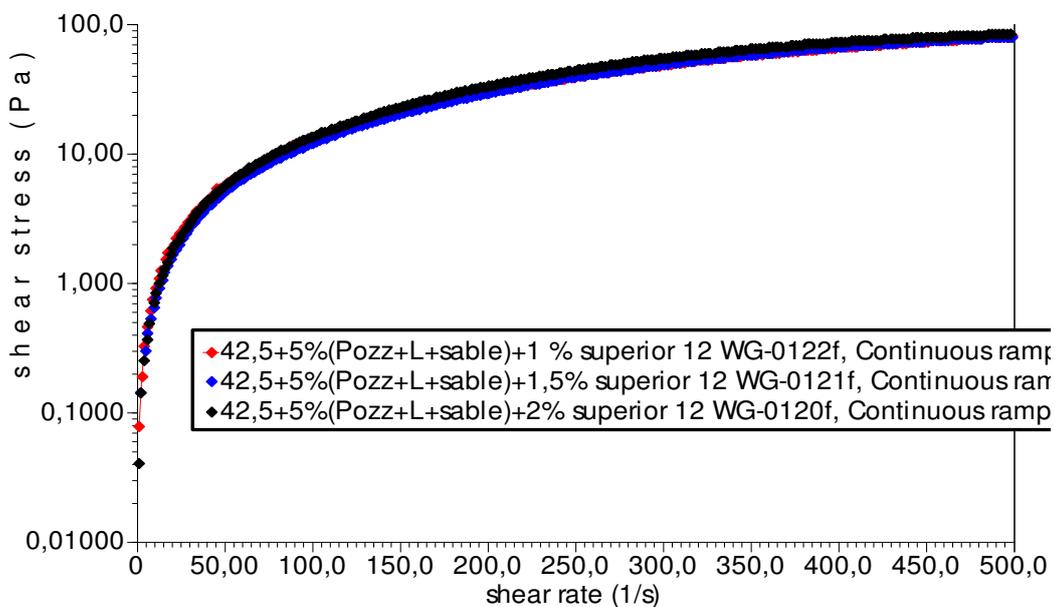


Figure IV-10: Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (CPJ+5% (pouz+L+Sbb) + SUPERIOR 12 WG).

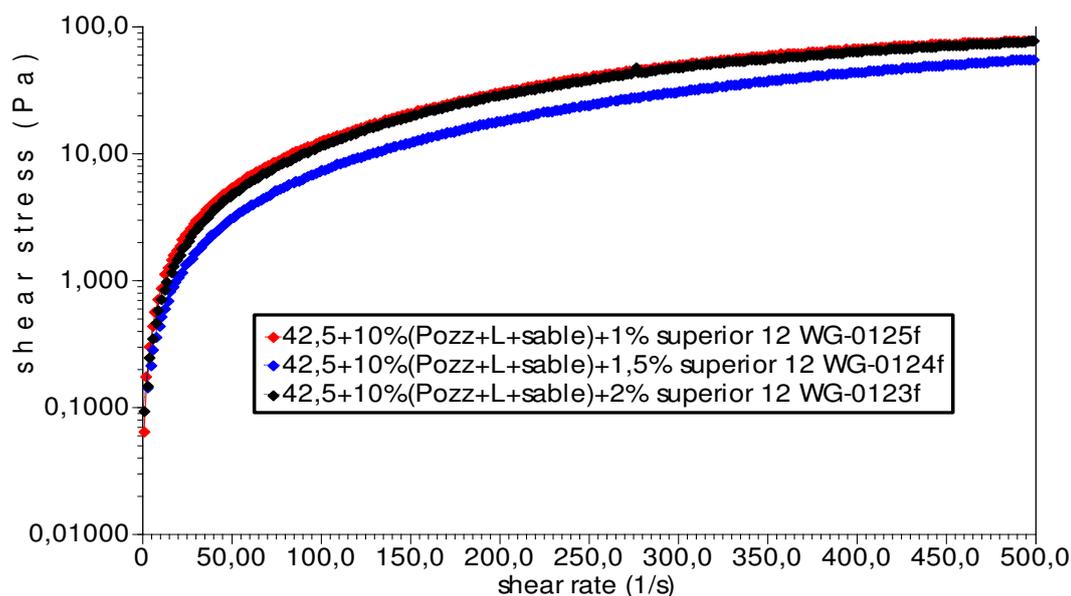


Figure IV-11 : Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (CPJ+10%(Pozz+Laitier+ Sbb) + SUPERIOR 12 WG).

Interprétation :

Les figures (11.12) représentent l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement, ou on peut remarquer que la contrainte de cisaillement diminue avec l'augmentation de dosage en superplastifiant, ce qui veut dire que la suspension devient plus fluide et l'écoulement se rapproche de l'écoulement newtonien. Ceci est dû à l'effet dispersant du superplastifiant qui s'adsorbe sur la surface des grains du ciment et par la suite neutralise les différentes charges de particules et donne la même charge électrostatique à chaque grain du ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules. Il en résulte une dispersion des grains du ciment. Cette dispersion des grains du ciment libère l'eau qui est disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la fluidité de la pâte du ciment.

IV.2.2-L'évolution de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement des pâtes cimentaires :

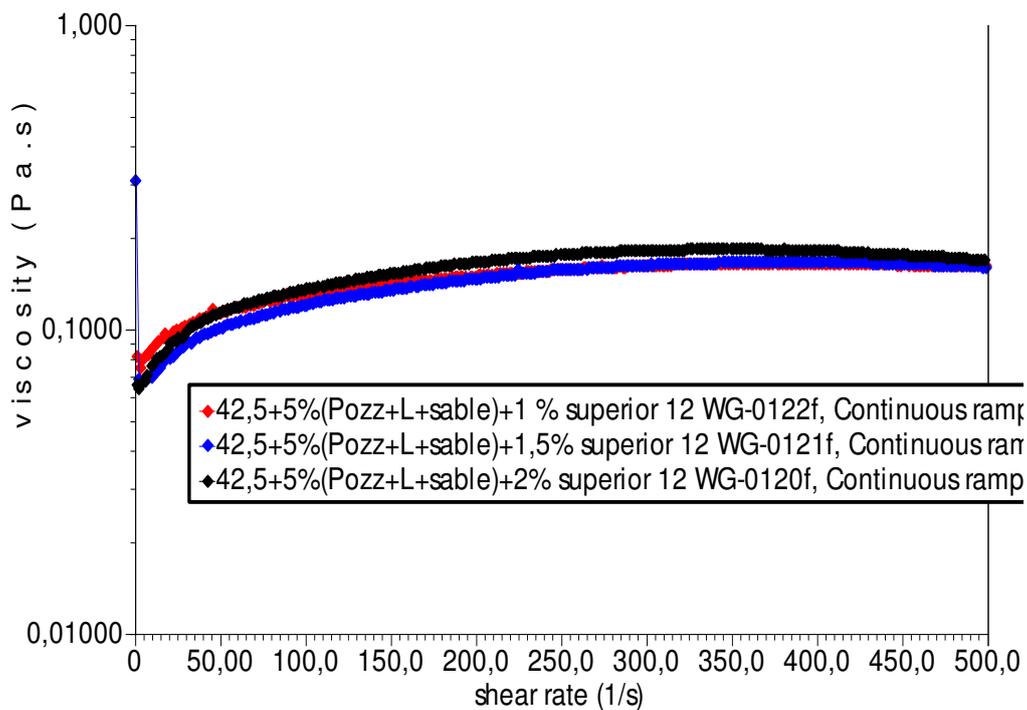


Figure IV-12: Évolution de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement (CPJ+5% (pouz+L+Sbb) + SUPERIOR 12 WG).

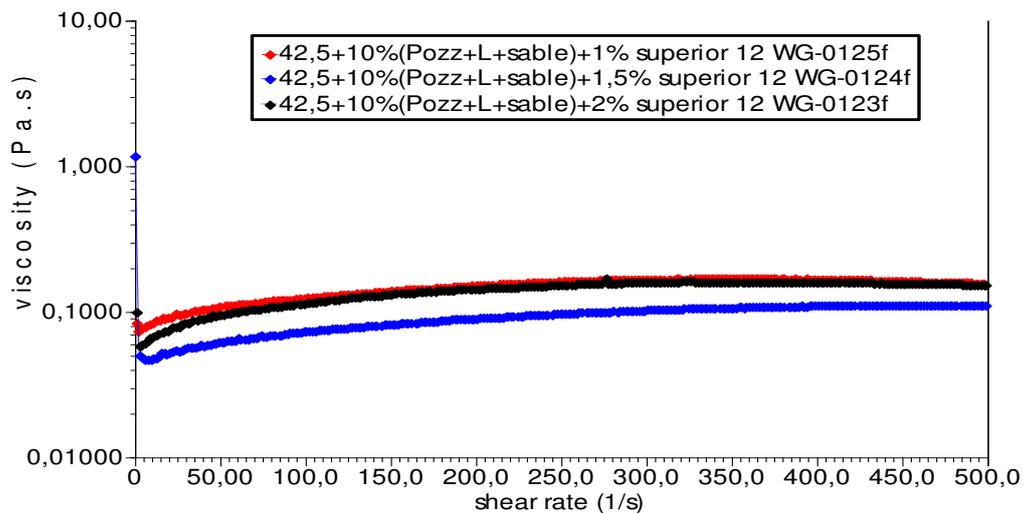


Figure IV-13 : Évolution de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement CPJ+10%(Pozz+Laitier+ Sbb) + SUPERIOR 12 WG).

Interprétation :

Les figures (14.15) représentent l'évolution de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement, où on peut remarque que le super plastifiant influe sensiblement sur la viscosité des pâtes cimentaire, et que plus le pourcentage en superplastifiant augmente plus la viscosité de la pâte diminue, le superplastifiant réduit ou élimine carrément l'adhésion entre les particules voisines (agglomération).

Et plus le % de polycarboxylate augmente plus l'écoulement se rapproche de newtonien, jusqu'au point de saturation, au-delà duquel le superplastifiant n'influe plus sur l'écoulement.

Pate 1 : ciment+eau+5%(Pozz+Laitier+ Sbb) + SUPERIOR 12 WG). (Point de saturation 1.5%).

Pate 2 : ciment+eau+10%(Pozz+Laitier+ Sbb) + SUPERIOR 12 WG). (Point de saturation 1.5%).

Partie III :

Cette partie est consacrée à la formulation d'un BAPF, ainsi que sa caractérisation rhéologique (stabilité au tamis, étalement au cône d'ABRAMS et l'essai de boîte en L) et sa caractérisation physico mécanique (résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion) à différents âges.

IV.3-La formulation du BAP par la méthode japonaise :**IV.3.1-La méthode de calcul :****a- Calcul de la composition :**

Les intervalles pour chaque constituant donnés par cette méthode sont :

- Volume de gravillons est limité en fonction de $G/S=0.9$ (proche de 1)
- Volume de la pâte est : 330 à 400 l/m³.
- La masse de ciment : $M_c = 300$ à 450 Kg/m³
- La masse de fine $M=10\%$ de la masse de ciment.

b- Les données de base :

- On choisi le rapport $G/S= 0.9$;

- On fixe $E/C+F= 0.38$. Le dosage en superplastifiant est donné selon l'essai de la rhéologie (point de saturation).

c- Optimisation de la composition du BAP :

Volume de la pâte pour 1 m^3 du BAP : 330 l/m^3 .

420 kg/m^3 du ciment.

42 kg/m^3 fillers de calcaire

$E/(C+F)=0.38$.

$G/S=0.9$.

d- Détermination de la masse de chaque constituant :

$C=420\text{ kg/m}^3$.

$F=42\text{ kg/m}^3$.

$E/(C+F)=0.38$ donc $E=0.38*(42+42) \longrightarrow E=171.52\text{ l/ m}^3$.

Volume de la pâte = 350.77 l/m^3 .

Volume de granulats secs = 649.2 l/m^3

$G/S=0.9$,

$G+S=649.2\text{ l/m}^3 \longrightarrow G=649.2-S$

$S=649.2/(0.9+1) \longrightarrow S=341.7$

Le dosage en superplastifiant est de 1.5% de la masse de liant (C+F) pour chaque ajout

Tableau IV-20 : Les masses des constituants pour 1 m^3 :

| constituant | | Quantité | unité |
|------------------|------|----------|-----------------|
| Eau | | 171.5 | l/m^3 |
| ciment | | 420 | Kg/m^3 |
| Fines | | 42 | Kg/m^3 |
| Gravier | 3/8 | 102.5 | Kg/m^3 |
| | 8/15 | 205 | Kg/m^3 |
| sable | | 341.7 | Kg/m^3 |
| Superplastifiant | | 2.08 | Kg/m^3 |
| fibre | | 6.93 | Kg/m^3 |

IV.3.2-Les essais sur les bétons formulés :**IV.3.2.1-Essais sur le béton frais :**

Avant le malaxage on a broyé les 3 ajouts jusqu'à l'obtention d'une finesse $\approx 5000 \text{ cm}^2/\text{g}$.



Figure IV-14: broyeur



Figure IV-15 : les ajouts utilisés



Figure IV-16: Malaxeur de béton

Après le malaxage, on a obtenu les caractéristiques mécaniques et rhéologiques suivantes :

➤ **L'essai d'étalement :**

L'essai d'étalement se fait à l'aide du cône d'ABRAMS. Cet essai permet de mesurer la mobilité du béton en milieu non confiné, il consiste à mesurer le diamètre d'une galette de béton (figure b) après soulèvement du cône. Les valeurs cibles de l'étalement sont typiquement dans une fourchette de 55 à 75 cm. Les résultats sont donnés dans les tableaux 25 et 26.



Figure IV-17 : Essai d'étalement sur béton autoplaçant.

| Types de béton | BAPF 1 | BAPF 2 | BAPF 3 | BAPF 4 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Etalement en (mm) | 670 | 730 | 670 | 660 |
| Etalement T ₅₀ (s) | 1.51 | 1.05 | 2.25 | 1.14 |

Tableau IV-21 : Essai d'étalement sur le BAPF.

➤ **Essai de boîte en L :**

L'essai de boîte en L (figure 20) est effectué pour le béton autoplaçant seulement .Il permet d'évaluer le risque de blocage et la capacité de remplissage du béton en milieu confiné.

La partie verticale de la boîte est remplie de béton, après soulèvement de la trappe en bois, on mesure le taux de remplissage qui est défini comme étant le rapport des hauteurs de béton dans les parties verticales. $H1/H2$ doit être supérieur à 0.8, les résultats sont donnés dans les tableaux 27 et 28.



Figure IV-18 : Essai de la boîte en L

Tableau IV-22: Essai de la boîte en L pour BAPF

| Types de béton | BAPF 1 | BAPF 2 | BAPF 3 | BAPF 4 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| Boite en L H1/H2 | 0.88 | 0.83 | 0.82 | 0.83 |
| T ₅₀ (s) | 2.20 | 1.20 | 2.27 | 1.1 |

➤ **Essai de stabilité au tamis :**

Lors de l'essai d'étalement une observation visuelle peut nous renseigner sur la stabilité du béton (absence de ségrégation et de ressuage), mais l'essai le plus approprié pour la mesure de la stabilité est l'essai de stabilité au tamis (figure 22).

On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers d'un tamis d'ouverture 5 mm. On considère qu'une valeur inférieure à 15% de laitance est caractéristique d'un béton stable.



Figure IV-19 : Essai de stabilité au tamis.

Tableau IV-23: Résultats de stabilité au tamis pour BAPF.

| Type de béton | BAPF 1 | BAPF 2 | BAPF 3 | BAPF 4 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|
| % | 6.7 | 9.5 | 2.1 | 4.8 |

➤ **Remplissage des moules :**

Pour chaque formulation ,12 éprouvettes sont réalisées, dont 6 éprouvettes de (Ø 11*22 cm) pour l'essai de traction par compression (7j, 28j) et 6 éprouvettes prismatiques de (10*10*40 cm) pour l'essai de traction par flexion (7j, 28j).

Introduire le béton dans les moules et araser la face supérieure de l'éprouvette. La conservation après démoulage se fait à une température de 20 C ° dans l'eau (figure 23).



Figure(a)



Figure(b)

Figure IV-20 (a et b) : Remplissage des moules et conservation des éprouvettes

IV.3.2.2- Essais sur bétons durci :

a)-La masse volumique moyenne :

Avant de commencer les essais sur le béton durci, on mesure la masse volumique (7,28).

Masse volumique= M/V (kg/m^3).

M : masse moyenne de 3 éprouvettes.

V : volume de l'éprouvette.

Tableau IV-24: La masse volumique des BAP fibrés à l'état durci.

| Type de Béton Age | BAPF 1 | BAPF 2 | BAPF 3 | BAPF 4 |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 7 jours (kg/m ³) | 2492.3 | 2473.7 | 2468.9 | 2507.2 |
| 28 jours (kg/m ³) | 2488 | 2483 | 2497.6 | 2507.2 |

b)- Essai de compression :

L'essai de compression consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression axiale. La mise sous charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette avec une vitesse (7KN/S).

Les essais de compression sont effectués sur des éprouvettes cylindriques (11x22 cm).

L'objectif de cet essai est de suivre l'évolution de la résistance à la compression les essais effectués sur les différents bétons (BAPF) à différents âges (7,28 jours).

Tableau IV- 25 : La résistance à la compression des BAP fibrés.

| Type de béton Age | BAPF 1 | BAPF 2 | BAPF 3 | BAPF 4 |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|
| 7 jours (MPa) | 36.33 | 31.52 | 37.4 | 37.2 |
| 28 jours (MPa) | 42.2 | 37.45 | 45.8 | 44.35 |

c)-Essai de traction par flexion :

L'essai de traction par flexion est effectué sur des éprouvettes (10x10x40 cm)

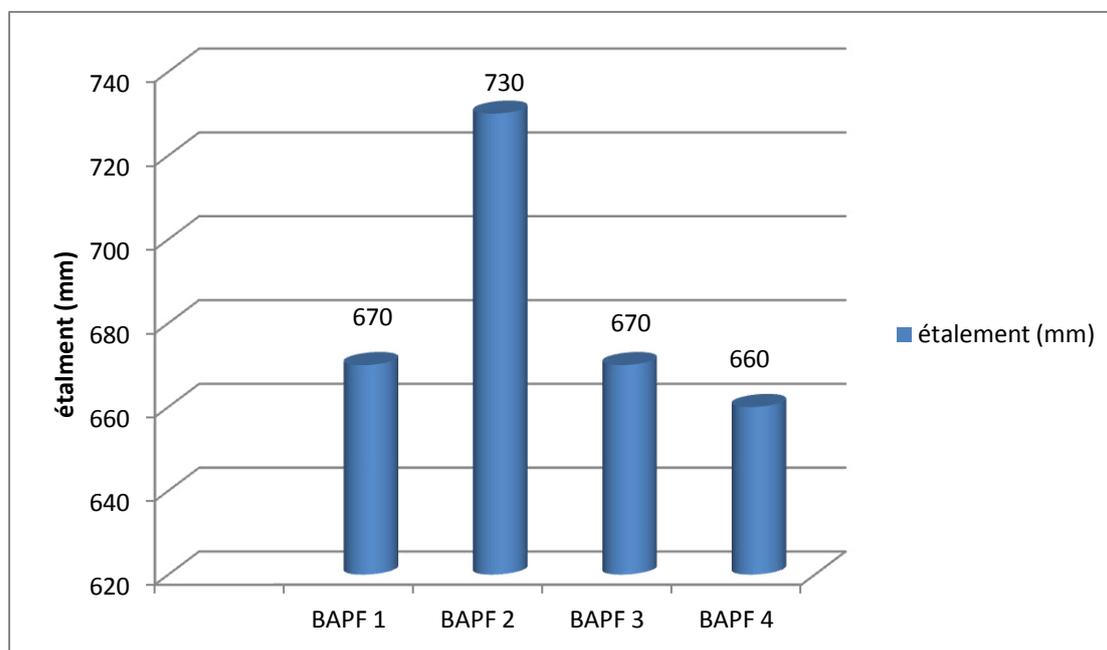
Les essais effectués sur les différents bétons (BAPF) à différents âges (7,28 jours).



Figure IV-21 : Béton fibré

Tableau IV- 26 : La résistance à la traction par flexion BAP fibré.

| Type de Béton Age | BAPF 1 | BAPF 2 | BAPF 3 | BAPF 4 |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 7 jours (MPa) | 4.42 | 6 | 7.8 | 7.2 |
| 28 jours (MPa) | 6.2 | 7.3 | 9.21 | 8.8 |

Partie IV :**IV.4-Résultats et discussions :**➤ **À l'état frais :****Figure IV-22:** Évolution d'étalement au cône d'Abrams des BAPF.**Discussions des résultats :**

- Pour l'essai d'étalement au cône d'Abrams, on remarque que l'étalement des bétons confectionnés correspond bien à l'intervalle fixé par la norme (650 et 750cm). Donc, ce béton a une fluidité acceptable (pas de ségrégation visible en fin d'essai c'est à dire pas d'amoncellement de gros granulats ni d'auréola de laitance).
- la figure 21 montrent que l'étalement du béton contenant le sable de Boussaâda broyé est le plus faible.

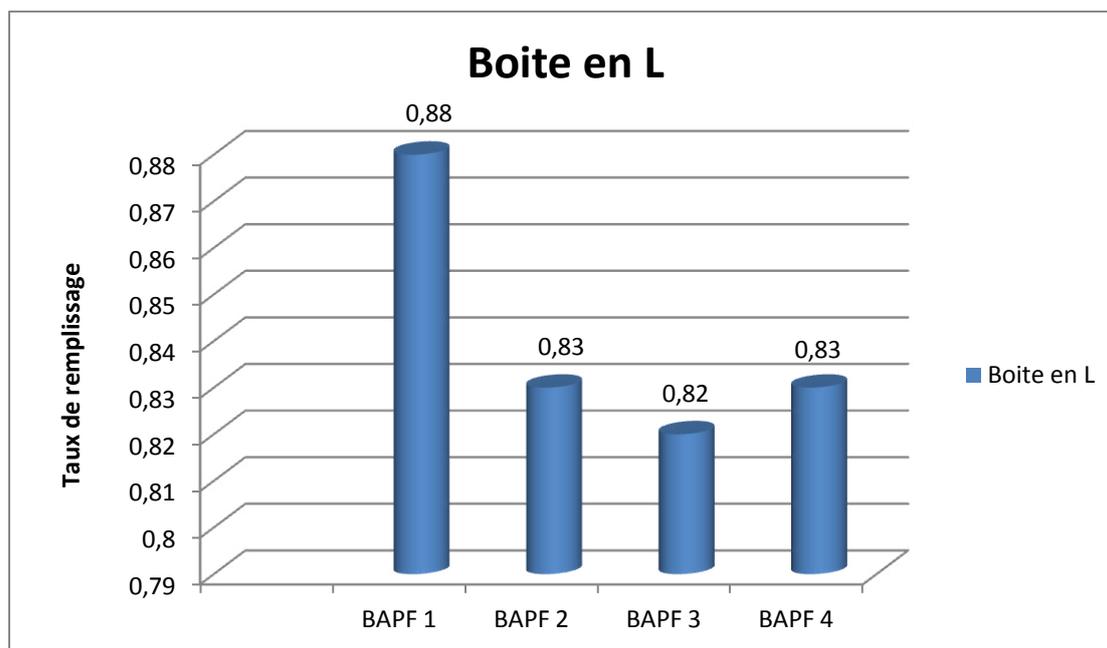


Figure IV-23: Taux de remplissage de boîte en L.

Discussion des résultats :

- Les compositions étudiées ne montrent aucun signe de blocage durant le passage à travers les armatures, ce qui indique l'absence du phénomène de ségrégation. La capacité de passage pour les matériaux cimentaires est presque similaire.
- D'après la figure 22 on déduit que le rapport h_2/h_1 est supérieur à 0,80 alors la capacité de remplissage des cinq bétons est satisfaisante aux exigences du cahier des charges des BAPF.

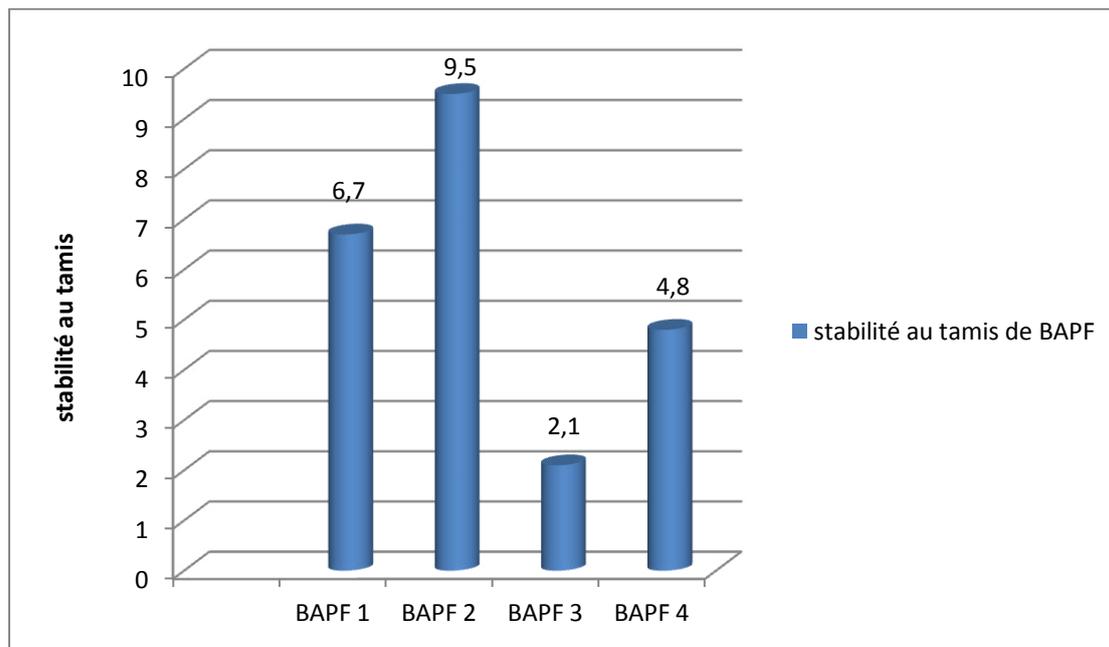


Figure IV-24: Évolution de la stabilité au tamis du BAPF.

Discussions des résultats :

- D'après les résultats obtenus par l'essai de la stabilité au tamis ; on remarque que les résultats sont compris dans l'intervalle de la stabilité au tamis normalisé qui varie entre 0% et 15 % soit pour un BAP ou un BAPF ce qui donne une bonne résistance à la ségrégation.

➤ Les essais de béton à l'état durci :

La résistance à la compression :

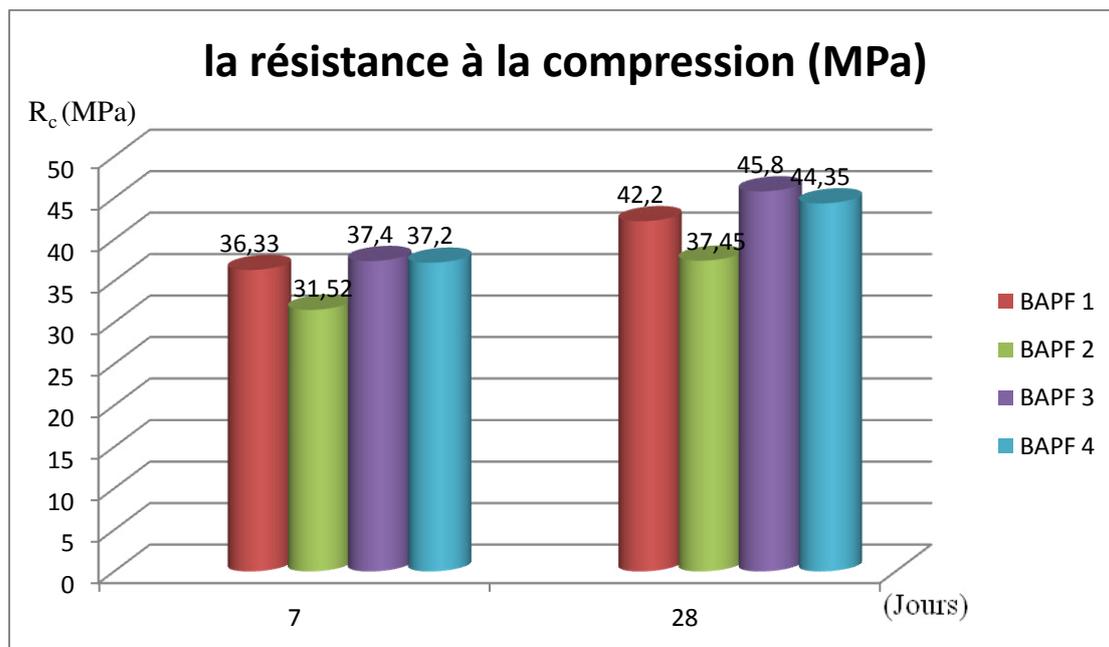


Figure IV-25: Évolution de la résistance à la compression des BAPF.

Discussions des résultats : La figure IV-25 représente l'évolution de la résistance en compression des BAPF, D'après les résultats obtenus on remarque que :

La résistance à la compression augmente en fonction de l'âge, cette augmentation est due à l'hydratation du ciment avec le temps. On remarque aussi une augmentation considérable de la résistance du BAPF 3 et 4 par rapport à celui de BAPF 1 et 2, cela est dû à la libération de la silice présente dans le sable de Boussaâda et à son activité après le broyage et aussi à la finesse des grains qui rend le béton plus compacte.

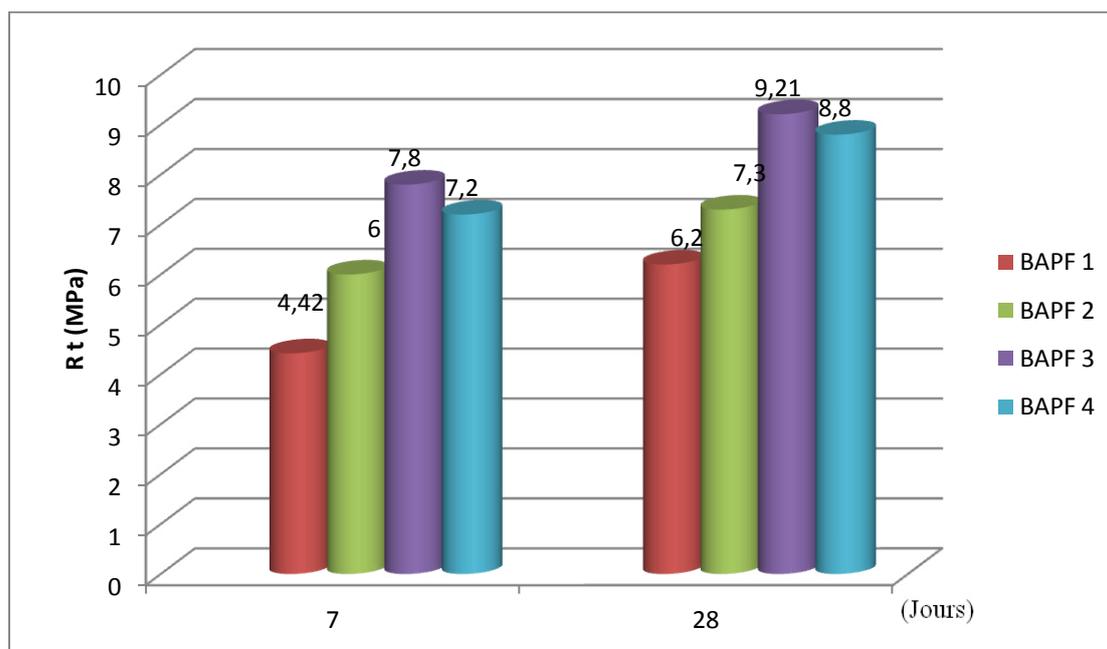
La résistance à la traction par flexion:

Figure IV-26: Évolution de la résistance à la traction par flexion pour les BAPF.

Discussions des résultats :

La figure IV-26 représente l'évolution de la résistance en traction par flexion pour les BAPF, D'après les résultats obtenus on remarque que la résistance en traction par flexion augmente en fonction de l'âge, cette augmentation est due à l'hydratation du ciment avec le temps. On remarque aussi une augmentation considérable de la résistance du BAPF 3 et 4 par rapport à celui de BAPF 1 et 2, cela est dû à la libération de la silice présente dans le sable de Boussaâda et à son activité après le broyage et aussi à la finesse des grains qui rend le béton plus compact. Grâce aux fibres incorporées dans le béton, on a obtenu des résistances élevées par rapport à un béton ordinaire.

CONCLUSION

Conclusion :

Ce sujet d'étude nous a permis d'approfondir nos connaissances sur la technologie des bétons autoplaçants fibrés.

L'obtention d'un BAPF de bonne qualité consiste à optimiser sa formulation pour avoir une fluidité désirée, sans ségrégation ni ressuage, et une stabilité suffisante avec un prix de revient réduit.

Les bétons autoplaçants sont caractérisés par leur fluidité élevée de sorte qu'ils puissent être mis en application sans vibration. Les effets des fillers sur leur comportement à l'état frais et à l'état durci sont d'une grande importance pour un plus large usage de ces matériaux. Diverses études suggèrent que l'addition des fillers, pouzzolaniques ou non pouzzolaniques au ciment Portland affecte les propriétés du béton aux états frais et durci.

L'étude expérimentale du béton autoplaçant à l'état frais et durci, nous a permis de comprendre la formulation, la caractérisation, ainsi que l'influence des fibres métalliques et les ajouts sur les propriétés rhéologiques et mécaniques.

Les résultats de ce travail peuvent mener aux conclusions suivantes :

- Les caractérisations des matières premières utilisées dans la formulation, répondent aux spécifications des normes sur les BAP.
- L'utilisation de la méthode japonaise pour la formulation des BAPF s'est avérée très efficace pour l'obtention des propriétés rhéologiques et physico-mécaniques souhaitées par ses avantages (volume de la pâte élevé, Fluidité).
- L'emploi des ajouts minéral par substitution du ciment a abouti à des caractéristiques plus ou moins performants à l'état frais et durci, et l'utilisation du sable de Boussaâda broyé c'est avérée performant suite a la libération de la silice qu'il contient et son activité après le broyage et aussi grâce à sa finesse qui rend le béton plus compacte.
- Le superplastifiant SUPERIOR 12 WG permet d'avoir un BAPF stable et homogène qui s'écoule facilement à l'état frais. L'étalement est varié entre 670 et 730 mm, la stabilité est dans les normes (ne dépasse pas 15 %) et le

CONCLUSION

taux de remplissage (boite en L) et supérieur à 0,80. Ces performances rhéologiques sont améliorées par l'effet dispersant, ainsi qu'une amélioration des propriétés mécaniques.

- L'incorporation des fibres dans le BAP apportent aussi une solution pour les résistances mécaniques, et ont la capacité de contrôler l'ouverture des fissures.

Bibliographie

Bibliographie pour le chapitre I :Généralité sur les BAP

[1] : Documents de LAFARGE France

[2] : Bétons autoplaçants, recommandations provisoires Association Française de Génie Civil Juillet 2000

[3] : HOUARI .H Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux.

[4] : Thèse de doctorat Sandrine BETHMONT (mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).

[5] : Nouveau guide de béton.

[6] : Josef ABDO Docteur ingénieur de l'Ecole des mines de Paris et ingénieur de l'Ecole nationale des ponts et chaussées.

[7] : Thèse de doctorat de Philippe Turcry de l'université de Nantes (Retrait et Fissuration des Bétons autoplaçants influence de la Formulation)

[8] : Document fournie par le Pr BENMOUNAH (Cendre volante, laitier, fumée de silice et pouzzolanes naturelles.)

Bibliographie pour le chapitre II : les bétons autoplaçants fibrés

- [1]: BOULEKBACHE B. HAMRAT M. CHEMROUK M. and AMZIANE S, 2009, «Influence of the rheologie of steel fibers' Reinforced Concretes on their Mechanical Properties». European Journal of Environmental and Civil Engineering.
- [2]: BENKECHKACHE G, «Etude de comportement diffère des bétons autoplaçants influence des paramètres de composition et de chargement», Thèse de Magister Novembre 2007 Université Mentouri Constantine.
- [3]:GUILLAUME, «Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton», thèse doctorat de l'université de Toulouse septembre 2008.
- [4]: ROSSI P, «Les bétons de fibres métalliques ponts et chaussées», Paris (1998).
- [5]: CHANVILLARD G, (1993), «analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées ancrées dans une matrice cimentaire», études et recherche des LPC, série ouvrages d'art.
- [6]: SUKONTASUKKUL P,(2004) ,« toughness evaluation of steel and polypropylene fiber reinforced concrete beams under bending »,thammasat international journal of science and technology.
- [7]: COTTERELL B, (1996), « Fracture mechanics of cementations materials», blackie academic et professional, London/Chapman and hall.
- [8]: Rossi P. (1998) Les bétons de fibres métalliques, Ponts et Chaussées, Paris.
- [9]:Bentur A., Mindess S. (1990) Fibers reinforced cementous composites, Elsevier.
- [10] :Johnston C.D. (1996) Proportioning, mixing and placement of fibre-reinforced cements and concretes, Production Methods and Workability of Concrete Proceedings of the InternationalRILEM Conference, edited by Bartos, Marrs and Cleland, London.
- [11]:Taylor M., Lydon F.D., Barr B.I.G. (1997) Toughness measurements on steel fibre-reinforced high strength concrete. Cement and Concrete Composites.

Bibliographie pour le chapitre III : La rhéologie

[1]: Thèse, «impacte de l'architecture macromoléculaire des polymères sur les propriétés physico-chimique des coulis du ciment».

[2] : FERCHE francois, «adsorption de polycarboxilates et lignosulfonates sur poudre modèle et ciment», thèse de l'école polytechnique fédérale de Lausanne.

[3] : BENTALHA Malika, «influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire»,30 octobre 2007.

[4] : NGUYEN Hing-minth, «comportement rhéologique des suspensions concentrées», thèse de doctorat de l'INSA de Renn.

[5] : ADJLAN, «Béton fibré», thèse de doctorat à l'université de Batna.

Liste des Figures

| | |
|---|----|
| Figure I-1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. | 3 |
| Figure I- 2 : Résistance normale du mortier..... | 10 |
| Figure I-3 : l'eau de gâchage..... | 11 |
| Figure I- 4 : l'essai d'étalement..... | 19 |
| Figure I-5 : boîte en L..... | 20 |
| Figure I-7 : stabilité au tamis..... | 21 |
| Figure I- 8 : la ségrégation du béton..... | 22 |
| Figure I- 9 : l'appareil pour déterminé la résistance à la traction..... | 24 |
| | |
| Figure II-1 : Différentes formes géométriques de fibres métalliques | 30 |
| Figure II-2 : Les fibres métalliques..... | 32 |
| Figure II-3 : les fibres de verre..... | 32 |
| Figure II-4 : Les fibres de polypropylènes..... | 33 |
| Figure II-5 : illustration de l'apport du renfort par des fibres | 36 |
| Figure II-6 : Comportement en traction directe en fonction du pourcentage en fibres métalliques..... | 38 |
| Figure II-7 : Effets des fibres sur l'étalement des BAP. | 41 |

| | |
|---|-----------|
| Figure III-1 : Evolution du seuil de cisaillement en fonction de la concentration volumique solide des fluides saturants | 44 |
| Figure III-2 : Evolution de la viscosité plastique en fonction de la concentration volumique solide des fluides saturants | 45 |
| Figure III-3 : Action des superplastifiants - Dégglomération des grains de ciment. | 48 |
| Figure III-4 : Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton | 48 |
| Figure III-5 : Mode d'action des superplastifiants | 49 |
| | |
| Figure IV-1 : Diffractogramme des RX de gravier (3/8)..... | 53 |
| Figure IV-2 : Diffractogramme des RX de gravier (8/15)..... | 55 |
| Figure IV-3 : Analyse granulométrique par tamisage..... | 57 |
| Figure IV-4 : Diffractogramme des RX de ciment..... | 58 |
| Figure IV-5 : Diffractogramme des RX de calcaire | 61 |
| Figure IV-6 : Diffractogramme des RX de laitier. | 62 |
| Figure IV-7 : Diffractogramme des RX de la pouzzolane..... | 63 |
| Figure IV-8 : Diffractogramme des RX de sable fin..... | 64 |
| Figure IV-9 : fibre métallique..... | 65 |
| Figure IV-10 : Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (CPJ+5% (pouz+L+Sbb) + SUPERIOR 12 WG)..... | 68 |
| Figure IV-11 : Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (CPJ+10%(Pozz+Laitier+ Sbb) + SUPERIOR 12 WG).. | 69 |
| Figure IV-12 : Évolution de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement (CPJ+5% (pouz+L+Sbb) + SUPERIOR 12 WG)..... | 70 |
| Figure IV-13 : Évolution de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement CPJ+10%(Pozz+Laitier+ Sbb) + SUPERIOR 12 WG)..... | 70 |
| Figure IV-14 : broyeur..... | 73 |
| Figure IV-15 : les ajout utilisés..... | 73 |

| | |
|---|-----------|
| Figure IV-16: malaxeur de béton | 73 |
| Figure IV-17 : Essai d'étalement sur béton autoplaçant. | 74 |
| Figure IV-18 : Essai de la boîte en L..... | 75 |
| Figure IV-19 : Essai de stabilité au tamis..... | 76 |
| Figure IV-20: Remplissage des moules et conservation des éprouvettes..... | 77 |
| Figure IV-21 : béton fibré..... | 79 |
| Figure IV-22: Évolution d'étalement au cône d'Abrams des BAPF..... | 80 |
| Figure IV-23: Taux de remplissage de boîte en L..... | 81 |
| Figure IV-24: évolution de la stabilité au tamis pour un BAPF..... | 82 |
| Figure IV-25: Évolution de la résistance à la compression des BAPF..... | 83 |
| Figure IV-26: Évolution de la résistance à la traction par flexion pour les BAPF.... | 84 |

Liste des Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I-1: classification du ciment en fonction de leur résistance | 7 |
| Tableau I-2 : les minéraux de clinker..... | 7 |
| Tableau I-3 : les valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAP..... | 21 |
| Tableau I-4 : classe de la résistance à la ségrégation..... | 22 |
| Tableau II-1 : Les caractéristiques et les propriétés des fibres..... | 34 |
| Tableau II-2 : Domaines d'application des bétons fibres..... | 39 |
| Tableau IV-1 : Analyse granulométrique du gravier (3/8)..... | 52 |
| Tableau IV-2 : Caractéristiques physiques de gravier (3/8) de Sétif..... | 53 |
| Tableau IV-3 : Analyse granulométrique du gravier 8/15..... | 54 |
| Tableau IV-4: Caractéristiques physiques de gravier 8/15..... | 54 |
| Tableau IV-5: Analyse granulométrique par tamisage du sable moyen | 56 |
| Tableau IV-6 : Caractéristiques de sable de Ouedsouf..... | 56 |
| Tableau IV-7: Composition chimique du ciment..... | 58 |
| Tableau IV-8 : Composition minéralogique du ciment..... | 58 |
| Tableau IV-9: Caractéristiques physiques du ciment..... | 59 |
| Tableau IV-10: caractéristiques mécaniques du ciment..... | 59 |
| Tableau IV-11 : caractéristiques physiques de fillers calcaire..... | 61 |
| Tableau IV-12: composition chimique de calcaire..... | 61 |
| Tableau IV-13 : caractéristiques physiques de laitier | 62 |
| Tableau IV-14: composition chimique de laitier..... | 62 |
| Tableau IV-15 : caractéristiques physiques de la pouzzolane..... | 63 |
| Tableau IV-16 : composition chimique de pouzzolane..... | 63 |
| Tableau IV-17: Caractéristiques physiques de sable moyen | 64 |

| | |
|---|-----------|
| Tableau IV-18: Composition chimique de sable fin. | 64 |
| Tableau IV-19 : Caractéristiques de fibre. | 65 |
| Tableau IV-20 : Les masses des constituants pour 1 m ³ | 72 |
| Tableau IV-21 : Essai d'étalement sur le BAPF. | 74 |
| Tableau IV-22: Essai de la boîte en L pour BAPF..... | 75 |
| Tableau IV-23: résultats de stabilité au tamis pour BAPF. | 76 |
| Tableau IV-24 : La masse volumique des BAP fibré à l'état durci. | 78 |
| Tableau IV- 25: La résistance à la compression des BAP fibré..... | 78 |
| Tableau IV- 26 : La résistance à la traction par flexion BAP fibré..... | 79 |