

N° Ordre ...../FSI/UMBB/2017



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES

## *Mémoire De Fin D'études*

*En Vue De L'obtention Du Diplôme Master*

*Spécialité : Génie des matériaux*

*Option : Sciences des Matériaux pour la Construction Durable*

### **Thème :**

*Valorisation de la poudre de la roche siliceuse de la région de Tlemcen utilisée comme fillers dans le béton autoplaçant renforcé de fibres métalliques.*

Réalisé par :

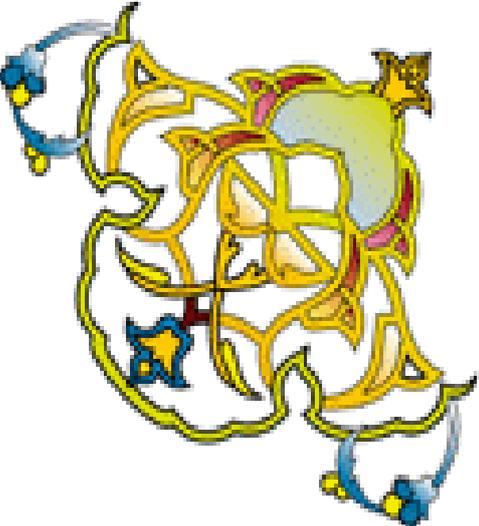
*DJELLAD Mohamed Nasreddine*

*BAKIR Malek*

Sujet proposé et Suivi par :

*MANSOUR.S.M*

**Boumerdes 2017**



# Remerciement

*Ce n'est pas qu'il est difficile de remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail, mais il faut avouer que les formules sont nombreuses et que le choix des bons mots a été toujours difficile. Entre vifs, sincères, profonds et je passe les obscures subtilités de la langue française, le choix de la formule de remerciements est difficile.*

*Nous commençons par remercier le dieu tous puissant, de nous avoir donné le courage et l'optimisme de finir ce travail.*

*Nous tenons à remercier vivement notre promoteur ~~Mme~~ : **HAMZA** pour ses conseils, ses orientations et sa disponibilité durant l'élaboration de ce travail.*

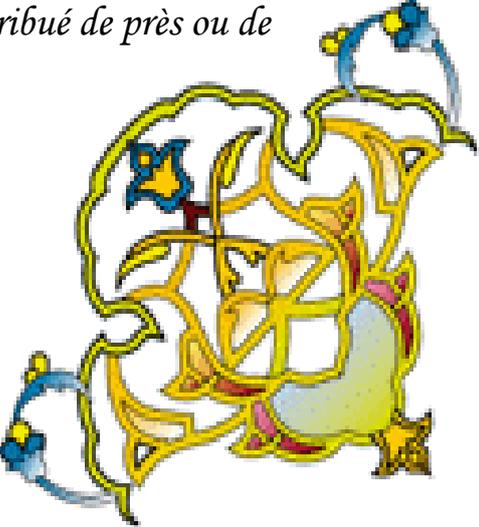
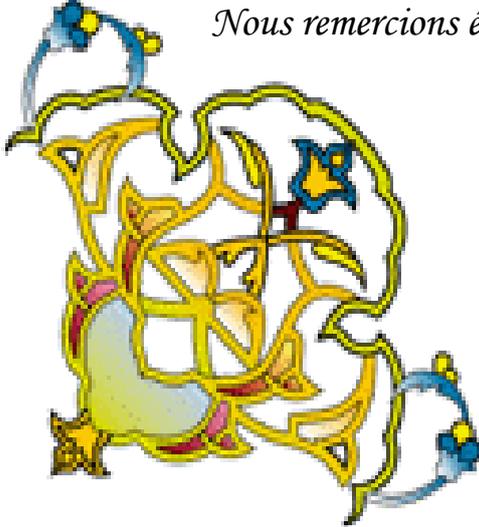
*Nous remercions aussi notre chef de département de Matériaux*

***M~~r~~**: **Benothmane**.*

*Nous adressons aussi nos sincères remerciements à l'ensemble des enseignants de faculté de science de l'ingénieur(FSI) de Boumerdes qui nous ont accompagnés tout au long de notre formation.*

*Nous présentons nos chaleureux remerciements aux membres de « CETIM » pour leur aide pendant la durée du stage.*

*Nous remercions également toute personne ayant contribué de près ou de loin à la finalisation de ce travail.*



*...DJELLAD,BAKIR...*

# *Dédicaces*

*Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve ;*

*A mes chers parents.*

*A toute la famille DJELLAD et DELLALI .*

*A tout le groupe MCD15 et MCQ15.*

*A mes adorables amis.*

*Surtout à Mon Binôme Malek et sa famille.*

*DJELLAD Mohamed Nasreddine*



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Dédicaces

*Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve A mes chers parents, frères et sœurs.*

*A toute la famille BAKIR et KHARMIMOUNE que le dieu vous protège.*

*A tout le groupe MCD15 et MCQ15.*

*A mes adorables amis.*

*Surtout Mon Binôme Mohamed Nasreddine et sa famille*

*BAKIR Malek*

# SOMMAIRE

---

Liste des Figures	
Liste des tableaux	
Présentation de lieu de stage	

## INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## CHAPITRE I : Le BETON AUTOPLAÇANT

CHAPITRE I : LE BETON AUTOPLAÇANT .....	3
I.1. Généralité.....	3
I.2. Définition du béton autoplaçant.....	3
I.3. Les avantages techniques du BAP .....	4
I.4. Les avantages socio-économiques du BAP .....	4
I.5. Domaine d'utilisation des BAP .....	4
I.6. Constituants d'un BAP .....	5
I.6.1. Le ciment .....	5
I.6.2. L'hydratation du ciment.....	5
I.6.2.1. Les principaux hydrates .....	5
I.6.2.2. Les C-S-H .....	6
I.6.2.3. La chaux hydratée (portlandite) .....	6
I.6.2.3. Les aluminates hydratés .....	6
I.6.3. Principaux minéraux du ciment portland .....	7
I.6.4. Propriétés physiques du ciment .....	7
I.6.5. Les caractéristiques chimiques complémentaires des ciments courants.....	10
I.6.6. Classification des ciments.....	10
I.7. Les adjuvants .....	11
I.7.1. Définition .....	11
I.7.2. Le but de l'utilisation des adjuvants .....	11
I.7.3. Les superplastifiants.....	11
I.8. Les additions minérales.....	12
I.8.1. Quelques exemples d'addition .....	13
I.9. Les granulats .....	14
I.9.1. L'eau de gâchage .....	15

## SOMMAIRE

---

I.10. Caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais .....	15
I.10.1 Essais de fluidité .....	15
I.10.2. Caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état durci .....	17
I.11. Approches de formulation des BAP .....	18
I.12. Principe et application des approches .....	20
I.12.1. Approche Japonaise .....	20
I.12.2. Approche Suédoise (proposée par [Petersson et al, 1996]) .....	21
I.12.3. Approche Française .....	21
I.12.4. Autres Méthodes .....	22

## CHAPITRE II : Le Béton de fibres

CHAPITRE II : LE BETON DE FIBRES .....	23
II.1. Introduction .....	23
II.2. Le béton de fibres .....	23
II.3. Historique du béton de fibres.....	24
II.4. Les fibres .....	25
II.4.1. Les différents types de fibres.....	26
II.4.1.1. Les fibres de verre .....	27
II.4.1.2. Les fibres de polypropylène .....	28
II.4.1.3. Les fibres métalliques.....	29
II.5. Rôles des fibres dans le béton.....	30
II.6. Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres .....	31
II.7. Critères de choix des types de fibres .....	31
II.8. Domaines d'application.....	32
II.9. Quantité de fibres à incorporer au béton .....	33
II.10. Influence de l'orientation préférentielle des fibres.....	34
II.11. Les bétons de fibres .....	35
II.12. Avantages du béton fibré.....	35
II.13. Les bétons autoplaçants fibrés.....	35
II.14. Composition des BAPF .....	36
II.15. Effet des fibres sur la maniabilité et la résistance du BAP.....	36
II.15.1. Effet sur la maniabilité .....	36

## SOMMAIRE

---

II.15.2. Effet sur la résistance.....	37
II.16. Les fines et leur rôle dans les bétons autoplacants .....	38

### CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux

CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux.....	39
III.1. Introduction .....	39
III.2. caractéristiques des matériaux utilisés .....	39
III.2.1. Ciment .....	39
III.2.2. Les graviers .....	40
III.2.2.1. Caractéristiques du gravier 8/15.....	41
III.2.2.2 Caractéristiques du gravier 3/8.....	41
III.2.3. Sable.....	43
III.2.3.1. Caractéristiques du sable fin de BOUSSAADA .....	43
III.2.3.2. Caractéristiques du sable grossier de BAGHLIA. ....	44
III.2.4. L'eau de gâchage.....	46
III.2.5. L'adjuvant .....	47
III.2.6. Les fibres .....	48
III.2.6.1. Fibres métalliques I.....	48
III.2.6.2. Fibre métallique II.....	49
III.2.7. Les filler calcaires .....	50
III.2.8. la fumée de silice.....	51
III.2.9. La roche de la région de Tlemcen .....	53

### CHAPITRE IV : Partie expérimentale : Résultats et discussions

CHAPITRE IV. Partie expérimentale : Résultats et discussions .....	56
IV.1. Introduction.....	56
IV.2. Formulation du BAP témoin par la méthode japonaise .....	56
IV.3. Compositions des bétons autoplacants fibrés.....	58
IV.4. Résultats d'essais sur bétons BAP à l'état frais .....	59
IV.4.1. L'essai d'étalement (la fluidité) .....	59
IV.4.2. L'essai de stabilité au tamis .....	61
IV.4.3. L'essai de la boîte en L .....	62

## **SOMMAIRE**

---

IV.4.4. La masse volumique des bétons .....	63
IV.5. Résultat d'essais sur les BAP à l'état durci.....	64
IV.5.1. La masse volumique des BAP .....	64
IV.5.2. L'absorption d'eau .....	65
IV.5.3. Résistance à la compression des bétons BAP .....	66
IV.5.4. Résistance à la flexion.....	67

## **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

Conclusion.....	69
Perspectives .....	71

## Liste des figures

### Chapitre I : Le béton autoplaçant

Fig.I-1	Béton autoplaçant avant et après le malaxage.....	03
Fig.I-2	Fumée de silice.....	13
Fig.I-3	Différentes couleurs de marbre.....	14
Fig.I-4	Essai d'étalement.....	16

### Chapitre II : Le Béton de fibres

Fig.II-1	Fibres de verre.....	27
Fig.II-2	Les fibres polypropylène .....	28
Fig.II-3	Fibres métalliques.....	29
Fig.II-4	Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion.....	34

### Chapitre III : Caractérisation des matériaux

Fig.III-1	Courbe d'analyse granulométrique par tamisage.....	46
Fig.III-2	Fibres métalliques ondulées (50mm).....	48
Fig.III-3	Fibres métalliques crochées.....	49
Fig.III-4	Filler calcaire.....	50
Fig.III-5	La fumée de silice.....	53
Fig.III-6	Roche naturelle en blocs.....	53
Fig.III-7	Les fillers de la roche. ....	53
Fig.III-8	Essai de détermination de l'activité minérale.....	55

### Chapitre IV : Partie expérimentale : Résultats et discussions

Fig.IV-1	Etalement des bétons autoplaçants BAP.....	60
Fig.IV-2	Stabilité au tamis des BAP.....	61
Fig.IV-3	Taux de remplissage des BAP.....	62
Fig.IV-4	Evolution de la masse volumique des bétons autoplaçants frais.....	64
Fig.IV-5	Evolution de la masse volumique des bétons autoplaçants durcis.....	65
Fig.IV-6	Evolution de l'absorption des bétons autoplaçants.....	66
Fig. IV-7	Résistance à la compression des BAP.....	67
Fig. IV-8	Résistance à la traction par flexion des BAP.....	68

## Liste des tableaux

### Chapitre I : Le béton autoplaçant

Tab.I-1	Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.....	10
---------	---	----

### Chapitre II : Le Béton de fibres

Tab.II-1	Propriétés des différents types de fibres .....	26
----------	---	----

### Chapitre III : Caractérisation des matériaux

Tab.III-1	Caractéristique physique du ciment.....	39
Tab.III-2	Résistance à la compression et flexion du ciment.....	39
Tab.III-3	Composition chimique du ciment .....	40
Tab.III-4	Composition minéralogique du ciment.....	40
Tab.III-5	Caractéristiques physiques du gravier 8/15.....	41
Tab.III-6	Analyse granulométrique du gravier 8/15 selon la Norme (NF EN 933-1).....	41
Tab.III-7	caractéristiques physiques du gravier 3/8.....	42
Tab.III-8	Analyse granulométrique de gravier 3/8 selon la Norme (NF EN 933-1)...	42
Tab.III-9	Caractéristiques physiques de sable fin de BOUSSAADA .....	43
Tab.III-10	Analyse granulométrique du sable fin de BOUSSAADA selon la Norme (NF EN 933-1) .....	43
Tab.III-11	Caractéristiques physiques du sable grossier.....	44
Tab.III-12	Analyse granulométrique du sable grossier de BAGHLIA.....	44
Tab.III-13	Analyse granulométrique du sable corrigé selon la Norme (NF NE 933-1)...	45
Tab.III-14	Caractéristique de l'adjuvant.....	47
Tab.III-15	Caractéristiques techniques des fibres métalliques I.....	49
Tab.III-16	Caractéristiques des fibres crochées.....	51
Tab.III-17	Analyse chimique du filler calcaire.....	51
Tab.III-18	Propriétés physiques des fillers calcaire.....	53
Tab.III-19	Caractéristiques techniques de la fumée de silice.....	52
Tab.III-20	Analyse chimique de la fumée de silice.....	52
Tab.III-21	Caractéristique physique de la poudre de roche.....	54

Tab.III-22	Composition chimique de la poudre de roche.....	54
Tab.III-23	Résultat de l'activité pouzzolanique.....	55

### **Chapitre IV : Partie expérimentale : Résultats et discussions**

Tab.IV-1	Composition de 1 m <sup>3</sup> de BAP témoin.....	58
Tab.IV-2	Composition de 1 m <sup>3</sup> des bétons autoplaçants fibrés.....	58
Tab.IV-3	Etallement des BAP sans fibres.....	59
Tab.IV-4	Etallement des BAP fibrés (fibres en crochet).....	59
Tab.IV-5	Etallement des BAP fibrés (fibres ondulées).....	59
Tab.IV-6	Stabilité au tamis des BAP sans fibres.....	61
Tab.IV-7	Stabilité au tamis des BAP fibrés (fibres en crochet).....	61
Tab.IV-8	Stabilité au tamis des BAP fibrés (fibres ondulée).....	61
Tab.IV-9	La boîte en L des BAP sans fibres.....	62
Tab.IV-10	La boîte en L des BAP fibrés (fibres en crochet).....	62
Tab.IV-11	La boîte en L des BAP fibrés (fibres ondulées).....	62
Tab.IV-12	La masse volumique des BAP étudiés sans fibre à l'état frais.....	63
Tab.IV-13	La masse volumique des BAP fibrés (forme crochet).....	63
Tab.IV-14	La masse volumique des BAP fibrés (forme ondulée).....	63
Tab.IV-15	Masse volumique des BAP à l'état durci.....	64
Tab.IV-16	L'absorption d'eau des BAP.....	65

# CETIM

---

### **Présentation**

Le CETIM « centre d'étude et de services Technologiques de l'industrie des matériaux de construction » est une EPA/SPA créée dans le cadre du redéploiement del'ENDMC.

Le CETIM a donc l'avantage de pouvoir disposer d'un outil opératoire et de démarrer sur des bases « humaines », financière et patrimoniales assainies.

Ce potentiel appréciable réuni le minimum de condition et offre une opportunité aux opérateurs de la branche des matériaux de construction de développer à terme un outil collectif pouvant disposer des services technologique d'appui à la production de forte valeur ajoutée.

Ce centre, comme il existe dans un bon nombre de pays, pourra jouer rôle moteur dans le secteur compte tenu de contexte actuel et en perspective, caractérisé par la libéralisation du commerce et la nécessité de rendre l'outil de production plus performant, pour permettre aux entreprises d'être compétitives et au diapason des exigences de marché.

Le CETIM est appelé à devenir l'outil privilégie de ces opérateur pour les accompagner dans leur nécessaire efforts de réhabilitation, rentabilisation et développement.

Ce document renferme une présentation de CETIM, rappelle ses principales mission et énumère les diverses activité pouvant être réalisées e collaboration avec le CETIM.

#### **➤ Présentation de CETIM**

Un outil collectif pour accompagner les entreprises de production de l'industrie des matériaux de construction dans leurs efforts de mise à niveau de rentabilisation et de développement.

### ➤ **Le CETIM dispose**

- ✓ De laboratoire d'analyse et d'essais en phase d'accréditation pour tous les produits de l'industrie des matériaux de construction,
- ✓ De structure de services spécialistes d'appui à la production,
- ✓ D'équipes pluridisciplinaires et de recherches.

### ➤ **Le CETIM compte renforcer ses moyen par**

- ✓ Des investissements d'appoint et de mise à niveau de son laboratoire,
- ✓ L'acquisition des équipements et la mise en place d'un laboratoire de métrologie industrielle,
- ✓ La réalisation et la gestion d'un centre technique de documentation et d'informions de la branche des matériaux de construction,
- ✓ Une implantation régionale pour mieux servir être à l'écoute de ses clients.
- ✓ La recherche de partenariats pour développer des services technologiques de pointe dans les domaines spécifique suivant :
  - La métrologie,
  - Les études d'expertises technologiques,
  - Le management de la qualité,
  - L'exploitation d'un vivier d'expert que peuvent fournir les centres universitaires existants à Boumerdès.

### ➤ **Le CETIM couvrir les domaines d'activités suivantes**

- ✓ Les liants hydrauliques : ciment.
- ✓ Les liants aériens : plâtre et chaux.
- ✓ Les bétons : bétons lourds, bétons légers et bétons autoclaves.
- ✓ Les granulats : légers et lourds.
- ✓ Les céramiques : fines réfractaires.
- ✓ Les terres cuites : briques et les tuiles, hourdis.

### ➤ **Le CETIM a pour mission essentielle de**

- ✓ Contribuer pour améliorer la qualité et la productivité dans l'industrie de matériaux de construction.
- ✓ Garantir la qualité des produits fabriqués.

## PRESENTAION DE LIEU DE STAGE

---

- ✓ Contribuer à la sauvegarde et à préservation de l'environnement.
- ✓ Contribuer à la définition et çà la mise en place des règlements normes régit les possèdes, matières des produit de l'industrie des matériaux de construction.
- ✓ Assuré les contrôle de conformité des règlements et norme.
- ✓ Contribuer à la matière de la consommation de l'énergie.
- ✓ Améliorer les produits existants et favoriser l'innovation d'autre possèdes et d'autres produits.
- ✓ Contribuer a rassemblé les moyens nécessaires à la conduite de mandats d'études et de recherches dont résultats profitent à tous.
- ✓ Collecter l'information technique utile aux industriels et la diffuser par les voies modernes de communication.
- ✓ Développer la certification des produits et la gestion industrielle de la qualité.
- ✓ Assuré une multiformes aux opérateurs de la branche et leur dispensés des services d'appui à la production de haute technicité proposé une grande variété de prestation techniques d'études, l'essai et analyse, d'expertise, de diagnostics de formation spécifique.
- ✓ Contribuer à la maitrise de la technologie, aux transferts des connaissances ainsi qu'à leurs diffusions et entretenir le lien industrie.
- **Contrôles en vue de la certification produit**
  - ✓ Essai types selon produit.
  - ✓ Gestion des étalons de reconnaissance de label CETIM.
- **Métrologie**
  - ✓ Mesure et contrôle de la métrologie.
  - ✓ Gestion des étalons de référence.
- **Protection de l'environnement**
  - ✓ Contrôle de conformité aux normes et règlement (rejet poussières, gaz, eaux usées).
  - ✓ Restauration des sites.
  - ✓ Traitement des déchets et de sous-produit pour les besoin de l'industrie de matériaux de construction.
- **Economie de l'énergie**
  - ✓ Bilan énergétique.
  - ✓ Recommandation pour l'utilisation et l'énergie.

### ➤ **Etude et assistance**

- ✓ Etude prospectives des marchés locaux et extérieurs.
- ✓ Contrôle de l'exploitation des carrières.
- ✓ Etudes des procédés technologiques.
- ✓ Assistances pour la réhabilitation industrielle.
- ✓ Assistances pour le mangement de la qualité.

### ➤ **Recherche scientifique appliquée**

- ✓ Recherche d'adaptions des caractéristique des produits à des exigences particulières.
- ✓ Développement de nouveaux produits.
- ✓ Etudes de problèemes spécifiques liés à la production.

### ➤ **Centre techniques information documentation archives**

- ✓ Recueil, centralisation et diffusion des informations relatives aux activités de la branche de matériaux de construction.
- ✓ Gestion de la documentation.
- ✓ Gestion du dossier technique (plans, notes de calcules).
- ✓ Edition et diffusion de bulletin d'information techniques.
- ✓ Constitution d'un réseau professionnelle.
- ✓ Mise à disposition d'un fichier d'experts locaux et étrangers.
- ✓ Promotion et organisation de la coopération industrielle.
- ✓ Participation à la mise en place de normes et règlement.
- ✓ Animation de stages de de formation et d'information.
- ✓ Développement des relations Université/entreprise.

# INTRODUCTION GENERALE

---

### **Introduction général**

Les bétons autoplaçants (BAP) se caractérisent par une grande fluidité et se mettent en place par gravité sans vibration. Cette propriété peut être obtenue par l'emploi de superplastifiant et l'augmentation du volume de pâte. L'utilisation des additions minérales est nécessaire pour obtenir un volume de pâte suffisant. De nombreuses études ont montré les effets favorables des additions minérales sur les propriétés des BAP à l'état frais et à l'état durci, notamment les fillers calcaires (FC) qui sont les plus utilisés. Cependant, peu d'études ont été menées sur la fumée de silice ou sur d'autres additions minérales utilisées comme fillers dans le béton autoplaçant.

Les matières premières naturelles constituant le béton sont très variées et très répandues en Algérie. De grandes quantités sont extraites chaque année. Par conséquent, l'utilisation de ces dernières dans la production de nouveaux matériaux cimentaires peut aider à protéger l'environnement. L'emploi en tant que fillers des additions minérales telles que la poudre de la roche naturelle d'origine volcanique de la région de Tlemcen confrontée à la fumée de silice dans les BAP pourrait constituer une alternative intéressante aussi bien sur le plan environnemental que sur le plan technico-économique. Ainsi, elle permettra d'améliorer les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton autoplaçant. Il est donc intéressant d'exploiter cette source naturelle qui présente des intérêts, à la fois économique et écologique. Mais il faut préciser son importance quand elle est utilisée comme fillers dans le béton BAP. Par ailleurs, le béton autoplaçant ainsi amélioré présente une fragilité accrue en traction. Pour compenser cette fragilité et pour contenir une macro fissuration stable dans les zones tendues, le béton doit être renforcé. Pour cela, l'utilisation des fibres bien choisies dans le béton BAP permet de lui conférer une meilleure résistance à la propagation de la fissuration, de diminuer la fragilité du composite et dans certaines conditions, d'augmenter sa résistance mécanique. Les fibres assurent le transfert des contraintes à travers la fissure, limitant ainsi son ouverture et sa propagation. La localisation de la macrofissuration est ainsi retardée, limitant la fragilité du béton.

Le but de ce travail est de mettre en évidence l'effet de la poudre de la roche naturelle de la région de Tlemcen confrontée à la fumée de silice lorsqu'elles sont utilisées comme fillers afin de remplacer les fillers calcaires dans le béton autoplaçant. Cet effet est étudié sur les propriétés d'ouvrabilité à l'état frais (étalement, taux de remplissage et stabilité au tamis) et physico-mécanique à l'état durci (Masse volumique, Absorption d'eau résistance à la traction par flexion, à la compression) du béton autoplaçant renforcé par des fibres métalliques de deux types.

Ce travail consiste à formuler un béton autoplaçant BAP (FC) témoin avec addition de fillers calcaire (C) et d'autres bétons BAP fibrés en remplaçant les fillers calcaires par la poudre de roche de la région de Tlemcen (R) ou la fumée de silice (F) d'une part et en incorporant deux types de fibres métalliques d'autre part. La formulation des BAP fibrés est basée sur les critères recommandés par l'AFGC. Les dosages des fillers FC, FR et FF sont fixés à 10% par rapport à la masse du ciment. Le taux de fibres métalliques est fixé à 1% vol.

Le travail est structuré comme suit :

**Une synthèse Bibliographique** : subdivisée en deux chapitres.

**Chapitre I** qui consiste à définir le béton autoplaçant et son utilisation, les matières premières utilisées, les concepts de sa formulation ainsi que ses caractéristiques aux états frais et durci.

**Chapitre II** qui concerne la description du béton fibré, puis du béton autoplaçant fibré ainsi que leur domaine d'application.

**Une partie expérimentale** : subdivisée en deux chapitres.

**Chapitre III** qui décrit la caractérisation des matériaux utilisés à savoir les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques (ciment, filler calcaire, superplastifiant, roche de Tlemcen, Fumée de silice, sable et gravier et les types de fibres métalliques).

**Chapitre IV** est consacré à la formulation des neuf bétons autoplaçants avec ou sans fibres élaborés par la méthode japonaise et aux résultats des différents essais effectués sur ces derniers ainsi qu'à leurs interprétations.

Enfin, une conclusion générale en mentionnant l'intérêt de cette étude et des perspectives.

# CHAPITRE I

---

## LE BETON AUTOPLAÇANT

## CHAPITRE I. LE BETON AUTOPLAÇANT

### I.1. Généralités

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide qui s'écoule sous son propre poids et se met en place sans vibration, sans ségrégation et sans ressuage [1]. Le concept de béton autoplaçant, aussi appelé béton autocompactant, béton autoconsolidant ou béton auto nivelant pour les applications horizontales, a été introduit pour la première fois à la fin des années 1980 par des chercheurs de l'Université de Tokyo. L'idée d'un béton fluide et homogène se mettant en place sous l'effet de son propre poids est née du problème de durabilité des structures en béton au Japon. Cela était dû à la réduction du nombre de mains-d'œuvre qualifiées qui assuraient une bonne mise en œuvre et une bonne consolidation du béton. La pérennité des structures était menacée face à ce problème.

Dès lors, la recherche, le développement et l'utilisation du BAP ont pris de l'ampleur en Europe et en Amérique du Nord une dizaine d'années après son premier développement. En effet, ce nouveau type de béton révolutionnaire tant par ces caractéristiques à l'état frais qu'à l'état durci offre un bon nombre d'avantages techniques, et socio-économiques liés à son utilisation [1].

### I.2. Définition du béton autoplaçant

Par béton autoplaçant (BAP), on désigne un béton très fluide, très déformable, stable et mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuant par le seul effet gravitaire). Il confère à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant au béton classique mis en œuvre par vibration et il garantit à la structure la résistance et la durabilité. Par définition, les BAN (Bétons Auto-Nivelant) constituent une famille de BAP correspondant aux applications horizontales (dallage, planché...) [2].



**Figure I. 1.** Béton autoplaçant avant et après le malaxage.

### **I.3. Les avantages techniques du BAP**

- ✓ Bon remplissage des coffrages et enrobage des armatures adéquat sans vibration.
- ✓ Facilité de coulage dans des endroits confinés et/ou difficiles d'accès.
- ✓ Possibilité de confectionner des structures de géométrie complexe et/ou fortement ferrillées.
- ✓ Meilleures performances et durabilité grâce à leur grande compacité.
- ✓ Propriétés mécaniques analogues ou supérieures à celles du béton vibré.
- ✓ Amélioration des qualités esthétiques des parements et des surfaces.
- ✓ Mise en place aisée par pompage [3].

### **I.4. Les avantages socio-économiques du BAP**

- ✓ Optimisation du rendement des chantiers et des usines de préfabrication.
- ✓ Augmentation des cadences de production et gain de temps.
- ✓ Suppression des opérations coûteuses en mains-d'œuvre qualifiées pour le compactage du béton, le talochage et le ragréage des surfaces.
- ✓ Économie sur le coût global d'un projet.
- ✓ Réduction des nuisances sonores sur les chantiers, notamment en milieux urbains, dues principalement à l'emploi de vibrateurs internes et/ou externes.
- ✓ Diminution de la pénibilité du travail et amélioration des conditions de sécurité des ouvriers [2].

### **I.5. Domaine d'utilisation des BAP**

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [3]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des densités de ferrailage importantes, des formes et géométries complexes : voiles, courbes, ... ; voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, ... ; voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ; exigences architecturales et qualité de parement particulière.

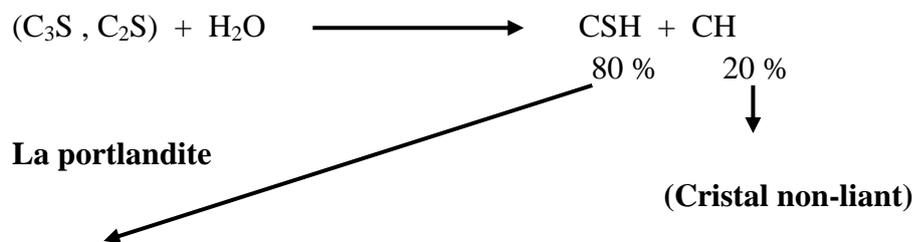
## I.6. Constituants d'un BAP

### I.6.1. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique obtenu par cuisson (à 1450°C) et broyage du clinker qui est un mélange de 80% de calcaire et 20% d'argile. Généralement des correcteurs tels que le minerai de fer qui apporte Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, bauxite (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), sable (SiO<sub>2</sub>) sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée. Il se présente sous forme de poudre finement broyée qui est mélangée avec de l'eau pour obtenir une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps.

### I.6.2. L'hydratation du ciment

La pâte de ciment hydraté est le résultat de la réaction chimique entre l'eau et le ciment (la réaction d'hydratation). C'est un processus chimique complexe où les principaux composés du ciment réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui durcissent avec le temps.



**Les C-S-H** : peu cristallisés (gel) et liants, ce sont les hydrates les plus importants. Le rapport C/S dans ces CSH est typiquement compris entre 1,6 à 1,8.

La pâte de ciment partiellement hydratée est composée essentiellement :

- ✓ Des grains de ciment (10 à 80 µm au départ) partiellement hydratés et recouverts d'une couche hydrates.
- ✓ Des capillaires remplis ou partiellement remplis d'eau.
- ✓ Des hydrates (surtout des C-S-H et de la chaux qui remplissent graduellement les espaces entre les grains de ciment.
- ✓ Les pores de gel ne sont pas représentés et les bulles d'air sont trop grandes [5].

#### I.6.2.1. Les principaux hydrates

Les hydrates (la pâte de ciment durcie) jouent le rôle de colle qui solidarise les granulats entre eux pour former un matériau rigide. La pâte de ciment représente de 25 % à 40 % du volume du béton. La plupart des propriétés du béton, et plusieurs aspects de la durabilité du béton, sont directement liés aux caractéristiques de la pâte de ciment durci.

Les hydrates comprennent :

- ✓ Les silicates de calcium hydratés (C-S-H).

- ✓ Les aluminates hydratés.
- ✓ Les chaux hydratées (portlandite).
- ✓ De l'eau adsorbée sur certains cristaux.
- ✓ Des impuretés.

### **I.6.2.2. Les C-S-H**

Les C-S-H occupent entre 50% et 60% du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. C'est un gel solide qui a les propriétés d'un corps solide. Il a une structure en feuillet, formée de cristaux très petits et mal cristallisés. La surface spécifique des C-S-H est très élevée (100 à 700 m<sup>2</sup>/g). La cohésion des C-S-H est due, en partie, aux forces de Van der Waals entre les particules colloïdales des C-S-H.

Le PH de la solution interstitielle est très alcalin (voisin de 13), à des PH plus faibles, il peut y avoir lixiviation des ions Ca<sup>+2</sup> des C-S-H. ceux-ci subissent alors des transformations qui peuvent augmenter leur porosité et diminuer les propriétés mécaniques.

Le gel de C-S-H est poreux. Les pores de gel, sont en fait les espaces qui contiennent de l'eau adsorbée sur les surfaces entre les feuilles. Ils sont très petits (2nm à 3 nm) et la porosité du gel de C-S-H représente environ 28 % du volume total du gel.

L'eau des pores de gel n'est pas "libre" car elle est fortement retenue sur les feuillets par des forces de surface. Puisque les pores de gel sont extrêmement fins, il contribue très peu à la perméabilité de la pâte et du béton [5].

### **I.6.2.3. La chaux hydratée (portlandite)**

Elle occupe de 20 à 25 % du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonales prismatique (la morphologie est très variable en fonction des paramètres de composition du béton). Elle est produite à la suite de l'hydratation de C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S.

Dans la pâte de ciment hydraté, elle devient instable (lixiviation) lorsque le PH devient inférieur à environ 12,5. Elle participe peu au développement de la résistance du béton [5].

### **I.6.2.3. Les aluminates hydratés**

Ils occupent de 15 à 20 % du volume solide de la pâte de ciment hydraté, on les retrouve généralement sous deux formes :

- ✓ Ettringite (trisulfoaluminates) aiguilles prismatiques,
- ✓ Monosulfoaluminates (plaquettes hexagonales).

### I.6.3. Principaux minéraux du ciment portland

- ✓ Les silicates tricalciques (alite) :  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$   $\longrightarrow$  de 50 à 70% [C3S].
- ✓ Les silicates bicalciques (belite) :  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$   $\longrightarrow$  de 5 à 25% [C2S].
- ✓ Les alumino-ferritestétracalciques :  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$   $\longrightarrow$  de 0 à 15% [C4AF].
- ✓ Les aluminates tricalciques:  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$   $\longrightarrow$  de 2 à 10% [C3A].
- **Le C3S** : permet l'obtention des résistances élevées à court et moyen terme.
- **LeC2S** : participe à l'acquisition de la résistance à long terme. En quantité importante il réduit la chaleur d'hydratation du ciment.
- **Le C3A** : accéléré la prise. En quantité notable, il génère de forte chaleur d'hydratation initiale. Il permet d'obtenir des ciments à résistance initiale élevée.
- **LeC4AF** : réagit avec une vitesse plus faible que le C3A, ne peut être considéré comme un produit inerte. Ce sont les oxydes de fer inclus qui confèrent au ciment sa couleur grise caractéristique.

### I.6.4. Propriétés physiques du ciment

Une fois la poudre de ciment mélangée à l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système constituant des hydrates stables avec formation des cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise. Chacune des phases précédentes a un rôle dans l'acquisition des propriétés du ciment hydraté, on aura donc les phases suivantes :

#### 1. La phase initiale

Une dissolution superficielle des silicates tricalciques formant ainsi un mono silicate de calcium hydraté et l'étringite.

#### 2. La phase dormante

Au cours de laquelle la pâte reste fluide, avec la présence de la réaction précédente lentement pendant 2 à 3 heures.

#### 3. La phase de prise

Au cours de laquelle la pâte acquiert une certaine consistance due à l'interpénétration des cristaux.

#### 4. La phase de durcissement

Elle se développe environ huit heures après le début d'hydratation et se poursuit pendant des années à une vitesse de plus en plus lente et dont le résultat est l'augmentation de la résistance mécanique et de la compacité.

La réaction d'hydratation du ciment s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon les ciments et la rapidité de prise [6].

➤ **La prise**

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié à de nombreux paramètres :

- ✓ Le type de ciment.
- ✓ La finesse de mouture, le début de prise est d'autant plus rapide que la finesse est plus poussée.
- ✓ La température ambiante, la prise étant stoppée à 0 °C, alors qu'elle est accélérée dès que T° dépasse 30 °C.
- ✓ La présence de matières organiques dans l'eau.
- ✓ L'excès d'eau de gâchage qui agit alors comme retardateur de prise.

La norme spécifique, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

- ✓ 1 h 30 pour les ciments de classes 32,5.
- ✓ 1 h pour les ciments des classes 42,5 et 52,5.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h 30 pour la majorité des ciments pour une température ambiante de 20°C [6].

➤ **Le durcissement**

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent de croître.

Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classes élevées et de préférence de classe « R » c'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire « rapide ». Il est également possible d'utiliser du ciment alumineux fondu CA qui après quelques jours a atteint le quasi totalité de sa résistance [6].

➤ **La fausse prise**

Dans la composition des ciments rentre en général un peu de gypse (sulfate de calcium hydrate à deux molécules d'eau  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Si les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ ) dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la « fausse prise ». Dans ce cas, il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage. Les ciments les plus sensibles sont ceux à très fine mouture ou à assez fort pourcentage de gypse [6].

➤ **La finesse de mouture**

La finesse de mouture, est appelée aussi « finesse Blaine », exprimée en  $m^2/kg$ , représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1kg de ciment. Elle est, d'une façon générale, comprise entre 300 et 350 (notons que la finesse s'exprime également en  $cm^2/g$ . Il ressort qu'une finesse de  $300 m^2/kg$  correspond à  $3000 cm^2/g$ ). certains ciments tel que les ciments prompts naturelles « CNP » ont une Blaine supérieure à  $450 m^2/kg$ .

Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'éventement du ciment sont accrus [6].

➤ **Le retrait**

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16cm de longueur et d'une section droite de  $4 \times 4cm$ , conservées dans l'air à une température de  $20\text{ }^\circ C$  et une hygrométrie de 50 % [6]. La norme impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

- ✓  $800\ \mu m/m$  pour les ciments Portland CPA-CEM I et CPJ-CEM II de la classe 32,5.
- ✓  $1000\ \mu m/m$  pour des types de ciment identiques mais des classes 32,5 R-42,5 et 42,5 R.

➤ **L'expansion**

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux CaO ou de magnésie libre MgO.

Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

La 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 à tester, et conservé 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 magnésie est limité ; sa valeur, spécifiée par la norme, doit être au plus égale à 5 % pour les CPA-CEM I ainsi que pour le clinker [6].

➤ **Le gonflement**

Bien que non normalisé, il est utile de rappeler qu'alors qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est émergé dans l'eau, ses variations dimensionnelles étant environ le  $1/10^\circ$  de celles constatées dans l'air [6].

### I.6.5. Les caractéristiques chimiques complémentaires des ciments courants

La réalisation d'ouvrages situés dans un environnement agressif particulier peut requérir une résistance chimique spécifique pour éviter une attaque par le milieu ambiant susceptible d'entraîner la désagrégation du béton. Par exemple des bétons au contact d'eaux à haute teneur en sulfates, d'eau de mer, d'eaux très pures.

Le choix du ciment à utiliser pour assurer la pérennité des ouvrages doit donc être fait en tenant compte de l'ensemble des paramètres en présence. A titre d'exemple on cite :

- Ciments pour travaux à la mer : Ce type de ciments doivent satisfaire aux conditions simultanées suivantes :
  - ✓ % de  $C_3A \leq 10$
  - ✓  $C_3A + 0,27 C_3S \leq 23,5 \%$ .

Il est rappelé que c'est essentiellement l'action des sulfates (sulfates de magnésie) sur l'alite  $C_3A$  qui est à l'origine de la dégradation des bétons par suite de formation de sels expansifs (sels de Candlot) car ils fixent dans leur transformation cristalline une plus importante quantité d'eau [6].

### I.6.6. Classification des ciments

Selon la teneur des constituants autre que le gypse ajouté au le clinker, la norme européenne NF EN 197-1 donne des ciments courants qui sont regroupés en cinq principaux types à savoir :

**Tableau I. 1.** Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.

Désignation	Types de ciment	Clinker %	Ajouts et Teneur sen%	Matière secondaire
<b>CEM I</b>	Ciment portland	95à100%	/	0à 5%
<b>CEMII /A</b>	Ciment portland	80à94 %	L'un desAjouts-6à20 %	
<b>CEMII /B</b>	Composé	65à79 %	-21à35%	
<b>CEMIII/A</b>	Ciment de haut Fourneau	35à64 %	-35à65%	
<b>CEMIII/B</b>		20à34 %	Laitier-66à 80%	
<b>CEMIII/C</b>		5à19 %	-81 à95 %	
<b>CEMIV/A</b>	Ciment pouzzolanique	65à90 %	Pouzzolane,-10à35 %	
<b>CEMIV/B</b>		45à64 %	Cendre ou fumée silice-36à55 %	
<b>CEMV/A</b>	Ciment au laitier aux cendres	40à64 %	Laitier-18à30 %	
<b>CEMV/ B</b>		20à39 %	etcendre-31à50 %	

## I.7. Les adjuvants

### I.7.1. Définition

Les adjuvants sont des agents chimiques qui sont ajoutés en petites quantités pour modifier certaines propriétés du béton comme les propriétés rhéologiques, la durabilité et les propriétés mécaniques. Il existe plusieurs types d'adjuvants.

- Adjuvant entraîneur d'air:
- Adjuvant accélérateur de prise
- Adjuvant accélérateur de durcissement
- Adjuvant retardateur de prise:
- Adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau [16].

### I.7.2. Le but de l'utilisation des adjuvants

- ✓ Diminuer le cout des constructions en béton ;
- ✓ Donner au béton certaines caractéristiques plus efficacement que par d'autres moyens ;
- ✓ Assurer la quantité du béton durant le malaxage, le transport, la mise en place et la cure dans des conditions météorologiques défavorables ;
- ✓ Obvier à certaines urgences durant le bétonnage.

Il ne faut cependant pas oublier qu'aucun adjuvant, en quelque quantité que ce soit, ne saurait remplacer une bonne technique de bétonnage. L'efficacité d'un adjuvant dépend de facteurs tels que le type, le dosage en liants, la teneur en eau, la forme, la granulométrie et les proportions des granulats, le temps de malaxage, l'affaissement et les températures du béton. Dans le cas des BAP, les adjuvants les plus utilisés sont les superplastifiants ; qui sont des poly-électrolytes organiques, appartenant à la catégorie des dispersants polymériques.

### I.7.3. Les superplastifiants

Les superplastifiants sont des produits organiques incorporés au béton frais en faible quantité (de 0,2 à 2% environ) permettent d'améliorer certaines de ses propriétés d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue [4]. L'utilisation de superplastifiant nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation. Les superplastifiants assurent une défloculation de la suspension de ciment en solution aqueuse, ce qui améliore caractéristiques rhéologiques du mélange.

Les mécanismes responsables de cet effet sont encore discutés. Il semble certain, que ces molécules organiques se fixent à la surface du grain de ciment. La défloculation serait obtenue

par répulsion électrostatique des nuages de molécules ainsi formés en périphérie des grains et/ou par l'encombrement stérique de ces molécules qui empêcherait les contacts entre les particules de ciment. En définitive, ces produits auraient un rôle de dispersant et lubrifiant. Enfin, l'abaissement de la tension de surface de l'eau améliorerait également la fluidité du système [5].

## I.8. Les additions minérales

Les additions ou les ajouts sont des particules de faibles dimensions qui, ajoutées en quantités de l'ordre de 10% du poids de ciment, améliorent notablement les performances et la durabilité du béton grâce à leurs propriétés physico-chimiques (cendres volantes, laitier, fillers, ...). Il existe deux catégories de fines minérales :

### ➤ Les fines actives à caractère pouzzolanique

Ce sont des particules de faibles diamètres qui, ajoutées en quantités de l'ordre de 10 % du poids de ciment, améliorent notablement les performances de résistances et de durabilité du béton grâce à leurs propriétés pouzzolaniques (cendres volantes, fumée de silice, laitier...) [8], [9].

### ➤ Les fines inertes comme les fillers calcaires

L'objectif dans leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance. Elles sont également utilisées pour améliorer la consistance des bétons notamment dans le cas des bétons autoplaçants qui nécessitent une forte teneur en fines pour assurer au BAP, un compromis entre une bonne fluidité apportée par les fluidifiants et une bonne viscosité que l'on essaye d'avoir par l'introduction des fillers.

Les ajouts cimentaires sont des matériaux qui contribuent aux propriétés des coulis frais et durcis par action hydraulique où pouzzolanique où les deux à la fois. Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les fumées de silice en sont des exemples courants. Ces ajouts sont incorporés aux mélanges de coulis où de béton pour différentes raisons :

- ✓ Améliorer les caractéristiques rhéologiques des coulis (viscosité et stabilité).
- ✓ Améliorer la résistance du coulis durci et augmenter sa durabilité.
- ✓ Réduire le coût de la matière liante : ces ajouts étant le plus souvent des sous produits d'autres industries, leur incorporation dans le ciment avec des proportions pouvant atteindre les 30% permet de réduire le prix de revient de la matière liante.
- ✓ Favoriser la pénétrabilité dans les fissures fines : certains de ces ajouts sont plus fins que le ciment (fumée de silice). Les fumées de silice, ou micro-silices, sont les plus utilisées, ce sont des oxydes de silicium à structure amorphe en forme de microsphères de diamètre de l'ordre de 10 µm.[10].

### I.8.1. Quelques exemples d'addition

#### ➤ Filler de calcaire

Les fillers calcaires sont généralement utilisés pour limiter le dégagement de chaleur, réduire le ressuage et augmenter la résistance à la compression, en effet, lorsque les particules calcaires sont bien défloculées par les superplastifiants, l'hydratation du ciment s'en trouve facilitée et l'obtention d'une matrice cimentaire de structure plus dense est favorisée. Quel que soit le type de fillers calcaires dans la formulation des BAP, l'augmentation du dosage des fillers en remplacement du ciment conduit à un dosage en superplastifiant plus faible pour un étalement donné [11].

#### ➤ La fumée de silice

Pour les bétons frais, la fumée de silice complète le fuseau granulaire et supprime les tendances au ressuage ou à la ségrégation tout en réduisant les chaleurs d'hydratation. Pour les bétons durcis, la finesse de la fumée de silice permet de créer une microstructure très dense qui conduit à des bétons extrêmement compacts, à caractéristiques mécaniques élevées en réduisant les teneurs en eau grâce à l'adjuvantation. Ces bétons ont ainsi une résistance nettement renforcée vis-à-vis des agents ou des phénomènes agressifs : attaques chimiques, acides, sulfates, abrasion gel/dégel, en réduisant significativement la porosité et la perméabilité, la carbonatation, les phénomènes d'alcali-réaction et de réaction sulfatique interne [12].



**Figure I.2.** Fumée de silice.

#### ➤ Pouzzolanes naturelles

La pouzzolane est un matériau siliceux ou alumino-siliceux qui, finement broyée et à température ambiante en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  libéré par l'hydratation du ciment portland pour former des composés possédant des propriétés liantes.

➤ **Le marbre**

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris (Figure I.7), pouvant présenter des veines, ou marbrures (veines et coloris sont dus à des inclusions d'oxydes métalliques, le plus souvent) [13]. Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangée à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de (2,7), [14].



**Figure I.3.** Différentes couleurs de marbre.

➤ **Laitiers de hauts fourneaux**

Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil et la viscosité des pâtes de ciment. Shi et Al. Montrent par exemple que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent les superplastifiants. Il est donc possible que la demande en superplastifiants soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou valeur de seuil [15].

## **I.9. Les granulats**

Les granulats sont des matériaux inertes, compris entre 0 et 125mm. Les granulats constituent le squelette du béton et ils représentent, environ 80 % du poids total du béton. Ils sont constitués de Sables (Gros et Fin) et de gravier. Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton. Les granulats artificiels sont obtenus de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais (laitier cristallisé concassé, l'argile expansée etc.) [16].

Pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton autoplaçant utilise généralement des granulats roulés de rivières et un apport de fines plus importants. Du fait que

les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée, en général le rapport granulats / sable (G/S) exprimé en masse est de 1 dans un BAP. Le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé augmente lorsque le  $D_{max}$  augmente. Ainsi, le  $D_{max}$  des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm.

### **I.9.1. L'eau de gâchage**

Le rôle principal de l'eau de gâchage est de permettre l'hydratation du ciment, qui est responsable de durcissement du béton. La présence de certaines substances dans l'eau peut entraver le processus d'hydratation, et ainsi réduire la résistance et la durabilité du béton. Parmi les impuretés nuisibles on peut citer les huiles, certains sels, les acides, les produits caustiques, la matière organique, les résidus d'égouts, etc. Dans certains cas, on obtient une diminution de la résistance ; dans d'autres cas, la présence de ces produits modifie le temps de prise. L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension [12].

## **I.10. Caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais**

Lors de la formulation, la caractérisation des BAP est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement. Les principaux tests réalisés sont empiriques, sont destinés à caractériser le béton de part sa fluidité, sa stabilité et son absence au blocage [17].

### **I.10.1 Essais de fluidité**

#### **a. Mesure de l'étalement (essai au cône d'Abrams)**

Le principe de cet essai est de mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône (Figure I.8) [18]. Le diamètre de la galette de béton est le paramètre caractérisant de la fluidité, plus il est grand, plus le béton est fluide (grande capacité de remplissage). L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50cm et 80cm en fonction de l'utilisation du béton [19], [20]. Ceci permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).



**Figure I.4.** Essai d'étalement.

### **b. Mesure de la vitesse d'étalement (Essais au cône d'Abrams)**

Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50cm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. Cette mesure, le T50, est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de T50 traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Pour un béton autoplaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes [21], [22]. Cependant, certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes, pour des bétons autoplaçants avec une faible vitesse de déformation [23], [24].

### **c. Ségrégation dynamique**

#### ➤ Essai de la boîte en L

La boîte en L permet de caractériser la mobilité du béton frais en milieu confiné (ségrégation dynamique) et de vérifier que la mise en place du béton se fait sans blocage, ni formation de voûtes au voisinage des armatures.

Lors de l'écoulement d'un BAP, les risques de séparation de la phase granulaire de la pâte sont très élevés, notamment en présence d'armatures. Au coulage du béton, la trajectoire des granulats se trouve modifiée, les granulats ont tendance à converger vers les mêmes endroits en formant des voûtes au voisinage des armatures bloquant alors l'écoulement du béton [17].

### **d. Essais de ségrégation statique**

#### ➤ Essai de la stabilité au tamis

Il consiste à mesurer la proportion d'éléments fins de béton (laitance) passant au travers le tamis pour qualifier le béton vis-à-vis du risque de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes :

- ✓ Classe A :  $0\% < \pi$  (laitance)  $< 15\%$  : stabilité satisfaisante.

- ✓ Classe B :  $15\% < \pi$  (laitance)  $< :$  stabilité critique.
- ✓ Classe C :  $\pi$  (laitance)  $> 30\%$  : stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, Béton inutilisable) [25].

➤ **Essai à l'entonnoir (V-Funnel)**

Le principe est de trouver le temps d'écoulement pour faire passer le béton à travers un entonnoir. Ce temps est souvent le critère qui définit la viscosité du béton auto compactant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le BAP.

➤ **Essai d'étalement modifié (J-Ring)**

L'essai d'étalement modifié (J-Ring) consiste à faire s'écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. Le béton SCC satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau [6].

**e. Essai complémentaires sur le béton frais**

➤ **Mesure de la teneur en air occlus**

Pour la mesure de l'air occlus dans le béton frais, on utilise la méthode dite « par pression ». Comme le seul élément compressible dans le béton frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au béton frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le béton. Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre. Le pourcentage de l'air occlus dans les bétons autoplaçants n'est pas limité à une valeur fixe mais plus il augmente plus il influe négativement sur les performances mécanique de notre béton. [6].

➤ **Les masses volumiques**

La masse volumique réelle du béton frais doit être systématiquement mesurée. Cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse volumique théorique. La masse volumique réelle MVR est normalement égale à la masse volumique théorique MV calculée à partir de la formulation théorique du béton avec comme source d'incertitude la quantité d'air occlus.

### **I.10.2. Caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état durci**

#### **➤ Résistance à la compression**

Diverses études comparent l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers de calcaires à celle des bétons vibrés. Ces auteurs observent une accélération de la résistance au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours. Ceci est expliqué par une hydratation favorisée par une multiplication des sites de nucléation des fines du filler. Pour Peterson, cette résistance augmente d'autant plus que la finesse de filler est importante. De plus, les superplastifiants ont des répercussions sur la résistance mécanique des bétons autoplaçant. Selon Felekoglu et AL, certains superplastifiants entraînent des effets secondaires comme le retard de la prise qui aboutit à l'augmentation du développement de la résistance mécanique au jeune d'âge mais à long terme, la résistance en compression des BAP est soit inférieure à celle des bétons vibrés quand la quantité du superplastifiant est importante. Un autre élément influençant la résistance à la compression est le volume de la pâte. Turcey et AL, montre que le volume de la pâte a un effet réel mais limite sur la résistance en compression. Il est observé une diminution de 12% de la résistance pour une augmentation de 57% du volume de la pâte [6].

De même, Pineaud constate que le volume de la pâte a une faible influence sur la résistance en compression. Parallèlement au volume de la pâte, le rapport E/C est un facteur le plus influent sur la résistance en compression.

#### **➤ Résistance à la traction**

La particularité des BAP peut entraîner des variations de résistance, par exemple, la quantité des fines ou bien le volume de sable peuvent influencer la résistance à la traction. Ils montrent que l'augmentation de la quantité de sable ou du volume de fines entraîne une élévation de la résistance en compression. En effet, la résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. On peut noter que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont fréquemment utilisées dans la littérature pour expliquer l'évolution de la résistance à la traction. Pour certains auteurs, la porosité de l'auréole de transition des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés BV. Donc la résistance à la traction des BAP est supérieure à celle des BV (de l'ordre de 10%). Ces résultats sont repris par Pineaud, il suggère que la quantité de l'interface de la pâte-granulats est meilleure dans les BAP.

### **I.11. Approches de formulation des BAP**

Il existe dans la littérature des techniques de formulation moins empirique. Ces méthodes sont basées sur des concepts plus ou moins différents et peuvent être présentées en cinq grandes

familles d'approches. Toutes les méthodes de formulation des BAP recueillies dans la littérature sont issues d'une ou plusieurs des approches suivantes :

➤ **Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers**

Okamura, le concepteur des BAP, propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en super plastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité. A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons. La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. Billberg et Jacobs et al montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier [23].

➤ **Méthodes basées sur l'optimisation du volume de la pâte**

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage. Oh et al ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par Tangtermsirikul, Pettersson et Bui. Cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés : un Volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage. La notion d'excès de pâte a également été proposée par Chanvillard et al dans une méthode de formulation des bétons de sable [23].

➤ **Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire**

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire, en considérant maintenant que la phase interstitielle est

l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie. Sedran et de Larrard ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables, sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton. Le modèle est implanté dans un logiciel (Béton lab Pro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton. Roshavelov a également développé un modèle d'empilement granulaire, qui semble néanmoins être resté à un stade plus théorique [23].

➤ **Méthode basée sur un plan d'expérience**

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressant pour connaître l'effet des paramètres de composition. Khayat et al ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines  $E/(C+A)$ , la masse de super plastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC [23].

## **I.12. Principe et application des approches**

### **I.12.1. Approche Japonaise**

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de la pâte de ciment 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 :

➤ Dosage des gravillons :

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour  $1 \text{ m}^3$  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  $285 \text{ l/m}^3$ . 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.

#### 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.

##### ➤ 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  $350 \text{ kg/m}^3$ ).

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

##### ➤ 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.[23].

### **I.12.2. Approche Suédoise (proposée par [Pettersson et al, 1996])**

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par [Tangtermsirikul et al, 1995]. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées. Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat [23].

### **I.12.3. Approche Française**

Cette méthode française (LCPC) est 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 suivants: 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 autoplaçant sont atteintes [23].

#### **I.12.4. Autres Méthodes**

D'autres méthodes de formulation ont été publiées tels que la méthode reposant sur la théorie de «l'excès de pâte » qui est proposée par [Oh et al, 1999] ; la méthode d'évaluation simple utilisée par [Ouchi et al, 1999] ( étudie l'interaction entre les granulats et les particules fines du mortier frais) etc...[23].

# CHAPITRE II

---

## LE BETON DE FIBRES

## **CHAPITRE II. Le Béton de fibres**

### **II.1. Introduction**

Les matériaux composites sont reconnus comme étant la combinaison de deux ou plusieurs corps de nature et de compositions différentes, et qui, contrairement aux composés chimiques, possèdent des zones identifiables à chacun de ces corps. Ainsi, les matériaux constituants ne sont qu'entremêlés laissant voir une interface ou encore une zone de transition.

Par ses nombreuses qualités, le béton se prête à de multiples conceptions. Non seulement il peut être moulé dans des formes les plus diverses, mais il a une excellente résistance à la compression, une grande rigidité, une faible conductivité thermique et électrique, il est également peu combustible et peu toxique.

Deux caractéristiques ont néanmoins limité son utilisation, il est fragile et résiste mal à la traction. Cependant, la récente mise au point de produits composites, renforcés de fibres dans les secteurs de l'aérospatiale et des plastiques, a offert la possibilité de pallier à ces lacunes.

Ce digest décrit les propriétés générales et l'utilisation en construction du béton renforcé de fibres. La promesse d'éléments plus minces, plus résistants, plus légers et moins sujets à la fissuration par la simple addition d'une petite quantité de fibres rend cette innovation très intéressante. Pour ce qui est des matériaux composites, ils sont constitués d'un dort fibreux protégé et supporté par matrice. Ils peuvent supporter de plus grandes contraintes que leurs matériaux constitutifs. Puisque la matrice et les fibres interagissent, redistribuant ainsi les contraintes de la charge externe; on parle alors de synergie. La performance des bétons renforcé dépend des matériaux constituants, de l'orientation, de la longueur, de la forme, du pourcentage et de la composition des fibres, des propriétés mécanique de la matrice, de l'interaction fibre-matrice et de l'utilisation prévue.

### **II.2. Le béton de fibres**

Le béton avec fibre est un béton conventionnel auquel on a ajouté des fibres durant le malaxage. Son nom: la micro-fibre. Les microfibrilles peuvent être utilisées quand on souhaite réduire la fissuration et améliorer la durabilité. Et elles conviennent particulièrement bien aux dalles sur le sol, dalles surélevées, pavages, piscines, trottoirs, béton projet etc... Comme armature secondaire utilisée pour assurer le contrôle de la fissuration, elle constitue une solution idéale lorsqu'elle est combinée au treillis métallique soude ou ferrailage en acier. Le béton de fibre présente de bonnes performances à la flexion, aux sollicitations dynamiques et s'oppose bien à l'apparition

des fissures en les limitant au maximum. Le béton de fibre trouve de plus en plus d'emploi en pratique, notamment dans la réalisation des chaussées bétonnées des routes et de piste d'atterrissage des aéroports, dans les éléments préfabriqués, et dans le renforcement des ouvrages dégradés [24].

Cependant des problèmes d'élaboration subsistent encore et exigent des études poussées. L'emploi d'un tel béton nécessite une recherche rigoureuse de l'influence des paramètres tels que, la longueur, le pourcentage des fibres.... Etc [25].

Les fibres contrôlent le mécanisme de la fissuration. La rupture en traction du béton de fibres d'acier, devient ductile au lieu de fragile. Le mode de renforcement du béton par les fibres, complète les armatures classiques selon l'élément de structure et le type de sollicitation.

La fibre n'est pas recommandée pour remplacer l'armature exigée par les codes et les normes du bâtiment. Les propriétés de cette fibre sont étonnantes. En effet, sa force majeure est sa capacité à diminuer le retrait plastique et les fissures d'environ 40% et plus.

Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres. La matrice considérée est identique à la matrice d'un béton courant, les fibres sont de formes et de dimensions différentes liées aux technologies d'élaboration. Chacune de ces catégories de fibres donne au béton des propriétés spécifiques lesquelles dépendent de la nature, la forme géométrique, l'élancement, et la teneur en volume de fibre.

### **II.3. Historique du béton de fibres**

Une analyse profonde de ce concept nous indique que cette idée est très ancienne et date depuis l'antiquité. En effet les pharaons ont pensé à l'idée des pailles pour renforcer la brique de boue d'après Exode 5:6 comme il est le cas Finlandais utilisant pour la 1ère fois, les fibres d'amiante dans le renforcement des poteries en argile, il y'a de cela 5000 années. D'autres sources ANTOINE, E.N - Mars 1985 et ACI COMMITTEE 554 Mars- Avril 1984 ont indiqué que l'usage de cette technique par le biais de pailles afin de renforcer les briques, tandis que les poils des animaux et les fibres pour renforcer le plâtre et la pâte de ciment. On peut noter aussi la réalisation, au milieu du XX é siècle, d'alliages métalliques avec fibre de carbone.

En 1910, une série d'essais pour améliorer la résistance du béton a été faite par J.PORTER qui a conclu que la présence des fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction. Par la suite 1911, GRAHAM a établi un brevet sur les bétons de fibres. C'était le premier brevet Américain où il a décrit l'emploi des tranches d'acier comme des renforts fibreux dans les matériaux de construction. Un deuxième brevet Américain sur ce sujet a été pris par WEAKLY.

En 1912, qui consiste à l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec l'intermédiaire d'un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton. En 1920, A. KLEINLOGEL a déposé le premier brevet Allemand qui a décrit la synthèse d'ajouter un volume relativement important, de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usinée (par tournage) comme une masse d'acier.

Quelques années après, en 1938, un autre brevet a été établi par N. ZITEVIC en Grande Bretagne. Son procédé consiste à mélanger avec le béton des petits éléments en fer approximativement avec 100 mm de long et 1.00 mm de diamètre. Ces éléments métalliques sont très semblables aux fibres utilisées aujourd'hui pour armer le béton. Il a conclu qu'il y a une amélioration de la résistance du béton à la compression, à la traction et au cisaillement. A partir de 1940, plusieurs procédés sont apparus dans de différents pays.

Ces procédés recommandent en général l'inclusion des fibres d'acier dans le béton pour améliorer sa performance. Mais on note ici que celui de G.CONSTANTINESCO, en 1943 en Angleterre et en 1954 en U.S.A, mérite une attention particulière. A partir des années 1970, il s'est produit une sorte de réveil dans le domaine de la technologie des bétons renforcés de fibres d'acier. La confiance acquise dans certaines propriétés spécifiques des bétons renforcés de fibres d'acier augmente de façon permanente par l'utilisation de ces bétons dans des applications industrielles. Le premier article dans ce concept peut être attribué à LANKARD et SHEETS. Dans cet article, ils ont confirmé que l'ajout de 1% à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance.

#### **II.4. Les fibres**

Les fibres sont définies comme des éléments discontinus, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre et longueur variable. Elles sont réparties dans la matrice soit d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle. Généralement les fibres sont aussi utilisées pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, et la fibre de grande longueur ou filament continu.

Il existe un grand nombre de fibres qui se différencient par leur origine (naturelles, artificielles et synthétiques), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc.), leur dimension (macro ou micro - fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour des applications, il est nécessaire de tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et la mode de performance du composite [26, 23].

### II.4.1. Les différents types de fibres

On retrouve sur le marché plusieurs types de fibres, elles peuvent être classées par familles, un choix approprié du type de fibre à utiliser est essentiel. Chaque type de fibre possède des caractéristiques particulières qui les rendent apte à servir à une utilisation plutôt qu'à une autre. Ainsi l'adoption d'une fibre influencera les facteurs tels que la densité, résistance tension et en compression, résistance aux impacts et à la fatigue, module d'élasticité, conductivités thermique et électrique, stabilité dimensionnelle, résistance aux conditions environnementales et le coût.

Les différentes fibres actuellement disponibles (Tableau II.1) peuvent être classées selon leur origine en :

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

**Tableau II.1:** Propriétés des différents types de fibres [27].

Type de fibre	densité	Diamètre	Résistance à traction (MPa)	Module d'élasticité (MPa)	Déformation à la rupture (%)
Métallique	7,80	100-1000	500-2600	210 000	0,5-3,5
Verre					
E	2,54	8-15	2000-4000	72 000	3,0-4,8
RA	2,70	12-20	1500-3700	80 000	2,5-3,6
Synthétique					
Acrylique	1,18	5-17	200-1000	17 000-19 000	28-50
Aramide	1,44	10-12	2000-3100	62 000-120 000	2-3,5
Carbone	1,90	8-0	1800-2600	230 000-380 000	0,5-1,5
Nylon	1,14	23	1000	5 200	20
Polyester	1,38	10-80	280-1200	10 000-18 000	10-50
Polyéthylène	0,96	25-1000	80-600	5 000	12-100
Polypropylène	0,90	20-200	450-700	3 500-5 200	6-15
Naturelle					
Cellulose	1,50	25-125	350-2000	10 000-40 000	
Sisal			280-600	13 000-25 000	3,5
Noix de coco	1,12-1,15	100-400	120-200	19 000-25 000	10-25
Bambou	1,50	40-400	350-500	33 000-40 000	
Jule	1,02-1,04	100-200	250-350	25 000-32 000	1,5-1,9
Herbe d'éléphant		425	180	4 900	3,6

### II.4.1.1. 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 fibres de faible diamètre, le verre perd ce caractère, acquière de bonnes caractéristiques mécaniques, et sont utilisées pour fabriquer des éléments de faibles épaisseurs, avec des matrices de pâte ou mortier ou de micro béton.

Les fibres de verre (Figure II.1) sont, grâce à leurs qualités mécaniques et leur rigidité, des renforts très efficaces, mais elles sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment (protection ou imprégnation nécessaire). Elles se caractérisent par la résistance à la traction de 3000 MPa. Leur excellente résistance au feu (jusqu'à 800 C) ajoutée a un coefficient de dilatation du même ordre que celui de la pâte de ciment confère aux bétons de fibres de verre une bonne résistance au feu.



**Figure II.1** Fibres de verre.

Sur chantier les mortiers de fibres de verre s'utilisent pour les enduits extérieurs monocouches ainsi que pour certains procédés d'isolation thermique. En préfabrication les domaines d'application sont très vastes tels que les panneaux de façade minces de 10 à 15 mm d'épaisseur ou panneaux sandwich à isolant incorporé, éléments de bardage et éléments décoratifs, mobilier urbain, éléments divers (coffrets, coffrages, habillages), produit d'assainissements (tuyaux, caniveaux). Les fibres de verre possèdent des avantages et inconvénients.

➤ **Les avantages sont nombreux**

Coût faible, Grande résistance en tension, Grande résistance aux produits chimiques, Excellent isolant, Grande ténacité, Excellente résistance aux impacts, Module d'élasticité faible (réduit perte de précontrainte), Bonne fiabilité.

➤ **Les inconvénients sont**

Densité élevée (par rapport aux autres fibres), Sensibilité à l'abrasion, Faible module d'élasticité (grande déformation), Faible résistance à la fatigue, Grande dureté (usure des instruments de fabrication), Faible résistance aux charges cycliques ; Corrosion possible aux alcalis et aux acides hydrofluoriques, Vieillissement à l'humidité.

#### **II.4.1.2. Les fibres de polypropylène**

Les polypropylènes (Figure II.2), sont des produits d'origine pétrolière, ce matériau de synthèse a connu une extension croissante dans l'industrie de textile où ils apportent des avantages tels que la disponibilité à prix relativement faible, la résistance aux attaques en milieux alcalins et corrosifs, l'augmentation notable de la résistance de la résistance aux chocs ainsi que la limite de l'ouverture des fissures. Ces fibres sont fréquemment utilisées dans le bâtiment, en particulier dans la réalisation des panneaux décoratifs, revêtement de façades, de tuyaux et pieux [28].



**Figure II.2.** Les fibres polypropylène.

Si leurs caractéristiques mécaniques ont des valeurs plus faibles que celles des fibres métalliques, il faut cependant mentionner leur insensibilité chimique, leur souplesse, qui rend aisée leur incorporation au béton et leur allongement à la rupture (15 à 20 %), qui favorise la « ductilité » du béton.

Comme la plupart des matières plastiques, les fibres de polypropylène sont peu résistantes au feu: leur température de fusion est d'environ 160 C mais leur fusion n'affecte pas la résistance du béton.

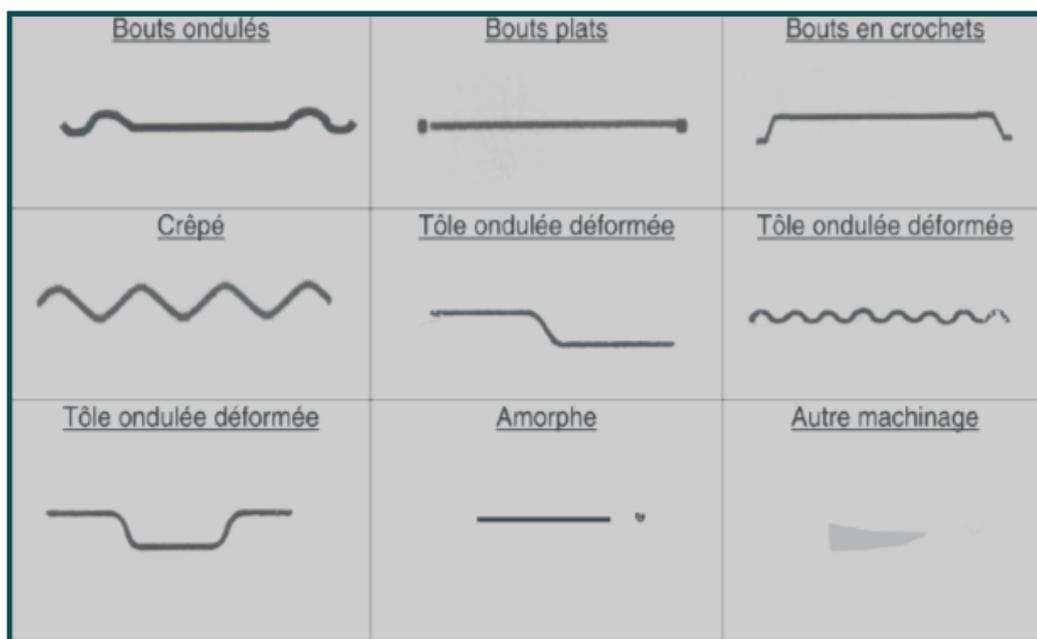
La fabrication du béton avec fibres de polypropylène ne soulève aucune difficulté, la répartition des fibres se faisant facilement et ne nécessitant pas de précaution particulière lors de malaxage [29].

Les fibres de polypropylène améliorent la maniabilité du béton et sa cohésion. Ces propriétés sont intéressantes pour les pièces à démoulage immédiat (bordures, tuyaux) en même temps qu'elles améliorent l'aspect et la précision des angles, des tranches ou arêtes des pièces moulées ou des dallages.

Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration due au « premier retrait » ainsi que leur résistance aux chocs. Les dosages couramment pratiques sont de l'ordre de 0.05 à 0.2 en volume (0.5 à 2 Kg de fibres par m<sup>3</sup> de béton).

#### II.4.1.3. Les fibres métalliques

Les fibres métalliques sont de types et de formes variées et présentent une très bonne compatibilité avec le béton. 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 augmentant son pouvoir de résister aux déformations dues à la rupture, de même donne une ténacité appréciable, leurs formes et leurs dimensions améliorent leur ancrage et leur adhérence (fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités, en tête de clou) (Figure II.3).



**Figure II.3.** Fibres métalliques.

➤ **Applications des fibres métalliques**

Du fait de leurs propriétés, les fibres trouvent un vaste domaine d'applications là où on veut réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, augmenter la résistance aux chocs et tirer parti de l'amélioration de la résistance en traction pour diminuer le dimensionnement des pièces : dallages, parkings, pistes, bétons projetés en galeries, tunnels, talus, éléments préfabriqués divers : tuyaux, caniveaux, garages, pieux de fondation

➤ **Les bétons de fibres métalliques**

Le mélange des fibres métalliques au béton doit être particulièrement soigné, certaines fibres ayant tendance à s'agglomérer, l'incorporation des fibres peut être faite soit au malaxage, soit au moment du coulage soit à la projection.

La composition du béton doit être mise au point en fonction des caractéristiques de la fibre et des emplois. L'emploi de superplastifiant est en particulier recommandé pour compenser la diminution d'ouvrabilité provoquée par l'incorporation de fibres. La mise en œuvre et le compactage doivent être étudiés pour le béton considéré et en fonction de sa maniabilité qui diffère généralement de celle des bétons classiques sans fibres. Les dosages en fibres sont de l'ordre de 0.3 à 2% en volume, soit 25 à 160 Kg/m<sup>3</sup>.

➤ **Propriétés mécaniques des fibres métalliques**

Les fibres ont une influence importante sur le comportement mécanique du béton fibreux, leur incorporation peut augmenter les résistances, en traction, en flexion et particulièrement au cisaillement en résistant aux efforts de traction. De plus, elles offrent plus de ductilité et de ténacité [28].

## **II.5. Rôles des fibres dans le béton**

Lorsque les charges appliquées au béton s'approchent de la charge de rupture, les fissures se propagent, parfois rapidement. Les fibres noyées dans le béton permettent d'arrêter le développement de la fissuration. Les barres d'armature en acier jouent un rôle analogue, car elles agissent comme des fibres de grande longueur. Les fibres courtes et discontinues ont cependant l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton de façon uniforme. Les fibres sont ajoutées à la gâchée de béton, qui contient habituellement du ciment, de l'eau et des granulats fins et grossiers.

## **II.6. Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres**

Si le module d'élasticité de la fibre est élevé par rapport au module d'élasticité du béton, les fibres reprennent une part des charges, augmentant ainsi la résistance à la traction du matériau.

L'augmentation du rapport longueur/diamètre des fibres accroît habituellement la résistance à la flexion et la ténacité du béton. Les valeurs de ce rapport sont généralement comprises entre 100 et 200, car des fibres de trop grande longueur ont tendance à former des boules dans le mélange, créant ainsi des problèmes d'ouvrabilité.

En général, les fibres réduisent le fluage, c'est-à-dire la déformation du béton avec le temps sous une contrainte constante. Par exemple, le fluage en traction d'un béton renforcé de fibres d'acier peut représenter seulement 50 à 60 % de celui d'un béton ordinaire et le fluage en compression, 10 à 20%.

Le retrait du béton, qui est provoqué par la perte de l'eau pendant le séchage, est en partie empêché par les fibres. Le retrait du béton peut être diminué de 35 % ou moins si l'on ajoute 1,5 % de fibres par volume.

### **II.7. Critères de choix des types de fibres**

La nature, la forme, et les propriétés chimiques, physiques, et mécaniques des fibres choisies dépend de :

La qualité qui confère à la matrice cimentaire la compatibilité avec les composantes de la matrice « ciment-granulats » ou une bonne adhérence avec la matrice cimentaire. Aussi, la conservation de leurs propriétés dans le temps.

Les fibres en amiante utilisées avec le ciment ont prouvé la bonne tenue et la durabilité du composite dans le temps ;

Par contre les fibres de verre, leur performance mécanique chute par la réaction de ciment sur le verre (effet des alcalins). Malgré que ce problème est solutionné en partie par une mise au point d'un verre à haute teneur en zirconium, l'utilisation des fibres de verre est toujours limitée au mortier de ciment non taloché.

Les fibres de nylon et polypropylène sont instables devant l'action des rayons ultraviolets ils doivent être protégés.

La technologie du béton armé a montré que l'acier a une très bonne compatibilité avec le béton : Protection par le ciment, bonne adhérence, coefficient de dilatation est presque le même, grande résistance.

Par leurs propriétés et qualités, les fibres métalliques sont les plus adaptables et les plus utilisées avec la matrice de béton [30].

## II.8. Domaines d'application

La recherche et le développement ont permis d'appliquer un concept de renforcement structural à différents types d'ouvrages en béton. De par leurs propriétés, les fibres trouvent un vaste domaine d'applications où il faut réduire les risques de fissuration, augmenter la résistance aux impacts et tirer parti de l'amélioration de la performance du béton pour optimiser le dimensionnement des ouvrages.

Le béton fibré est utilisable dans tous les domaines du génie civil, aussi bien dans les constructions industrielles, commerciales et institutionnelles que résidentielles. (Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton)

Parmi ces domaines on cite :

- ✓ Bâtiment
- ✓ Travaux publics
- ✓ Génie-civil autre que le bâtiment et travaux publics

### ➤ **Domaine du bâtiment**

Les utilisations actuelles des bétons de fibres métalliques dans le domaine du bâtiment concernent, principalement les dallages industriels en béton de fibres métalliques ; Paraît plus intéressant que le dallage non armé, car l'ajout de fibres permet de diminuer l'épaisseur et le nombre de joints du dallage.

### ➤ **Domaine des travaux publics**

Les surfacages des chaussées et des pistes aéroportuaires en béton Les revêtements définitifs de tunnel en béton de fibres métalliques, les parois clouées, les dalles de pont mixte, le renforcement des buses métalliques corrodées

### ➤ **Génie-civil**

Une application mise en œuvre in situ, pourrait être intéressante, de développer dans les années avenir : Il s'agit des aéro-réfrigérants de centrale nucléaire.

L'utilisation des bétons de fibres métalliques dans les tuyaux d'assainissement, repose sur les raisons suivantes :

- ✓ Rapidité de fabrication, diminuer l'épaisseur des tuyaux, éviter les investissements importants :
- ✓ En dehors du génie-civil :

Les fosses toutes eaux des bétons à ultra-hautes performances fibrés [28].

## II.9. Quantité de fibres à incorporer au béton

La norme CSA A23.1 recommande d'utiliser des quantités de fibres dans le béton qui varient selon le type de fibres et selon l'application et les recommandations faites par les ingénieurs et les manufacturiers de fibres. La norme CSA introduit l'essai A23.2-16C permettant de déterminer la masse de fibres métalliques par volume de béton.

### ➤ Microfibres synthétiques

Les quantités normatives spécifiées sont de 0,6 à 0,9 kg/m<sup>3</sup>. En pratique, selon les types de fibres, les quantités peuvent varier de 0,3 à 1,8 kg/m<sup>3</sup>. L'utilisation de quantités supérieures à 0,9 kg/m<sup>3</sup> peut entraîner des problèmes en ce qui concerne la maniabilité du béton, en raison de la surface spécifique élevée de ce type de fibre qui provoque la formation « d'oursins ».

### ➤ Macrofibres synthétiques

Les quantités normatives spécifiées sont de 2 à 9 kg/m<sup>3</sup>. En pratique, selon les types de fibres, les quantités peuvent varier de 1,8 à 11 kg/m<sup>3</sup>. Contrairement aux microfibres, il est possible d'utiliser des quantités élevées de macrofibres grâce à leur surface spécifique plus faible.

### ➤ Fibres métalliques

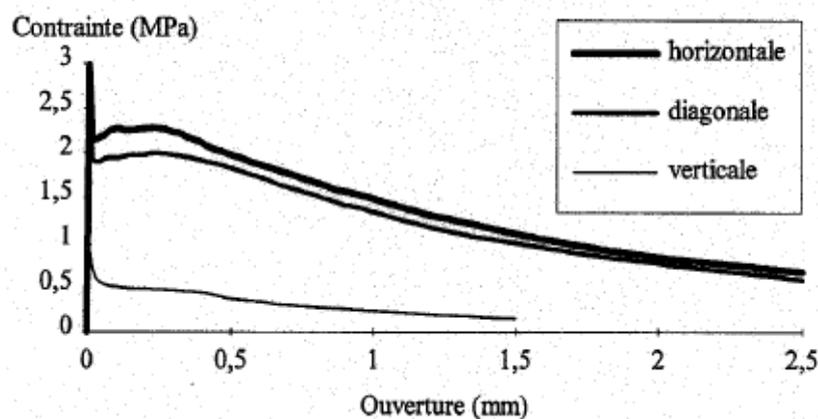
Les quantités normatives spécifiées pour l'insertion sont entre 15 et 45 kg/m<sup>3</sup>. En pratique, selon les types de fibres, les quantités peuvent varier de 15 à 60 kg/m<sup>3</sup> pour des bétons réguliers nécessitant de légers ajustements au niveau de la formulation. Lorsque des concentrations supérieures à 35 kg/m<sup>3</sup> sont utilisées, des ajustements plus importants sont nécessaires, toujours selon le type de fibres et la concentration utilisés. Les fibres sont à ce moment considérées comme des granulats et un ajustement de la quantité de liants et de granulats intermédiaires (10-14 mm) est nécessaire. Pour tous types de fibres, il est nécessaire de s'assurer d'une bonne dispersion des fibres dans le béton afin d'éviter la formation « d'oursins ».

- ✓ Pour les fibres métalliques, une quantité de 78 kg/m<sup>3</sup> équivaut approximativement à 1 % par volume.
- ✓ Pour les fibres synthétiques, une quantité de 9 kg/m<sup>3</sup> équivaut approximativement à 1 % par Volume [31].

## II.10. Influence de l'orientation préférentielle des fibres

On parle d'orientation préférentielle des fibres lorsque qu'une quantité de fibres est orientée dans une même direction. Cet effet est généralement dû à la mise en place du béton dans son moule, les fibres s'orientant parallèlement à l'axe d'écoulement. De même, la vibration du béton peut

aussi conduire à de la ségrégation et à une orientation préférentielle des fibres en fonction des axes de vibration qui, sous l'effet de leur poids propre, vont avoir tendance à descendre dans le fond du moule. L'utilisation de l'aiguille vibrante, en plus d'orienter les fibres, peut conduire à des effets de cheminée. Lorsque l'on retire l'aiguille, le béton s'écoule afin de se remettre en place mais les fibres ne suivent pas. Ceci crée des zones sans fibres dans le béton. Plusieurs études ont été effectuées afin de montrer l'influence de l'orientation préférentielle des fibres sur le comportement mécanique des bétons, après avoir coulé un bloc de béton en orientant les fibres verticalement, on carotte ce bloc dans trois directions. Ensuite on effectue des essais de flexion 3 points et ainsi on caractérise l'influence de l'orientation des fibres. Les résultats obtenus sont présentés sur la (Figure II.4) [32].



**Figure II.4.** Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion.

Lorsque les fibres sont orientées perpendiculairement à l'axe de la fissure (cas de l'orientation horizontale), les fibres jouent leur rôle de couture de la fissure et permettent d'obtenir des résistances résiduelles importantes pour de grandes ouvertures de fissures. A l'inverse, lorsqu'elles sont orientées parallèlement à l'axe de la fissure, il n'y a pas, ou peu de fibres pour couder la fissure, on retrouve donc un comportement post fissuration semblable à celui d'un béton sans renfort de fibres. Le cas des fibres orientées en diagonales montrent que celles-ci cousent aussi la fissure et permettent d'avoir un comportement post fissuration intéressant mais un peu moins important que celui des fibres orientées de façon optimale [33].

### **II.11. Les bétons de fibres**

Le béton de fibre est un mélange homogène d'une matrice minérale (mortier ou béton) et d'éléments de renfort discontinu présenté ici sous forme de fibre. L'incorporation de ces renforts se fait par l'inclusion directe de fibre isolée au moment gâchage (béton de fibre) ou de la projection (cas de béton de fibre projeté). Il peut aussi contenir de la pouzzolane ou autre adjuvant généralement utilisée avec le béton ordinaire. Le béton de fibre est un béton conventionnel au auquel on a ajouté des longueurs discontinues de fibre durant la préparation du mélange. Dans la littérature, le béton de fibre n'est pas considéré comme un substitut aux bétons ordinaires, mais comme un matériau de type nouveau. Il est considéré dans le domaine des matériaux de construction comme un béton spéciale.

### **II.12. Avantages du béton fibré**

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

Aspect technique: L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé [31].

Les principaux avantages techniques sont :

- ✓ un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton,
- ✓ une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post fissuration, (résistance résiduelle),
- ✓ une énergie d'absorption élevée,
- ✓ une résistance aux impacts élevée,
- ✓ une résistance à la fatigue élevée,
- ✓ une augmentation de la résistance en cisaillement.

### **II.13. Les bétons autoplaçants fibrés**

Les améliorations appréciables obtenues au niveau du comportement mécanique des bétons, malgré tout l'incorporation des fibres dans le béton restent problématiques du point de vue de l'ouvrabilité et de la répartition homogène des fibres. Pour remédier à ces problèmes, l'association des fibres avec le béton autoplaçant (BAP) paraît prometteuse. En effet, ce béton de dernière génération se caractérise par une excellente maniabilité qui 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 de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élanement. Ces propriétés ont été mises en évidence par différents essais à l'état frais, par exemple l'essai d'étalement qui permet d'évaluer notamment le risque de blocage pour bien déterminer l'effet des fibres, cet essai a également été effectué avec un béton autoplaçant de référence [34].

#### **II.14. 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 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 le comportement du béton à l'état frais ont été variés dans plusieurs études expérimentales pour trouver leur effet sur les caractéristiques principales du BAP [34].

Les principes de la base de la conception de mélange BAPF c'est d'augmenter la teneur en pâte, le dosage du super plastifiant et le contenu de granulats fins à la longueur et au volume croissants de fibre.

#### **II.15. Effet des fibres sur la maniabilité et la résistance du BAP**

##### **II.15.1. Effet sur la maniabilité**

Dès son apparition, c'est peut-être la maniabilité des BAP qui attire l'attention. Cette propriété qui assure la fabrication et la mise en œuvre des ouvrages peut aboutir toujours à une finition de qualité acceptable.

L'incorporation des fibres que ce soit de polypropylènes ou métalliques, peut apporter quelques modifications sur les comportements rhéologiques ou mécaniques des BAP.

(Y .ROUSSEL) a montré que l'apport en fibres diminue la précision de l'indice d'ouvrabilité qu'apporte l'essai d'étalement, et la maniabilité semble devenir moins bonne lorsque le volume de fibres dépasse le 1% du volume de mélange.

Il est remarqué aussi une ovalisation de la galette pour les compositions renforcées de fibres métalliques ayant une grande surface spécifique (ex : 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 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.

GRUNEWALD et WALRAVEN (2001) ont constaté que lorsqu'on augmente le dosage en fibres, la porosité interne du squelette granulaire est plus importante et donc la viscosité plastique est plus élevée. C'est une conséquence du frottement dit « solide » qui favorise la résistance à l'écoulement. Jusqu'à une concentration de fibres métalliques de 1%, la viscosité plastique accroît avec une pente très faible. Au-delà de cette valeur, cette dernière devient nettement plus grande et l'écoulement du béton frais est quasi nul justifiant ainsi la consistance élevée du milieu. De plus, à taux de fibre donné, cette viscosité est plus importante lorsque les fibres sont longues [35].

L'orientation et la distribution des fibres affectent aussi les performances et les caractéristiques des BAP fibrés à l'état durci. En effet, la majorité des fibres sont orientées dans le sens de l'écoulement ; cet effet est plus prononcé pour des fibres de plus grande longueur [36].

D'autres chercheurs ont montré que l'association des fibres synthétiques et des fibres métalliques peut donner aux BAP des comportements plus ductiles que dans le cas des bétons fibrés seulement avec des fibres métalliques. HOCINE OUCEIF ET COLL, 2006 ont montré aussi, que pour une même composition de béton, une teneur de 0.5% de fibres courtes (métalliques) a la même efficacité que l'utilisation de plus de 1% de fibres plus longues (synthétiques). Ils ajoutent également, que pour un BAP bi fibré de différentes dimensions et propriétés (fibres métalliques de fonte amorphe adhérente de 20mm et 30mm, et fibres synthétiques glissantes de 40mm et 50mm), ils ont pu formuler des BAP répondants aux critères rhéologiques fixés [36].

### **II.15.2. Effet sur la résistance**

Les fibres ont habituellement un faible effet sur la résistance à la compression. Leur effet le plus significatif a trait au comportement en flexion (traction), ainsi dans plusieurs applications, les bétons renforcés de fibres sont utilisés dans des endroits où ils sont soumis à de tels efforts.

Les fibres métalliques utilisées essentiellement en dallages industriels, dallages de parking, les pistes, les pieux, les déversoirs de barrage, les silos [G.DREUX ET J.FESTA en 1996], présentent une bonne résistance à la traction et à la flexion, une augmentation de la ductilité et une réduction du nombre de joints de retrait.

Egalement, les fibres polypropylènes n'assurent pas un renforcement structural du béton, elles s'opposent aux effets du retrait plastique et peuvent se substituer pour cette fonction au treillis anti fissuration (SIKAFIBRES ANTIFISSURES).

### **II.16. Les fines et leur rôle dans les bétons autoplaçants**

Pour les BAP, des ajouts cimentaires sont habituellement utilisés en remplaçant une fraction de la quantité de ciment pour améliorer principalement la rhéologie et la stabilité. De plus, l'utilisation d'ajouts cimentaires comporte des avantages non négligeables comme une baisse de la chaleur d'hydratation et une baisse du cout global du béton.

Pour les BAPF, le ciment est généralement un ciment portland ou de haut fourneau. A celui-ci sont mélangés soit des cendres volantes, soit du filler calcaire. Le choix des additions et de leur teneur respective doit se faire en fonction des exigences de résistance à la compression et de durabilité telles qu'imposées par les normes.

Pour les fumées de silice, en présence d'un super plastifiant est utilisé en petite quantité pour des bétons ayant un faible E/C, les fumées de silice peuvent augmenter quelque la quantité d'eau libre le mélange de béton et accroître sensiblement la maniabilité.

Du plus ; les fumées de silice augmentent la cohésion du béton et diminuent donc le ressuage et la ségrégation. L'utilisation de fumées de silice à un dosage inférieur à 10% de la quantité du ciment, permet d'obtenir des bétons plus denses et plus imperméables (elles réduisent les dimensions des plus gros pores), donc plus durables.

Cependant, était donné que le risque de retrait plastique est très élevé pour ce type de béton, la cure du béton doit être bien effectuée.

# CHAPITRE III

---

## CARACTERISATION DES MATERIAUX

## CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux

### III.1. Introduction

Ce chapitre résume la caractérisation des matériaux utilisés dans notre travail, les différents essais d'ouvrabilité et physico-mécaniques réalisés sur les matériaux utilisés pour l'élaboration des bétons autoplaçants renforcés de fibres. Des fibres métalliques, de la fumée de silice et des fines d'une roche volcanique de la région de Tlemcen sont utilisées comme fillers). Par ailleurs, des essais réalisés sur les bétons à l'état frais (essai d'étalement au cône, à la boîte en L et de stabilité au tamis) et à l'état durci tel que les propriétés mécaniques (Résistance à la compression résistance à la flexion).

### III.2. caractéristiques des matériaux utilisés

#### III.2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans ce travail, est un ciment composé de type CEM II. Le ciment GICA CPJ-CEM II/A 42.5 provient de la cimenterie de MEFTAH dont les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques ainsi que la composition minéralogique sont données dans le tableau III.1 et le tableau III.2, 3, 4.

**Tableau III.1.** Caractéristique physique du ciment.

Caractéristiques	Résultats	Unité
Consistance normale	26,4	( % )
Début de prise	115	(min)
Fin de prise	250	(min)
SSB	3800	(cm <sup>2</sup> /g)
Masse spécifique	3.01	(g/cm <sup>3</sup> )

**Tableau III.2.** Résistance à la compression et flexion du ciment.

Echéances en jours	Flexion (MPa)	Compression (MPa)
07 jours	6.8	33.7
28 jours	8.3	43.2

**Tableau III.3.** Composition chimique du ciment.

Oxydes	Teneur (%)
SiO <sub>2</sub>	16.45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.94
CaO	62.49
MgO	1.15
K <sub>2</sub> O	0.65
Na <sub>2</sub> O	0.22
SO <sub>3</sub>	2.28
CaO libre	1.044
Cl <sup>-</sup>	0.011
Ins.	1.71
P.F	8.580

**Tableau III.4.** Composition minéralogique du ciment.

Phase	Constituants minéraux du Clinker	Teneur rapportée au Clinker (%)
Clinker	C <sub>3</sub> S	57
	C <sub>2</sub> A	19
	C <sub>3</sub> A	08
	C <sub>4</sub> AF	10
	CaO <sub>L</sub>	01
Régulateur de prise	Gypse	05
Ajouts	Calcaire	16

### III.2.2. Les graviers

Les graviers utilisés dans cette étude sont :

- ✓ Les graviers 3/8 de SETIF
- ✓ Le gravier 8/15 de CHELGHOUM wilaya de MILA.

**III.2.2.1. Caractéristiques du gravier 8/15****Tableau III.5.**Caractéristiques physiques du gravier 8/15.

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2.7	g/cm <sup>3</sup>
Teneur en eau	0.10	(%)
Los Angelos	26	(%)
Micro-deval	16	(%)
Absorption	0.14	(%)
Porosité	0.37	(%)

**Tableau III.6.** Analyse granulométrique du gravier 8/15 selon la Norme (NF EN 933-1).

Echantillon : GRAVIER 8/15			
Masse sèche totale : $M_1=2997g$		Masse sèche des fines retirées par lavage	
Masse sèche après lavage : $M_2=2972g$		$M_1-M_2=25g$	
Tamis ouverture (mm)	Masse des tamis cumulés $R_i$ (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
14	00	0.0	100.0
12.5	410	13.7	86.3
10	1316	43.9	56.1
8	2360	78.7	21.3
6.3	2864	95.6	4.4
5	2952	98.5	1.5
4	2964	98.9	1.1
3.15	2968	99.0	1.0
0.063	2972	99.2	0.8
Fond de tamis	2972	99.2	0.8

**III.2.2.2 Caractéristiques du gravier 3/8**

Les caractéristiques physiques du gravier sont données dans le tableau III.7.

**Tableau III.7.**caractéristiques physiques du gravier 3/8.

Caractérisation	Résultats	Unité
Masse volumique	2.6	g/cm <sup>3</sup>
Teneur en eau	0.6	(%)
Los Angelos	27	(%)
Micro-deval	17	(%)
Absorption	1.02	(%)
Porosité	2.7	(%)

L'analyse granulométrique du gravier est résumée dans le tableau III.8.

**Tableau III.8.**Analyse granulométrique de gravier 3/8 selon la Norme (NF EN 933-1).

Echantillon : GRAVIER 3/8			
Masse sèche totale : $M_1 = 1989g$		Masse sèche des fines retirées par lavage :	
Masse sèche après lavage : $M_2 = 1956g$		$M_1 - M_2 = 33g$	
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés $R_i$ (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisât Cumulés (%)
10	00	00	100
8	18	0.9	99.1
6.3	275	13.8	86.2
5	752	37.8	62.2
4	1241	62.4	37.6
3.15	1496	75.2	24.8
2.5	1813	91.2	8.8
2	1879	94.5	5.5
1.25	1931	97.1	2.9
1	1939	97.5	2.5
0.063	1956	98.3	1.7
Fond tamis	1956	98.3	1.7

**III.2.3. Sable**

Les sables utilisés sont le sable roulé de BAGHLIA et le sable fin de BOUSSADA. Après traitement des sables, des résultats des essais physiques et d'analyse granulométrique sont obtenus

**III.2.3.1. Caractéristiques du sable fin de BOUSSAADA****Tableau III.9.**Caractéristiques physiques de sable fin BOUSSAADA.

Caractéristique	Résultats	Unité
Masse volumique	2.6	g/cm <sup>3</sup>
Teneur en eau	1.4	(%)
Teneur en bleu	1.6	(%)
ESV	60.1	(%)
ESP	53.7	(%)
Porosité	2.87	(%)
Absorption	2.1	(%)

**Tableau III.10.** Analyse granulométrique du sable fin de BOUSSAADA selon la Norme (NF EN 933-1).

Echantillon : sable fin			
Masse sèche totale : $M_1 = 592\text{g}$		Masse sèche des fines retirées par lavage	
Masse sèche après lavage : $M_2 = 588\text{g}$		$M_1 - M_2 = 4\text{g}$	
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (%)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisât cumulés (%)
1	00	00	100
0.63	1	0.2	99.8
0.5	2	0.3	99.7
0.315	14	2.4	97.6
0.25	38	6.4	93.6
0.125	568	95.9	4.1
0.08	587	99.2	0.8
0.063	588	99.3	0.7
Fond de tamis	588	99.3	0.7
Module de finesse de sable (Mf) :		Mf = 1.03	

## III.2.3.2. Caractéristiques du sable grossier de BAGHLIA.

Tableau III.11. Caractéristiques physiques du sable grossier.

Caractéristique	Résultats	Unité
Masse volumique	2.6	(g /cm <sup>3</sup> )
Teneur en eau	4.7	(%)
Teneur en bleu	1.7	(%)
ESV	68.9	(%)
ESP	65.2	(%)
Porosité	3.2	(%)
Absorption	1.21	(%)

Tableau III.12. Analyse granulométrique du sable grossier de BAGHLIA.

Echantillon : Sable grossier			
Masse sèche totale : $M_1 = 573\text{g}$ Masse sèche après lavage : $M_2 = 552\text{g}$		Masse des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 = 21\text{g}$	
Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés $R_i$ (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisât cumulés (%)
6.3	00	00	100
5	40	7	93
4	78	13.6	86.4
3.15	115	20.1	79.9
2.5	171	29.8	70.2
2	211	36.8	63.2
1.25	306	53.4	46.6
1	339	59.2	40.8
0.63	423	73.8	26.2
0.5	461	80.5	19.5
0.315	510	89	11
0.25	524	91.4	8.6
0.125	547	95.5	4.5
0.08	551	96.2	3.8
0.063	552	96.3	3.7
Fond de tamis	552	96.3	3.7
Module de finesse ( $M_f$ )		$M_f = 3.77$	

Le module de finesse :  $Mf = \frac{\sum \text{Refus Cumulés en \% des tamis } \{4-2-1-0.50-0.250-0.125\}}{100}$

Le sable grossier de BAGHLIA a un module de finesse élevé (3.7), donc une correction est nécessaire par le sable fin de BOUSSAADA qui a un module de finesse très petit (1.03), pour cela la correction est faite selon la méthode d'ABRAMS.

La correction du sable : le module de finesse désiré est  $Mf_d = 2.50$ . ( $Mf_1 = 1.03$  et  $Mf_2 = 3.77$ )

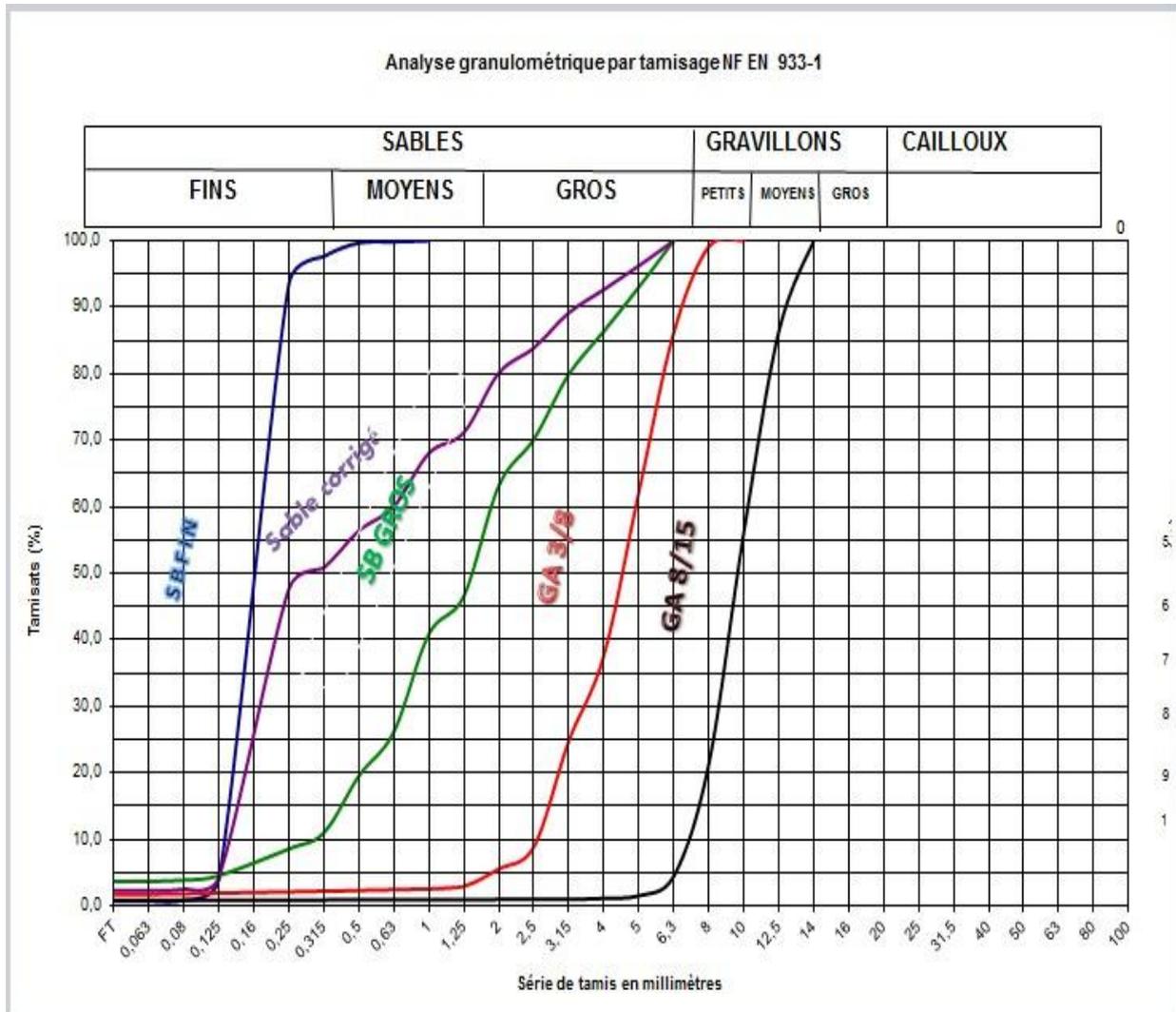
$$S_1: \text{Sable de BAGHLIA} \quad S_1 = \frac{Mfd - Mf_1}{Mf_1 - Mf_2} * 100 \longrightarrow S_1 = \frac{2.5 - 1.03}{3.77 - 1.03} * 100 = 54\%$$

$$S_2: \text{Sable de BOUSSAADA} \quad S_2 = \frac{Mf_1 - Mfd}{Mf_1 - Mf_2} * 100 \longrightarrow S_2 = \frac{3.77 - 2.5}{3.77 - 1.03} * 100 = 46\%$$

**Tableau III.13.** Analyse granulométrique du sable corrigé selon la Norme (NF NE 933-1).

Echantillon : Sable corrigé			
Masse sèche totale $M_1 = 1000g$		Masse sèche des fines retirées après lavage	
Masse sèche après lavage $M_2 = 969g$		$M_1 - M_2 = 31g$	
Tamais ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisât cumulés (%)
6.3	00	00	100
5	38	3.8	96.2
4	74	7.4	92.6
3.15	108	10.8	89.2
2.5	161	16.1	83.9
2	199	19.9	80.1
1.25	288	28.8	71.2
1	319	31.9	68.1
0.63	399	39.9	60.1
0.5	436	43.6	56.4
0.315	492	49.2	50.8
0.25	523	52.3	47.7
0.125	957	95.7	4.3
0.08	975	97.5	2.5
0.063	977	97.7	2.3
Fon tamais	977	97.7	2.3
Module de finasse (Mf)		Mf = 2.54	

Les résultats obtenus montrent que le sable corrigé répond aux exigences de la norme et il peut utiliser dans les bétons.



**Figure III.1.** Courbe d'analyse granulométrique par tamisage.

### III.2.4. L'eau de gâchage

Pour les essais sur les bétons l'eau utilisée est l'eau potable du réseau publique de ville de la BOUMERDES.

### III.2.5. L'adjuvant

L'adjuvant utilisé dans ce travail est un superplastifiant est de type SIKA VISCOCRET TEMPO 12, réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré. Il est conçu à base de polycarboxylate modifiés qui améliore considérablement les propriétés des bétons.

Les caractéristiques techniques du superplastifiant sont données dans le tableau III.14.

**Tableau III.14.** Caractéristique de l'adjuvant.

Forme	Liquide
Couleur	Jaunâtre
Densité	1.065±0.015
Teneur en chlore	≤1 %
PH	6±1
Extrait sec	30.2±1.3 %

Grâce à ses propriétés, le SIKA TEMPO 12 permet :

- Sur un béton frais :
  - ✓ Amélioration de l'ouvrabilité.
  - ✓ Diminution de la ségrégation.
  - ✓ Facilité la mise en œuvre de béton.
  - ✓ Amélioré la stabilité de béton.
  - ✓ Diminution de la teneur en eau.
- Sur un béton durci :
  - ✓ Amélioration des résistances mécanique à court et langue terme.
  - ✓ Diminution de la porosité.
  - ✓ D'augmenter la durabilité.
  - ✓ Amélioration de compacité.

Le SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication des bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longue distance et pompés.

Dans les bétons autoplaçants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 amélioré la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants. La plage d'utilisation recommandée est de 0.2 à 3 % du poids du ciment ou du liant selon la fluidité et les performances recherchées.

Le SIKA TEMPO 12 est soit ajouté en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

Il doit être stocké dans un locale fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 C°. Le SIKA TEMPO 12 peut geler, mais une fois dégelé lentement et ré-homogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, il faut vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé. De plus il se conserve pendant une année en emballage intact, à l'abri du gel et de la chaleur ( $5\text{ C}^\circ < T < 30\text{ C}^\circ$ ).

### III.2.6. Les fibres

Deux types de fibres métalliques sont utilisées, elles sont fabriquées à partir de fil d'acier non allié tréfilage et au laminage à froid.

#### III.2.6.1. Fibres métalliques I

- ✓ Elles sont fabriquées à partir de fil d'acier tréfilé.
- ✓ Elles sont ondulées en plaquette pour assurer une bonne répartition dans le béton (Figure III.2).



**Figure III.2.** Fibres métalliques ondulées (50mm).

#### Domaine d'application

- ✓ Béton de dallage industrie.
- ✓ Dalles de compression pour planchers à poutrelles.
- ✓ Béton autoplaçant.
- ✓ Béton préfabriqués.
- ✓ Fondation superficielles par semelles filantes.

- ✓ Dalle sur terre-plein.

**Tableau III.15.** Caractéristiques techniques des fibres métalliques I.

Caractéristiques	Résultats
Nature	Fil d'acier tréfilé sans revêtement
Langueur	50mm
Diamètre	6.2mm
Elancement	81
Nombre de fibre	8168 fibres /kg
Résistance en traction	1100 Mpa (sur fil)
Longueur réseau	4084 m pour 10Kg/m <sup>3</sup> de fibres
Résistance	Les caractéristiques de résistance équivalente en flexion, au cisaillement et en traction axiale du béton du dosage de fibres et de la classe de résistance de béton
Conservation	Protéger les palettes de la pluie

### III.2.6.2. Fibre métallique II

- ✓ Elles sont fabriquées à partir de fil d'acier tréfilé de forme crochées.



**Figure III.3.** Fibres métalliques crochées.

Les caractéristiques des fibres crochées sont montrées sur la figure III.16

**Tableau III.16.** Caractéristiques des fibres crochées.

Caractéristiques	Type de fibre
Longueur	30 mm±3mm
Diamètre	0.375 mm±0.02mm
L des extrémités des crochets	$1 \text{ mm} \leq L \leq 3 \text{ mm}$
Amplitude de crochet	$h \geq 0,75 \text{ mm}$
Angle du crochet	$\alpha \geq 20^\circ$
R à la traction	$R_m > 1\,050 \text{ N/mm}^2$
Type d'ancrage	Fibre avec 2 crochets
Conditionnement	Fibres encollées en plaquette
Facteur d'élanement	$80=L/d=30/0.75$

### III.2.7. Les filler calcaires

Le calcaire utilisé provient du gisement de roche calcaire de la carrière d'AIN TOUILA de la wilaya de Khenchla. Les fillers calcaires sont obtenus par broyage poussé du calcaire. C'est un produit de haut teneur en calcaire, riche en chaux dont la teneur en CaO est supérieure à 51%.



**Figure III.4.** Filler calcaire.

L'analyse chimique des fillers calcaire est donnée dans le tableau III.17

**Tableau III.17.** Analyse chimique du filler calcaire.

Elément chimique	Teneur (%)
SiO <sub>2</sub>	4.83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.04
Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.37
CaO	51.73
MgO	0.46
SO <sub>3</sub>	0.08
K <sub>2</sub> O	0.14
Na <sub>2</sub> O	0.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05
TiO <sub>2</sub>	0.03
Perte au feu	41.17

Le calcaire utilisé a été broyé très fin jusqu'à une finesse de 6320 cm<sup>2</sup>/g (Tableau III.18).

**Tableau III.18.** Propriétés physiques des fillers calcaire.

Caractéristique	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2.66	g/cm <sup>3</sup>
SSB	6320	cm <sup>2</sup> /g

### III.2.8. la fumée de silice

La fumée de silice CONDENSIL S95 DM de SIKA d'Alger a été utilisée aussi comme fillers pour remplacer les fillers calcaire, c'est une silice ultra fine issue de l'industrie de la fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium.

**Figure III.5.** La fumée de silice.

Ses caractéristiques techniques sont données dans le tableau III.19.

**Tableau III.19.** Caractéristiques techniques de la fumée de silice.

Surface spécifique BET	23 (20 à 26) m <sup>2</sup> /g
Forme	Poudre
Colure	Gris
Densité absolue	2.24

Le tableau III.20 montre les éléments chimiques de la fumée de silice dont le taux de silice SiO<sub>2</sub> est très élevé de 86,78% et un taux de chaux faible de 5,22%.

**Tableau III.20.** Analyse chimique de la fumée de silice.

Elément composé	Concentration (%)
Na <sub>2</sub> O	0.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10
MgO	1.32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.68
SiO <sub>2</sub>	86.78
SO <sub>3</sub>	0.69
K <sub>2</sub> O	0.45
CaO	5.22
Cl	0.39

Grace à ses propriétés le CONDENCIL S95 DM:

- Sur le béton frais :
  - ✓ Améliore la cohésion.
  - ✓ Evite la ségrégation et le ressuyage.
- Sur le béton durci :
  - ✓ Améliore la résistance mécanique.
  - ✓ Améliore la durabilité en milieu agressif.
  - ✓ Améliore la résistance à l'érosion et à l'abrasion.
  - ✓ Facilite le pompage de tous les bétons même peu dosés en ciment.

La fumée de silice peut être appliqué dans :

- ✓ Le BHP.
- ✓ Le Béton résistant aux milieux agressif.
- ✓ Le Béton pompable.
- ✓ Les Silos.
- ✓ Les Sols industriels.

Son dosage varie de 5 à 10% du poids du ciment. Ce dosage dépend des performances recherchées. Cette fumée doit être mélangée à sec avec le ciment, avant l'ajout de l'eau de gâchage, pendant une minute au moins. Après ajout de l'eau de gâchage mélangé encore pendant deux minutes. Malaxer ensuite jusqu'à homogénéisation du béton.

### III.2.9. La roche de la région de Tlemcen

C'est un matériau naturel d'origine volcanique formée de couches stratifiées et inclinées d'un certain angle dans ce lieu de gisement. Elle a l'aspect d'un verre avec des reflets argentés et elle se fragmente facilement comme montrée sur la figure III.6, 7. La roche de la région de Tlemcen a été exploitée dans ce travail pour être utilisée comme l'une des composantes d'un béton autoplaçant, les fillers qui peuvent remplacer les fillers calcaires.



**Figure III.6.** Roche naturelle en blocs.



**Figure III.7.** Les fillers de la roche.

Les Propriétés physiques et la composition chimique de la poudre de la roche sont présentées dans les tableaux III.21 et III.22.

**Tableau III.21.** Caractéristique physique de la poudre de roche.

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique	2.3	(g/cm <sup>3</sup> )
Surface spécifique	4550	(cm <sup>2</sup> /g)
Teneur en eau	3.09	(%)
Absorption	1.24	(%)
Porosité	2.86	(%)

**Tableau III.22.** Composition chimique de la poudre de roche.

Elément chimiques	Concentration (%)
PbO	0.010
Na <sub>2</sub> O	1.876
MgO	1.334
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.949
SiO <sub>2</sub>	64.444
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.091
SO <sub>3</sub>	0.884
K <sub>2</sub> O	3.405
CaO	5.794
MnO	0.176
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.516
Rb <sub>2</sub> O	0.608
Cl	0.412

Les résultats de l'analyse chimique de la poudre de roche montrent qu'elle contient un taux de silice élevé de 64,444% presque comme dans le cas de la fumée de silice.

Par ailleurs l'activité pouzzolanique de poudre de la roche a été déterminée grâce à l'essai qui consiste à mesurer la quantité de chaux absorbée par 2g de la roche durant 30 jours à la température ordinaire (Figure III.8).

La quantité de chaux fixée pendant 30 jours par 2g de la roche, les résultats sont donnée dans le tableau suivant :

**Tableau III.23.** Résultat de l'activité pouzzolanique

$V_0$ (ml)	$V_1$ (ml)
34.5	-
34.7	33.4
35	33.2
35.7	32.9
35.1	30.3
35.8	29
35.2	28.5
34.2	29.5
34	27.8
35	26.9
34.8	26.1
35.1	26.7
35.5	27.2
35.9	25
35.2	25.4
-	25.2

$V_0$  : volume de HCl neutralisant 50ml de solution de la chaux.

$V_1$  : volume de HCl neutralisant 50ml de la Roche.



**Figure III.8.** Essai de détermination de l'activité pouzzolanique

- Les résultats obtenus par l'essai donnent une valeur de l'activité pouzzolanique de 57.57 mg de CaO/g de la poudre de roche qui est considérée comme **active moyenne**.

# CHAPITRE IV

---

## PARTIE EXPERIMENTALE : RESULTATS ET DISCUSSIONS

## CHAPITRE IV. Partie expérimentale : Résultats et discussions

### IV.1. Introduction

Ce chapitre rassemble les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude effectuée au niveau du laboratoire (CETIM), ainsi que leurs interprétations. Il comprend la formulation des bétons autoplaçants élaborés avec deux types de fibres métalliques en faisant varier la nature des fillers (calcaire, fumée de silice ou poudre de la roche volcanique) et la caractérisation de leurs propriétés d'ouvrabilité à l'état frais ainsi physico-mécaniques à l'état durci.

### IV.2. Formulation du BAP témoin par la méthode japonaise

Cette étape est consacrée à la formulation d'un BAP en se fixant les intervalles pour chaque constituant donné:

- ✓ Volume de gravillons est limité en prenant le rapport G/S proche de 1.
- ✓ Volume de la pâte est : 330 à 400 L/m<sup>3</sup>.
- ✓ La masse de ciment : M = 300 à 450 Kg/m<sup>3</sup>.
- ✓ La masse de fillers M = 10% de la masse de ciment.
- ✓ Dosage en superplasiifiant est proche de son dosage à saturation.

➤ **Données de base de l'étude**

Le rapport G/S = 0.9.

Le rapport fixé E/(C+F) = 0.38.

On prend le dosage de superplastifiant est le dosage de point de saturation.

➤ **Optimisation de la composition du BAP**

Ciment : 430 Kg/m<sup>3</sup>.

Fillers calcaire : 43 Kg/m<sup>3</sup> du filler (10 % du poids de ciment).

G/S = 0.9.

E/(C+F) = 0.38.

E/(C+F) = 0.38 → E = 0.38x (430+43) = 179.74 L/m<sup>3</sup>.

➤ **La masse de superplastifiant** : est de 1.7% du poids de liant (C+F), donc

SP = 0.017x (430+43) → SP = 8.04 Kg/m<sup>3</sup>.

SP = 8.04/1.06 = 7.58 L/m<sup>3</sup>.

Avec 1.06 (la densité de SP).

L'extrait sec du super plastifiants st de 30.2%.

Donc la quantité d'eau provient de superplastifiants est de 0.698x7.58 = 5.29 L/m<sup>3</sup>.

D'où la quantité d'eau utilisée pour  $1\text{m}^3$  est de  $E = 179.74 - 5.29 \longrightarrow E = 174.45 \text{ L/m}^3$

➤ **Volume de la pâte on le détermine**

$$VP = V_C + V_F + V_E + V_{SP}$$

$$VP = 142.85 + 16.16 + 174.45 + 7.58 = 341.04 \text{ L/m}^3$$

$341.04 \in [330 \text{ à } 400 \text{ L/m}^3]$ , l'intervalle est vérifié.

➤ **Détermination du volume des granulats**

Volume de la pâte,  $VP = 341.04 \text{ L/m}^3$ .

Volume des granulats  $VG = 1000 - VP = 658.96 \text{ L/m}^3$ .

Volume des sables :

$$G/S = 0.9.$$

$$G + S = 658.96.$$

$$G = 658.96 - S.$$

$$0.9 = 658.96 - S / S.$$

$$G = 658.96 - S.$$

$$S = 658.96 / 1.9 = 346.82 \text{ L/m}^3.$$

$$G = 658.96 - 346.82 = 312.14 \text{ L/m}^3.$$

➤ **Les masses des constituants pour  $1\text{m}^3$  de béton**

✓ Pour les Sables :

Le de sable est  $346.82 \text{ L/m}^3$ . Donc, d'après la correction avec deux types de fractions du sable (sable grossier + sable fin) et selon méthode D'Abrams, on a trouvé :

Sable grossier de BAGHLIA : 54 %  $\longrightarrow$  Masse sable grossier =  $187.28 \text{ L/m}^3$ .

Sable fin de BOUSAADA : 46 %  $\longrightarrow$  Masse sable fin =  $159.56 \text{ L/m}^3$ .

✓ Pour les graviers :

Le volume de gravier est  $312.14 \text{ L/m}^3$ . Donc, nous prenons  $1/3$  pour G3/8 et  $2/3$  pour G8/15 :

$1/3$  pour G3/8 =  $104.5 \text{ L/m}^3$   $\longrightarrow$  Masse G3/8 =  $104.05 \text{ L/m}^3$ .

$2/3$  pour G8/15 =  $208.09 \text{ L/m}^3$   $\longrightarrow$  Masse G8/15 =  $208.09 \text{ L/m}^3$ .

Les dosages de chaque constituant du BAP témoin dans  $1 \text{ m}^3$  du béton sont donnés dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1.** Composition de 1 m<sup>3</sup> de BAP témoin.

Constituants	Volume (L/m <sup>3</sup> )	Masse (Kg/m <sup>3</sup> )
Ciment	142.85	430
Fillers calcaire	16.16	43
Sable fin	159.56	422.83
Sable grossier	187.28	516.89
Gravier 3/8	104.05	286.14
Gravier 8/15	208.09	572.25
Eau	174.45	174.45
SP	7.58	8.04
Totale	1000	2453.66

### IV.3. Compositions des bétons autoplaçants fibrés

Les différents bétons autoplaçants sont élaborés en les renforçant par un taux fixé à 1% (du volume de 1m<sup>3</sup>) de fibres métalliques de deux types I et II. Aussi, la nature des fillers est variée en passant du calcaire, à la fumée de silice à la poudre d'une roche volcanique naturelle de la région de Tlemcen. Le taux des fillers étant de 10% de la masse du ciment. Les résultats des 9 formulations à traitées sont donnés dans le tableau IV.2.

**Tableau IV.2.** Composition de 1 m<sup>3</sup> des bétons autoplaçants fibrés.

Constituants (Kg/m <sup>3</sup> )	FC	FS	FR	FC F1	FS F1	FR F1	FC F2	FS F2	FR F2
Ciment	430	430	430	430	430	430	430	430	430
Filler calcaire	43	-	-	43	-	-	43	-	-
Fumée de silice	-	43	-	-	43	-	-	43	-
Filler de la roche	-	-	43	-	-	43	-	-	43
Sable fin	422.83	420.82	421.69	422.83	420.82	421.69	422.83	420.82	421.69
Sable grossier	516.89	514.25	515.58	516.89	514.25	515.58	516.89	514.25	515.58
Gravier 3/8	286.14	284.82	285.39	286.14	284.82	285.39	286.14	284.82	285.39
Gravier 8/15	572.25	569.64	570.79	572.25	569.64	570.79	572.25	569.64	570.79
Eau	174.45	174.45	174.45	174.45	174.45	174.45	174.45	174.45	175.45
Superplastifiant	8.04	8.04	8.04	8.04	8.04	8.04	8.04	8.04	8.04
Fibres	-	-	-	78	78	78	78	78	78

FC : béton autoplaçant à base de fillers de calcaire, comme BPA témoin.

FS : béton autoplaçant à base de fillers de fumée de silice.

FR : béton autoplaçant à base de fillers de la roche.

FCF1 : BAP à base de fillers de calcaire avec 1% de fibres métalliques forme crochet.

FSF1 : BAP à base de fillers de fumée de silice avec 1% de fibres métalliques forme crochet.

FRF1 : BAP à base de fillers de la roche avec 1% de fibres métalliques en forme crochet.

FCF2 : BAP à base de filler calcaire avec 1% des fibres métalliques en forme ondulée.

FSF2 : BAP à base de fillers de fumée de silice avec 1% des fibres métalliques ondulées.

FRF2 : BAP à base de fillers de la roche avec 1% des fibres métalliques ondulées.

## IV.4. Résultats d'essais sur bétons BAP à l'état frais

### IV.4.1. L'essai d'étalement (la fluidité)

La fluidité des bétons autoplaçant étudiés a été appréciée par l'essai d'étalement au cône d'Abram, les résultats sont donnés dans les tableaux IV.3, 4, 5, 6, et représentés sur la figure IV.1.

**Tableau IV.3.** Etalement des BAP sans fibres.

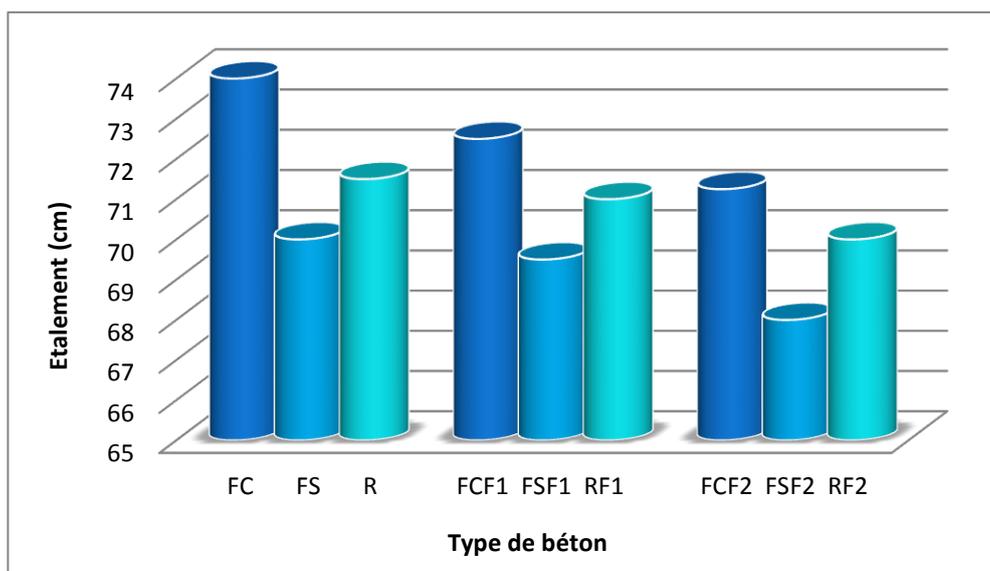
Type de béton	FC	FS	FR
Etalement en (cm)	74	70	71.5

**Tableau IV.4.** Etalement des BAP fibrés (fibres en crochet).

Type de béton	FC F1	FSF1	FR F1
<b>Etalement (cm)</b>	<b>72.5</b>	69.5	71

**Tableau IV.5.** Etalement des BAP fibrés (fibres ondulées).

Type de béton	FC F2	FSF2	FR F2
Etalement (cm)	71.25	68	70



**Figure IV.1.** Étalement des bétons autoplaçants BAP.

Les résultats de l'étalement montrent une diminution de la fluidité des bétons non renforcés de fibres contenant les fillers de fumée de silice ou fillers de roche (FS,FR) et même les BAP fibrés (FCF1, FSF1, FRF1) comparée à celle du BAP témoin. En effet, l'étalement des différents BAP est inférieur à celui (74 cm) du BAP témoin FC. Par ailleurs, le remplacement des fillers calcaire par les fillers de roche engendre une fluidité (étalement de 71,5 cm) qui s'approche le plus de ce celui du BAP témoin (Étalement 74 cm) par rapport aux fillers de fumée de silice dont la matrice cimentaire est plus compacte. Mais une fois les fibres ajoutées, la fluidité diminue d'avantage notamment avec les fibres ondulées qui rendent le béton BAP plus épais.

Il semble que les BAP FCF1 contenant des fillers calcaire et 1% de fibres métalliques en crochet et le BAP FR contenant seulement des fillers de roche sont les plus performants par rapport aux BAP.

Autrement dit, si l'application a besoin d'un béton autoplaçant fibré, l'utilisation du FCF1 prime, sinon c'est le béton FR qui est utilisé car il coutera moins cher.

#### IV.4.2. L'essai de stabilité au tamis

Les résultats de l'essai de stabilité au tamis qui permet de calculer un taux de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non, sont donnés dans les tableaux IV.6, 7 et 8 et représentés sur la (figure IV.2).

**Tableau IV.6.** Stabilité au tamis des BAP sans fibres.

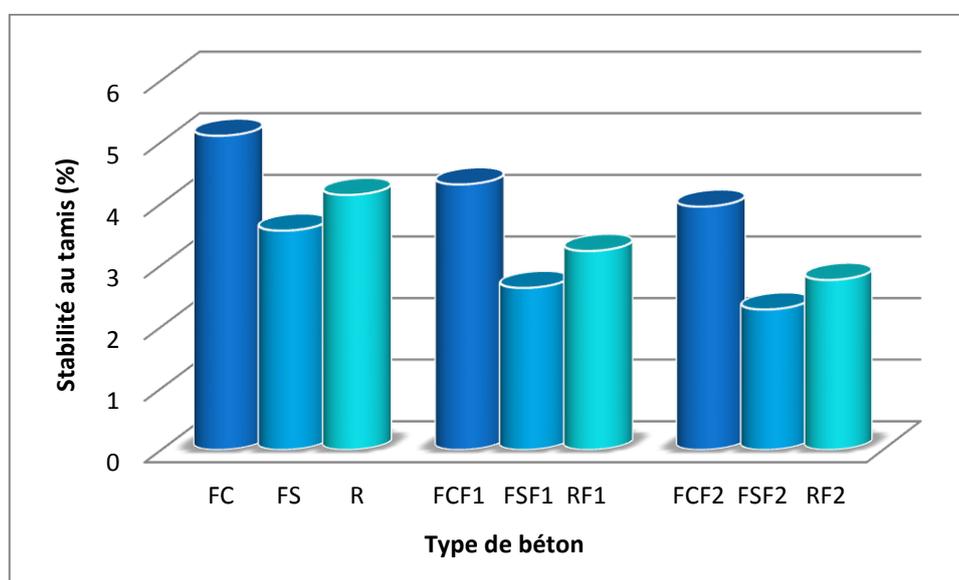
Type de béton	FC	FS	FR
Stabilité au tamis $\pi$ (%)	5.10	3.56	4.14

**Tableau IV.7.** Stabilité au tamis des BAP fibrés (fibres en crochet).

Type de béton	FC F1	FS F1	FR F1
Stabilité au tamis $\pi$ (%)	4.31	2.63	3.23

**Tableau IV.8:** Stabilité au tamis des BAP fibrés (fibres ondulée).

Type de béton	FC F1	FS F2	FR F2
Stabilité au tamis $\pi$ (%)	3.95	2.28	2.76



**Figure IV.2** Stabilité au tamis des BAP.

De même, les mêmes constatations sont trouvées que pour l'étalement des BAP à savoir que la stabilité définie par la laitance, de tous les bétons BAP élaborés à base de fillers de fumée de silice ou de roche ainsi de fibres est inférieure à celle du béton témoin FC. Tous les BAP

présentent un taux de ségrégation inférieur à 15%, indiquant une stabilité satisfaisante selon les critères d'acceptabilité d'une formulation BAP. De plus, Les BAP FCF1 contenant des fibres métalliques en crochet et FR avec des fillers de roche sont les plus proches du BAP témoin FC vis-à-vis de la stabilité.

**IV.4.3. L'essai de la boîte en L**

L'essai de la boîte en L 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. Les résultats sont donnés dans les tableaux IV.9, 10 et 11 et représentés sur la figure IV.3.

**Tableau IV.9.** La boîte en L des BAP sans fibres.

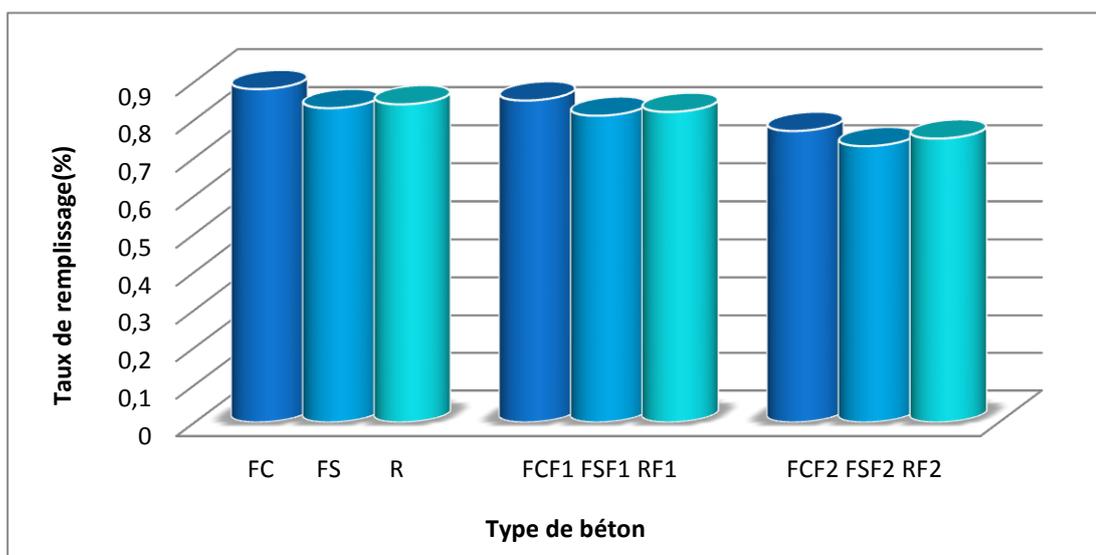
Type de béton	FC	FS	FR
Taux de remplissage (%)	0.88	0.83	0.84

**Tableau IV.10.** La boîte en L des BAP fibrés (fibres en crochet).

Type de béton	FC F1	FS F1	FR F1
Taux de remplissage (%)	0.85	0.81	0.82

**Tableau IV.11.** La boîte en L des BAP fibrés (fibres ondulées).

Type de béton	FC F2	FS F2	R F2
Taux de remplissage (%)	Blocage	Blocage	Blocage



**Figure IV.3.** Taux de remplissage des BAP.

Les résultats sont conformes aux exigences des BAP puisque pour les BAP FC, FS, FR, FCF1, FSF1 et FRF1, le taux de remplissage est supérieur à 0,8 donc la mobilité des BAP dans un milieu confiné est assurée, ce qui leur permet de s'écouler à travers les armatures correctement.

Pour les BAP fibrés contenant les fibres métalliques ondulées, un blocage du béton lors de l'essai a été remarqué. Ceci est dû peut-être à la forme des fibres. Par ailleurs, concernant l'incorporation des fibres métalliques, il est préférable d'utiliser les fibres en crochet. De plus, remplacer les fillers calcaire par les fillers de roche est la meilleure alternative. Il semble que la mobilité des BAP FR et FCF1 dans un milieu confiné s'aligne avec celle du béton témoin. Ce sont donc les meilleurs bétons BAP vis-à-vis de la mobilité.

#### IV.4.4. La masse volumique des bétons

Les mesures de la masse volumique des bétons autoplaçants BAP élaborés à l'état frais ont donné les résultats des tableaux IV.12, 13, 14.

**Tableau IV.12** : La masse volumique des BAP étudiés sans fibre à l'état frais.

Type béton	FC	FS	FR
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	2412.32	2355.60	2375.33

**Tableau IV.13.** La masse volumique des BAP fibrés (forme crochet).

Type de béton	FC F1	FS F1	FR F1
Masse volumique (Kg/cm <sup>3</sup> )	2467.33	2381.30	2402.21

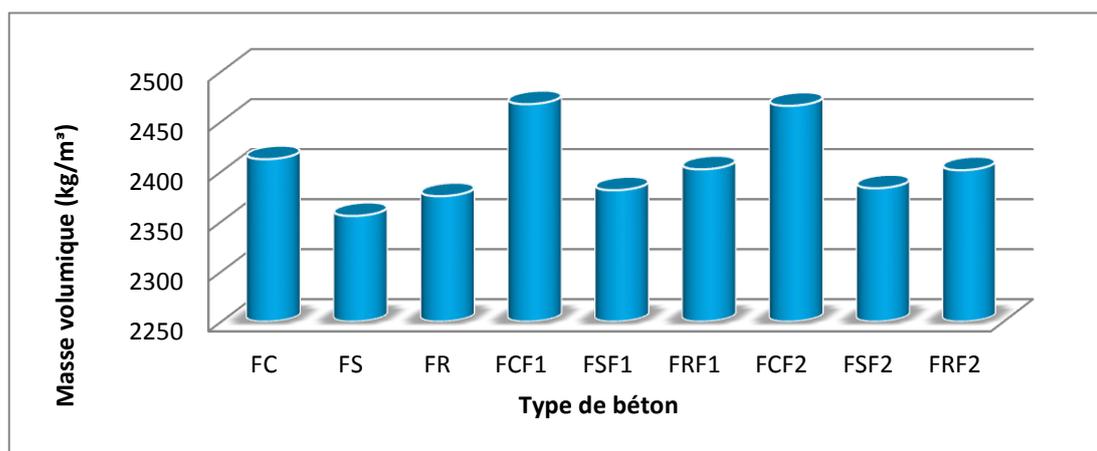
**Tableau IV.14.** La masse volumique des BAP fibrés (forme ondulée).

Type de béton	FC F2	FS F2	FR F2
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	2465.66	2383.30	2401.33

La figure IV.4 représente l'évolution de la masse volumique des BAP en fonction du type de fibres métalliques utilisées ainsi que des différents fillers incorporés. Concernant les bétons BAP contenant les différents types de fillers, l'incorporation des fillers de roche diminue la masse volumique du béton BAP (2375,33) et la diminue encore plus quand les fillers sont de type fumée de silice (2355,60), ceci en comparant avec la masse volumique du BAP témoin

(2412,32). Cette diminution permet d'alléger le béton BAP. Elle est due au fait que les masses volumiques de la roche ainsi que celle de la fumée de silice sont plus petites que celle du calcaire.

Par ailleurs, en injectant les fibres métalliques ondulées ou en crochets, la masse volumique augmente et le béton BAP devient plus lourd par rapport au BAP témoin. Ceci est dû au fait que la masse volumique des fibres métalliques est plus grande.



**Figure IV.4.** Evolution de la masse volumique des bétons autoplaçants frais.

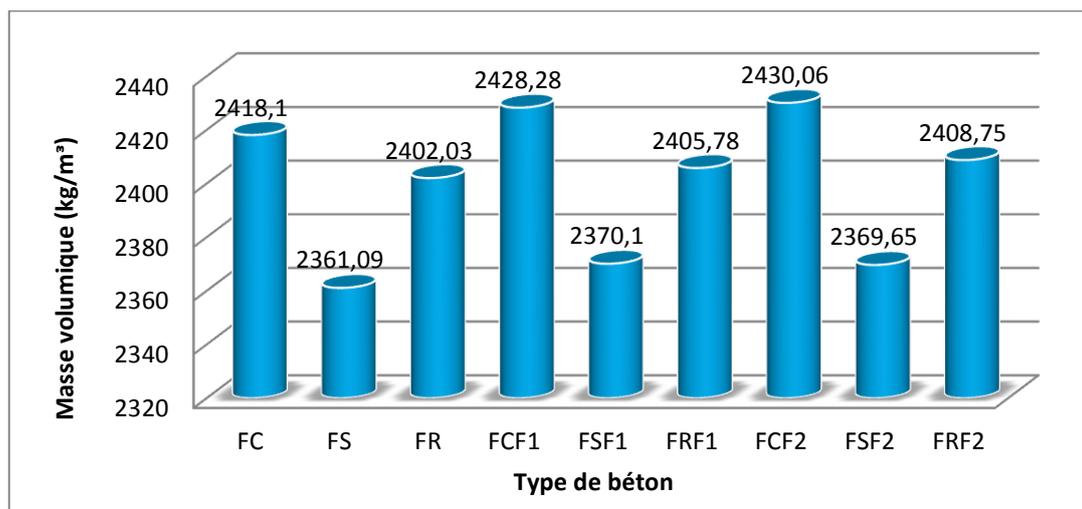
## IV.5. Résultat d'essais sur les BAP à l'état durci

### IV.5.1. La masse volumique des BAP

Les mesures des masses volumiques des BAP durcis sont données sur le tableau IV.15.

**Tableau IV.15** Masse volumique des BAP à l'état durci.

Type de béton BAP	28 JOURS
FC	2418.06
FS	2361.09
FR	2402.03
FC F1	2428.28
FS F1	2370.10
FR F1	2405.78
FC F2	2430.12
FS F2	2369.65
FR F2	2408.75



**Figure IV.5.** Evolution de la masse volumique des bétons autoplaçants durcis.

L'incorporation des fillers de roche dans la BAP diminue sa masse volumique et beaucoup plus avec les fillers de fumée de silice puisque les Mv (roche ou fumée de silice) sont plus petite que celle du calcaire. Par ailleurs, l'ajout des fibres

#### IV.5.2. L'absorption d'eau

L'absorption de l'eau d'un BAP a été calculée selon l'équation suivante :  $Ab\% = \frac{Mh - Ms}{MS} * 100$

Ab% : Absorption d'éprouvette en (%).

Mh : La masse d'éprouvette après l'immersion dans l'eau pendant 28 jours.

Ms : La masse sèche de l'éprouvette

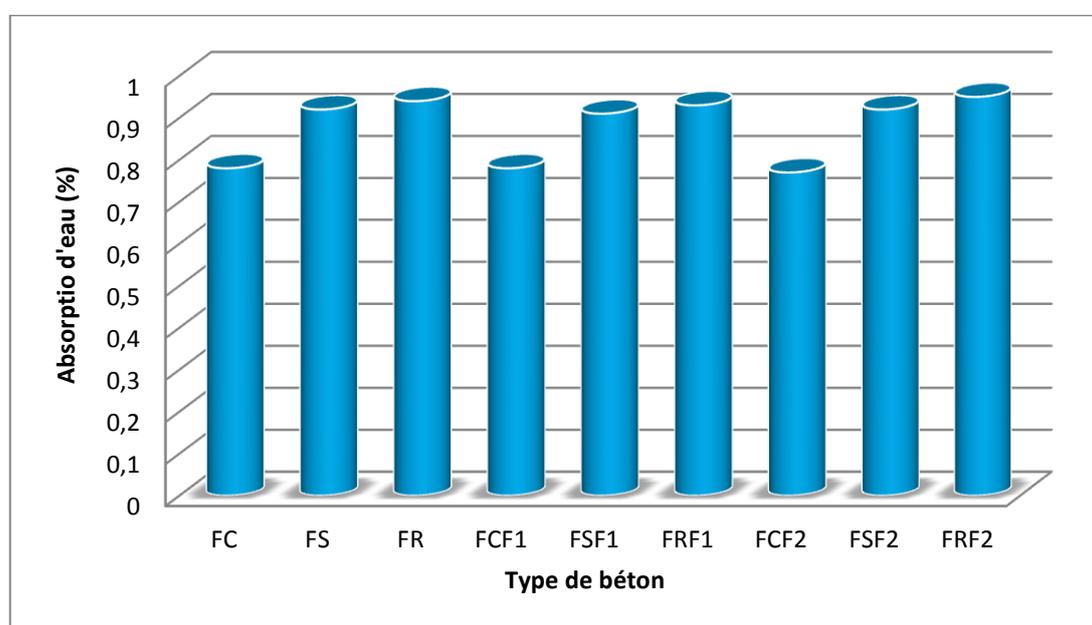
Les résultats de l'absorption des bétons BAP élaborés sont présentés dans le tableau IV.16.

**Tableau IV.16.** L'absorption d'eau des BAP.

Types de béton BAP	Absorption d'eau (%)
FC	0.78
FS	0.92
FR	0.94
FC F1	0.78
FS F1	0.91
FR F1	0.93
FC F2	0.77
FS F2	0.92
FR F2	0.95

La figure IV.6 montre l'effet du type de fillers ainsi que des fibres métalliques incorporant les bétons BAP sur leur absorption d'eau. Il est remarqué que le remplacement des fillers calcaire par les fillers de roche augmente plus l'absorption d'eau du béton BAP que la fumée de silice dont la finesse ( $23000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) est nettement plus grande que celle de la poudre de roche ( $4550 \text{ cm}^2/\text{g}$ ). Ceci est dû à la grande capacité des fillers de roche à absorber l'eau. En effet la roche dans son état naturel absorbe de l'eau.

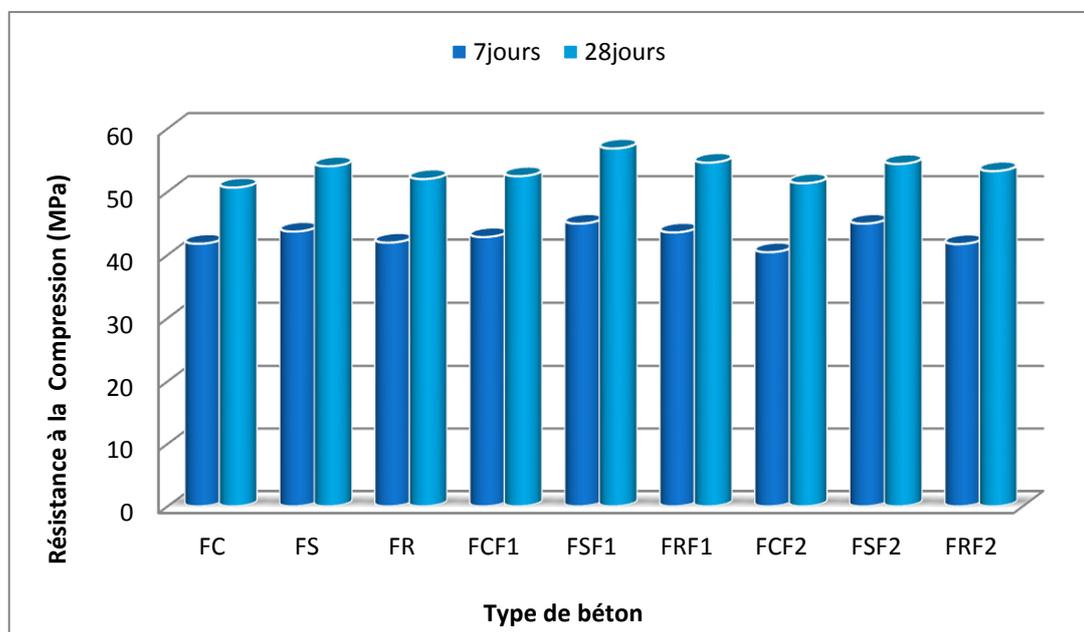
Par ailleurs, l'injection des fibres métalliques ondulées ou en crochets n'a pas d'effet significatif sur l'absorption des bétons autoplacants élaborés avec les différents types de fillers.



**Figure IV.6.** Evolution de l'absorption des bétons autoplacants.

### IV.5.3. Résistance à la compression des bétons BAP

Les essais de compression effectués sur les différents bétons BAP avec ou sans fibres aux échéances 7 et 28 jours donnent les résultats de la résistance à la compression présentés dans la figure IV.7.

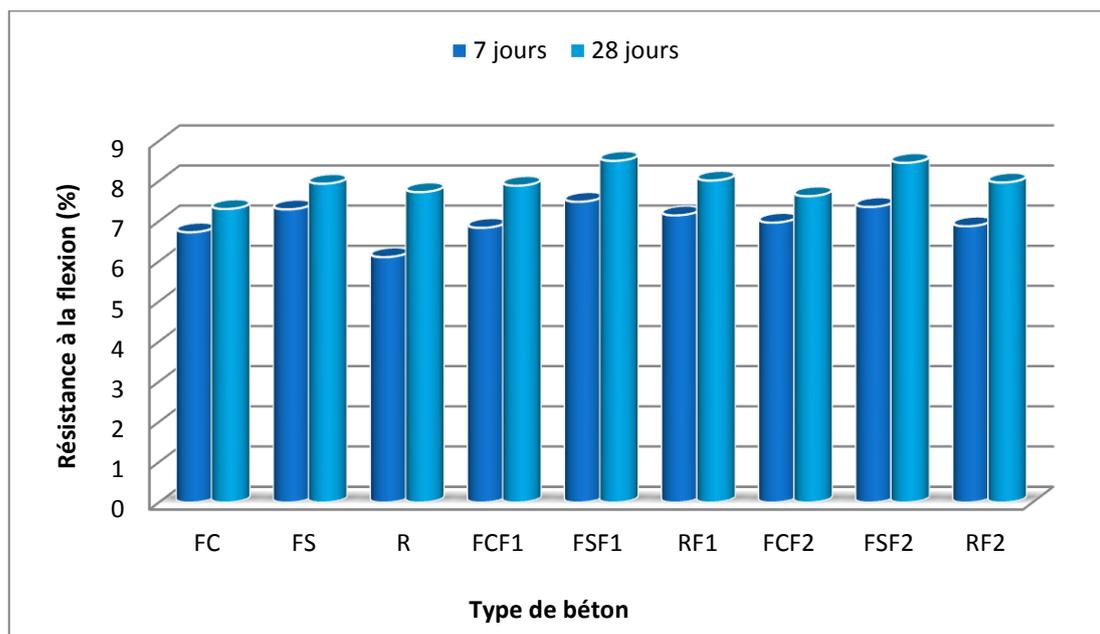


**Figure IV.7.** Résistance à la compression des BAP.

La figure IV.7 montre que la résistance à la compression de tous les BAP augmente en fonction de l'âge de 7j à 28j. Il est constaté que le remplacement des fillers calcaire par les fillers de fumées de silice ou de roche a un effet positif sur la résistance à la compression. En effet, les résistances des BAP FS et FR sont supérieures à celles du béton témoin FC. Mais la fumée de silice augmente plus la résistance du BAP. De plus, dans les BAP renforcés, les fibres métalliques augmentent la résistance à la compression notamment les fibres en crochets. C'est l'effet positif de leur adhérence avec les graviers. Il s'avère que les BAP FSF1 et FRF1 sont les plus résistants donc les plus performants.

#### **IV.5.4. Résistance à la flexion**

Les essais effectués sur les différents bétons à différents âge (7, 28 jours), les résultats de la traction par flexion sont représentés dans la figure IV.8



**Figure IV.8.** Résistance à la traction par flexion des BAP.

La figure IV.8 montre l'évolution de la résistance à la traction par flexion des bétons BAP conçus avec ou sans fibres et les différents fillers. En se basant sur les résultats, il est montré que les résistances de tous les bétons BAP ont évolué en fonction de l'échéance 7j à 28j. Par ailleurs, d'une part, les fillers de roche augmentent la résistance à la flexion du BAP et d'avantage lorsqu'il s'agit de fillers de fumée de silice. D'autre part, l'incorporation de fibres métalliques engendre encore une augmentation de cette résistance des BAP FC, FS et FR surtout avec les fibres en crochet. En effet les fibres en crochet s'adhèrent beaucoup plus au béton par rapport aux fibres ondulées. Cette situation a été efficace selon les caractéristiques d'adhésion, de flexibilité et de distribution des fibres d'additifs dans le matériau BAP.

# CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

### Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence de deux paramètres (additions minérales et fibres) sur les caractéristiques d'un béton autoplaçant: son ouvrabilité, ses résistances mécaniques. L'intérêt majeur qui est à l'origine de ce travail est la possibilité de remplacer les fillers calcaire par des fillers d'une roche naturelle de la région de Tlemcen confrontée aux fillers de fumée de silice d'un béton autoplaçant renforcé de fibres. L'effet de ces fillers est étudié sur les propriétés d'ouvrabilité à l'état frais (étalement, taux de remplissage et stabilité au tamis) et physico-mécanique à l'état durci (Masse volumique, Absorption d'eau résistance à la traction par flexion, à la compression) du béton autoplaçant renforcé par des fibres métalliques de deux types en forme ondulée ou en crochets.

Ce travail consiste à formuler un béton autoplaçant BAP (FC) témoin avec addition de fillers calcaire (C) et d'autres bétons BAP en remplaçant les fillers calcaires par la poudre de roche de la région de Tlemcen (R) ou la fumée de silice (F) d'une part et en incorporant deux types de fibres métalliques d'autre part. La formulation des BAP fibrés est basée sur les critères recommandés par l'AFGC. Les dosages des fillers FC, FR et FF sont fixés à 10% par rapport à la masse du ciment. Le taux de fibres métalliques est fixé à 1% vol.

Les résultats obtenus mènent aux conclusions suivantes :

- ✓ L'ouvrabilité des BAP est diminuée sous les effets des fillers de roche FR, ou et fumée de silice FS ou sous les effets conjugués de fibres métalliques et de fillers FR, FS. L'emploi de FR ou de FS entraîne une diminution de la fluidité défini par l'étalement du BAP, un effet qui s'accroît avec l'incorporation des fibres métalliques de la forme en crochets à la forme ondulée. En effet, l'étalement des différents BAP est inférieur à celui (74 cm) du BAP témoin FC. Mais, tous les BAP satisfont le critère préconisé par la norme.
- ✓ Il semble que les BAP FCF1 contenant des fillers calcaire et 1% de fibres métalliques en crochet et le BAP FR contenant seulement des fillers de roche sont les plus performants.
- ✓ De même, la stabilité définie par la laitance, de tous les bétons BAP élaborés à base de fillers de fumée de silice ou de roche aussi de fibres, est inférieure à celle du béton témoin FC. Tous les BAP présentent un taux de ségrégation inférieur à 15%, indiquant une stabilité satisfaisante selon les critères d'acceptabilité d'une formulation BAP. De plus, Les BAP FCF1 contenant des fibres métalliques en crochet et FR avec des fillers de roche sont les plus proches du BAP témoin FC vis-à-vis de la stabilité.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

- ✓ Concernant la capacité de remplissage du béton en milieu confiné, les résultats sont conformes aux exigences des BAP puisque pour tous les BAP sauf pour ceux élaborés avec des fibres ondulées (blocage remarqué), le taux de remplissage est supérieur à 0,8 donc la mobilité des BAP dans un milieu confiné est assurée, ce qui leur permet de s'écouler à travers les armatures correctement.
- ✓ Par ailleurs, concernant l'incorporation des fibres métalliques, il est préférable d'utiliser les fibres en crochet. De plus, remplacer les fillers calcaire par les fillers de roche est la meilleure alternative. Il semble que la mobilité des BAP FR et FCF1 dans un milieu confiné s'aligne avec celle du béton témoin. Ce sont donc les meilleurs bétons BAP vis-à-vis de la mobilité.
- ✓ L'incorporation des fillers de roche diminue la masse volumique du béton BAP à l'état frais ou durci et la diminue encore plus quand les fillers sont de type fumée de silice. Ceci permet d'avoir un BAP léger. Elle est due au fait que les masses volumiques de la fumée de silice est petite que celle de la poudre de roche plus petite que celle du calcaire.
- ✓ Par ailleurs, en injectant les fibres métalliques ondulées ou en crochets, la masse volumique augmente et le béton BAP devient plus lourd par rapport au BAP témoin.
- ✓ Le remplacement des fillers calcaire par les fillers de roche augmente plus l'absorption d'eau du béton BAP que la fumée de silice. Ceci est dû à la grande capacité des fillers de roche à absorber de l'eau. En effet la roche dans son état naturel absorbe de l'eau.
- ✓ L'injection des fibres métalliques n'a pas d'effet significatif sur l'absorption des bétons BAP élaborée avec les différents types de fillers.
- ✓ Le remplacement des fillers calcaire par les fillers de roche permet un gain de résistance à 28 jours qui s'aligne avec celui obtenu avec les fillers de fumée de silice.
- ✓ L'introduction des fibres entraîne aussi une augmentation des résistances en compression et à la traction par flexion mais beaucoup plus avec les fibres en forme de crochet. C'est l'effet positif de leur adhérence et ancrage dans le béton. Il s'avère que les BAP contenant les fillers de roche qui s'alignent avec ceux incorporant les fillers de fumée de silice sont les plus résistants donc les plus performants. Cette situation est efficace selon les caractéristiques d'adhésion, de flexibilité et de distribution des fibres d'additifs dans le matériau BAP.

### Perspectives

- ✓ Vu le potentiel de la poudre de roche utilisée comme fillers dans le béton autoplaçant à contribuer à augmenter la résistance à la traction par flexion et donc diminuer la sensibilité du matériau cimentaire à la fissuration due aux variations dimensionnelles de retrait, il serait utile et intéressant de réaliser des essais de durabilité sur les bétons élaborés afin d'étudier l'effet de ces fillers combinés aux fibres métalliques sur les propriétés physico-chimiques des bétons.
- ✓ Compléter cette étude en établissant une campagne d'essais sur les mêmes bétons en combinant des fibres métalliques et des fibres synthétiques comme les polypropylènes après un traitement thermique.

# PARTIE ANNEXE

---

## I. Les essais sur granulats

### I.1. Détermination de la masse volumique absolue NF NE 1097-7

#### I.1.1. But de l'essai

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

#### I.1.2. Méthode de l'éprouvette graduée

Cette méthode est très simple et très rapide. Elle utilise du matériel très courant de laboratoire.

Toutefois sa précision est faible.

1. Remplir une éprouvette graduée avec un volume  $V_1$  d'eau.
2. Peser un échantillon sec  $M$  de granulats (environ 300 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
3. Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume  $V_2$ .

La masse volumique est alors:

$$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

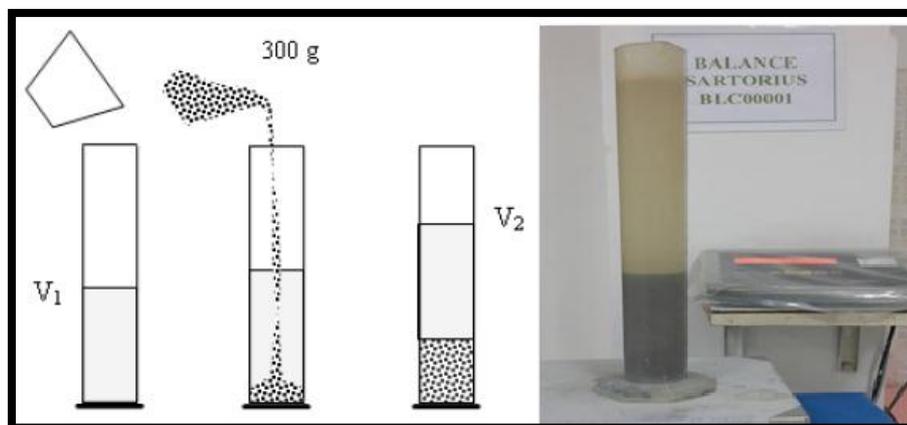
Où :

$\rho_s$  : masse volumique absolue en  $\text{g/cm}^3$ .

$M$  : masse de l'échantillon en g.

$V_1$ -  $V_2$  : variation entre les deux repères en  $\text{m}^3$ .

- Pour opérer dans de bonnes conditions, utiliser une éprouvette graduée en verre de  $500 \text{ cm}^3$  de volume. La lecture des niveaux  $V_1$  et  $V_2$  doit se faire en bas du ménisque formé par l'eau. En effet, celle-ci a tendance à remonter sur les bords de l'éprouvette sur une hauteur de 1 à 2 mm, ce qui fausse bien sûr la lecture des volumes si la lecture est effectuée en haut du ménisque.



**Figure 1.** Dispositif de la mesure de la masse volumique absolue.

## I.2. Mesure la propreté de sable

### I.2.1. But de l'essai (l'équivalent de sable, NF EN 933-8)

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

### I.2.2. Principe de l'essai

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

- La hauteur h1 : sable propre + éléments fins,
- La hauteur h2: sable propre seulement.

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

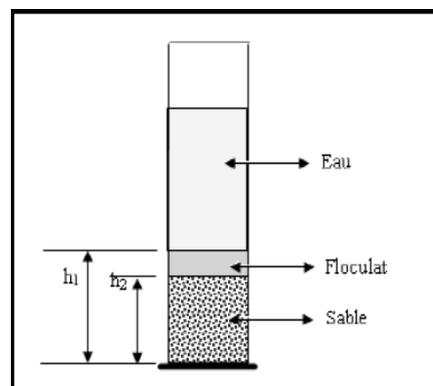
$$ES = (H1/H2).100$$

Selon que la hauteur h2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine :

- ✓ **SV**: équivalent de sable visuel.
- ✓ **ES** : équivalent de sable au Piston.



**Figure 2.** Dispositif de l'essai d'équivalent de sable.



**Figure 3.** L'équivalent de sable.

**Interprétation des résultats**

- si  $ES < 60\%$ , on dit que le sable est argileux.
- si  $60\% \leq ES < 70\%$ , on dit que le sable est légèrement argileux.
- si  $70\% \leq ES < 80\%$ , on dit que le sable est propre.
- si  $ES > 80\%$ , on dit que le sable est très propre.

**I.2.3. Calcul de la masse volumique (réelle), la porosité, le coefficient d'absorption et la teneur en eau des gravillons**

A) Coefficient d'absorption d'eau % NF NE 1097-6 :

$$A_b = 100 \frac{M_a - M_s}{M_s}$$

B) Porosité % NF NE 1097-3 :

$$n = 100 \frac{M_w - M_s}{M_w - M'_w}$$

C) Teneur en eau % NF NE 1097-5 :

$$w = 100 \frac{M - M'_s}{M_s}$$

### I.3. Essai au bleu de méthylène NF NE 933-9

#### I.3.1. Principe

Des doses d'une solution de bleu de méthylène sont ajoutées successivement à une suspension de la prise d'essai dans l'eau. L'adsorption de la solution colorée par la prise d'essai est vérifiée après chaque addition de solution en effectuant un test à la tache sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre. Lorsque la présence de colorant libre est confirmée, la valeur de bleu de méthylène (MB ou MBF) est calculée et exprimée en grammes de colorant adsorbé par kg de la fraction granulaire testée.

#### I.3.2. Mode opératoire

##### I.3.2.1. Description du test à la tache

- Après chaque injection de colorant, le test à la tache consiste à prélever à l'aide de la tige de verre une goutte de la suspension et de la déposer sur le papier filtre.
- La tache qui se forme est composée d'un dépôt central de matériau, en général d'une couleur bleue foncée, entouré d'une zone humide incolore.
- La quantité de suspension prélevée par la goutte doit permettre d'obtenir un dépôt dont le diamètre est compris entre 8 mm et 12 mm.
- Le test est considéré comme positif si, dans la zone humide, une auréole bleue claire persistante d'environ 1 mm apparaît autour du dépôt central.
- L'auréole sera visible à l'approche du point final mais peut disparaître à nouveau, en raison du temps nécessaire aux matériaux argileux pour adsorber complètement le colorant. C'est la raison pour laquelle le point final doit être confirmé
- En répétant le test à la tache toutes les minutes pendant 5 min sans ajout de solution de colorant.



**Figure 4.** Essai de bleu de méthylène.

### I.4. Résistance à l'usure : Essai Micro-Deval NF NE 1097-1

#### I.4.1. Objectif de l'essai

Cet essai a pour but de déterminer l'usure des roches qualifiée par un coefficient de qualité des pierres cassées, ou coefficient DEVAL. Cet essai se fait donc sur les roches et les graviers.

#### I.4.2. Mode opératoire

La prise d'essais doit consister en deux éprouvettes d'une masse de  $(500 \pm 2)$  g chacune.

L'essai doit être effectué sur des granulats passant au tamis de 14 mm et refusé sur le tamis de 10mm. En outre la granulométrie de la prise d'essai doit répondre à au moins une exigence suivante :

- a) 30% à 40% passant sur un tamis de 11.2mm ;
- b) 60% à 70% passant sur un tamis de 12.5mm.



**Figure 5.** Essai de Micro-Deval.

### I.5. Essai de los Angeles NF NE 1097-2

#### I.5.1. Principe

L'essai consiste à mesurer la quantité d'élément inférieur à 1.6mm produite en soumettant le matériau au choc de boulets normalisés dans la machines los Angeles. La granularité de matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes granulaires 4-6.3mm, 6.3-10mm, 10-25mm, 16-31mm, 25-50mm, la granularité du matériau tel qu'il sera mise en œuvre. La classe 10-25mm contient 60% de 10-16mm, la classe 16-31mm contient 60% de 16-25mm, et la classe 25-50mm contient 60% de 25-40mm.

Si M est la masse de matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieur à 1.6mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par choc s'exprime par 100 Mm. Cette quantité est appelée le coefficient los Angeles de matériau (**LA**).

### I.5.2. Préparation de l'échantillon

- ✓ Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.
- ✓ Laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve à 105C° jusqu'à une masse constante.
- ✓ La masse de l'échantillon pour l'essai sera de 5000g ± 5g.

### I.5.3. Mode opératoire

- ✓ Introduire avec précaution la charge de boulet correspondant à la classe granulaire choisie puis l'échantillon pour l'essai.
- ✓ Faire effectuer à la machine 500 rotations à une vitesse régulière 30 à 33 tr/min.
- ✓ Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6mm.
- ✓ Laver le refus au tamis de 1.6mm, égoutter et sécher à 105C° jusqu'à une masse constante.
- ✓ Peser ce refus une fois sécher, soit m1 le résultat de la peser.

### I.5.4. Expression des résultats

Le coefficient Los Angeles (LA) est par définition le rapport :

$$\frac{m}{5000} \times 100$$

Ou :

$$m = 5000 - m1.$$

**M** : est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1.6mm en gramme.

- ✓ La granularité du matériau soumis à l'essai est choisi parmi les valeurs du tableau suivant :

Tableau 1. Valeurs de la granularité du matériau.

Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)	Observation
4.0- 6.3	07	3080	✓ le matériau a sera préalablement lavé et séché à l'étuve à 105°C ✓ la classe 10/25 doit contenir 60% de 10/16 mm ✓ la classe 16/31.5 doit contenir 40% de 16/25mm
6.3-10.0	09	3960	
10.0-14.0	11	4840	
10-25.0	11	4840	✓ classe 25/50 mm doit contenir 40 % de 16/25mm ✓ pour classe 25/50 faire effectuer à la machine 1000rotation (1/2heure). ✓ après essai les mâtériaux seront lavés au tamis de 1.6mm
16.0-31.5	12	5280	
25.0-50.0	12	5280	

- ✓ Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits à la cour de l'essai, la résistance à la fragmentation par choc s'exprime par :  $100m/M$ , cette quantité est appellés le coefficient Los Angeles du matériau.



Figure 6. Essai de Los Angeles.

## II. Essais de caractérisation du ciment

Il existe des essais de caractérisation qui se font sur le **ciment**, sur **pâte** (ciment + eau) et sur **mortier** normalisé (ciment + sable CEN + eau).

### II.1. Détermination de la masse spécifique du ciment à l'aide du densimètre NF NE 196-5

#### II.1.2. Mode opératoire

- ✓ Broyer 50 à 70 g de matériau à analyser et cribler à travers le tamis (broyer jusqu'à ce que 85% de la masse passe à travers le tamis) ;
- ✓ Sécher l'échantillon jusqu'à l'obtention d'une masse constante et laisser refroidir dans un dessiccateur ;
- ✓ Peser le densimètre rempli d'un liquide non réactif avec le ciment jusqu'à repère inférieur, soit  $M_{dem}$  ;
- ✓ Verser l'échantillon dans le densimètre jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le repère supérieur ;
- ✓ Peser le densimètre, soit  $M_{de}$  ;
- ✓ Calculer la masse spécifique d'après la formule suivante:

$$M_s = \frac{M_{dem} - M_{de}}{V}, g/cm^3$$

Ou :

$M_{dem}$ : masse de densimètre rempli d'eau et de matériau (g).

$M_{de}$  : masse de densimètre rempli d'eau(g).

$V$  : volume entre deux repères du densimètre (cm).

### II.2. La consistance normalisée Vicat NF NE 197-3

**Le But** : Cet essai a pour objet de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une pâte cimentaire bien mouillée. La quantité de mouillage du ciment est exprimée en pourcentage elle est déterminée sur l'appareil de Vicat muni de la sonde.

### II.2.2. Mode Opérateur

- ✓ On préparer 500 kg de ciment, une pâte pure de rapport E/C = 0,26.
- ✓ verser l'eau dans la cuve du malaxeur contenant le ciment
- ✓ Mettre le malaxeur en marche (voir le tableau qui suit pour la marche à suivre) et déclencher le chronomètre.
- ✓ la pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule
- ✓ Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

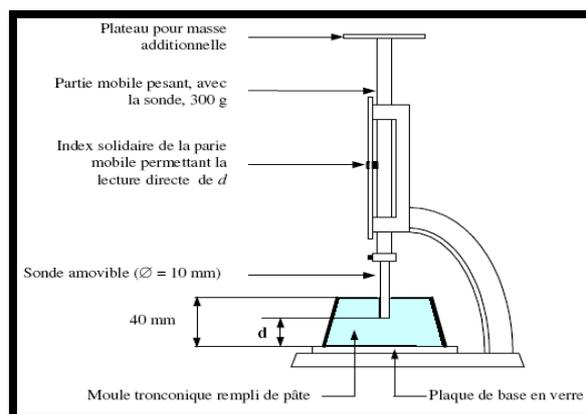
**Tableau 2.** Principe de l'opération par le Malaxeur

Opérations	Introduction du ciment	Introduction de l'eau	Mettre en route	Raclage de la cuve	Mettre en route
Durée des Operations	<b>5 à 10 s</b>		<b>90 s</b>	<b>15 s</b>	<b>90 s</b>
Etat du malaxeur	<b>Arrêt</b>		<b>Vitesse lente</b>	<b>Arrêt</b>	<b>Vitesse lente</b>

- ✓ Quand la sonde s'immobilise, ou au plus tard 30s après l'avoir relâchée, on mesure la distance ' d entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule. Cette distance d caractérise la consistance :
  - Si  $d = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$  : la consistance est la consistance normalisé.
  - Si d n'atteint pas cette valeur, il convient de refaire l'essai avec un rapport E/C différent jusqu'à atteindre la valeur recherchée.



**Figure 7.** Malaxeur normalisé.



**Figure 8.** Appareil de Vicat muni de la sonde.

### II.3. Mesure du temps du début et de fin de prise NF NE 196-3

**Le But :** Cet essai a pour but de suivre l'évolution de la pâte de consistance normalisée, car Il est nécessaire de connaître le début et fin de prise des pâtes de ciment (liant) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés.

#### II.3.1 Mode opératoire

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

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

#### NOTE :

- ✓ Le Début de prise est le temps qui s'écoule entre l'instant du gâchage et celui où l'aiguille ne pénètre pas jusqu'au fond du moule à 1 mm près.
- ✓ La Fin de prise est le temps au bout duquel l'accessoire annulaire cesse de laisser une trace sur l'éprouvette.



**Figure 9.** Appareil de Vicat muni par l'aiguille.

## II.4. Détermination de la finesse des moutures NF EN 196-6

### ➤ Principe

On détermine la surface spécifique d'un corps granulaire en mesurant la vitesse d'écoulement de l'air à travers ce corps; et cette surface massique caractérise la finesse de mouture.

Dans des conditions normalisées, faire passer, une certaine quantité de ciment ; mesurer le temps de passage, et en déduire la surface spécifique par application d'une formule empirique.

### ➤ Mode opératoire

- ✓ Le ciment est placé dans une cellule, dont le volume est limité par un piston (piston qu'on enlève lors de l'essai).
  - ✓ Cette cellule est placée dans l'ajutage conique d'un tube en verre formant nomètre en U; ce tube comporte 4 traits repère.
  - ✓ Le liquide de ce manomètre en U est inspiré par une poire munie d'une soupape, à l'extrémité d'un tube comportant un robinet.
  - ✓ L'air traverse le ciment, et le niveau du liquide baisse : chronométrer le temps que met le liquide à passer du 2<sup>ème</sup> au 3<sup>ème</sup> trait
  - ✓ Noter le temps ainsi que la température.
- La surface spécifique de Blaine est donnée par la formule:

$$S = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{1 - e} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1\eta}} \text{ (cm}^2\text{/g)}$$

D'où :

**K** : constante de l'appareil.

**e** : porosité du lit.

**t** : temps mesuré en seconde.

**ρ** : masse volumique du ciment en g/cm<sup>3</sup>

**η** : viscosité de l'air à la température de l'essai.



Figure 10. Perméabilimètre de Blaine.

## II.5. L'activité pouzzolanique

L'essai consiste à mesurer la quantité de chaux absorbée par 2g de l'échantillon durant 30 jours à la température ordinaire.

### ✓ Mode opératoire

On prend 2g de l'ajout minéral pulvérisé à une granulométrie inférieure à  $100\mu$ , dans un cylindre de 100ml avec un bouchon rodé, on y ajoute 100ml de solution de chaux (1,1g/l) on bouche et on agite.

La solution est conservée au repos pendant 24h, on prélève une prise de 50 ml de la solution que l'on titre avec une solution de HCl (0,05N) en présence de phénophtaléine. On ajoute dans le cylindre 50 ml de chaux et on répète l'opération comme précédemment chaque 2 jours pendant 30 jours.

- La quantité de chaux fixée pendant 30 jours par 2g de l'échantillon est:

$$Q_{CaO} = \frac{(16V_0 - (\sum_{i=1}^{14} V_{i=1} - 2V_{15}) \cdot N_{HCl} \cdot \text{meq.g CaO} \cdot 100}{2}$$

$V_0$  : volume de HCl nécessaire pour neutraliser 50ml de la solution de chaux.

$V_i$  : volume de l'ajout minéral.

$N_{HCl}$  : normalité de la solution de HCl :  $N_{HCl} = 0.05N$

meq.g.CaO: masse de l'équivalent gramme de CaO = 0.028.

**Tableau 3.** Classe d'additif selon la quantité de chaux absorbée.

La Classe d'additif	La quantité de chaux absorbée
Additif actif faible	30 à 50 mg /g
Additif actif moyen	50 à 70 mg /g
Additif actif moyen	70 à 100 mg /g
Additif actif fort	100 à 150 mg /g
Additif actif très fort plus	150 mg /g

**Figure 11.** Essai de l'activité pouzzolanique

### III. Mesure des résistances à la compression et à la traction NF NE 196-1

#### ➤ Objectif de l'essai

Il s'agit de définir les qualités de résistance d'une éprouvette de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est la nature du liant hydraulique ; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du liant utilisé.

#### ➤ Mortier normal

Le mortier normal est réalisé conformément à la norme EN196-1.

Le mortier est un mélange de sable normalisé CEM EN 196-1 et du ciment à tester gâchés avec l'eau dans les proportions suivantes :

- ✓ 450g ± 2g de ciment.
- ✓ 1350g ± 5g de sable normalisé.
- ✓ 225g ± 1g de l'eau.
- ✓ Le rapport E/C d'un tel mortier est donc 0,5.

#### ➤ Mode opératoire

- ✓ Avec le mortier préparé .On remplit un moule de 4x4x16.

- ✓ Le serrage du mortier dans le moule est obtenu en introduisant ce dernier en deux Couches et en lui appliquant 60 chocs à chaque fois.
- ✓ L'excès du liant est enlever avec une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide.
- ✓ En laisse sèche pendant 24h puis ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau à  $20C^{\circ} \pm 1 C^{\circ}$  jusqu'au moment de l'essai de rupture.
- ✓ Au jour prévu, les éprouvettes sont rompues en flexion et en compression
- ✓ Le Calcul de la résistance du matériau à la compression est donné par la formule :

$$R_c = \frac{F}{S} \text{ MPa}$$

Avec :

**R** : résistance à la compression (Mpa).

**F** : la force appliquée (N).

**S** : La surface de l'éprouvette (mm)



**Figure 12** : A gauche la machine d'essai de résistance à la flexion, et à droite la machine d'essai à la compression pour le mortier.

## IV. Compagne d'essai à l'état frais et durci du béton autoplaçant BAP

### IV.1. Malaxage

Le malaxage de béton est réalisé avec un malaxeur à axe verticale (Figure 13) et mouvement planétaire de capacité 60 litre, Ce type de malaxeur est très efficace et fournit dans la plupart des cas un béton très homogène. la procédure de malaxage est la suivante :

Placer les constituants par ordre : gravier 8/15 + gravier 3/8 + les sables + ciment et fillers dans le malaxeur pendant une (01) minute malaxage sec.

Introduire ensuite le 1/3 d'eau et d'adjuvant pendant 30 secondes.

Introduire la quantité restante d'eau 2/3 est malaxer pendant deux (02) minutes. Pour chaque série, en utilisant la même gâchée.



**Figure 13.** Malaxeur de béton.

### **IV.2. Caractérisation d'ouvrabilité des mélanges à l'état frais**

La caractérisation à l'état frais des bétons s'est limitée aux essais recommandés par l'Association Française de Génie Civil (AFGC).

- ✓ L'ouvrabilité des bétons autoplaçants se décompose en trois caractéristiques.
- ✓ La mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement).
- ✓ La mobilité en milieu confiné (décrit par la boîte en L).
- ✓ La stabilité (résistance à ségrégation et ressuage).

#### **IV.2.1. L'essai d'étalement NF NE 12350-8**

Il s'agit de démouler un cône normalisé (cône d'ABRAMS) de béton frais et de mesurer le diamètre de la galette de béton obtenue. Il faut rappeler qu'est considéré comme autoplaçant, un béton qui forme une galette d'un diamètre compris entre 60 et 75 centimètres. Pour les BAP, des temps d'écoulement intermédiaires ont été mesurés. Il s'agit du temps nécessaire.



**Figure 14.** Essai de l'étalement.

#### **IV.2.2. L'essai de la boîte en L NF NE 12 350-9**

L'essai de la boîte en L (Figure 15) est effectué pour le béton autoplaçant. Il permet d'évaluer le risque de blocage et la capacité de remplissage du béton en milieu confiné.

On mesure hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton (H1 et H2). Le rapport H2/H1 doit être supérieur à 0.80, l'essai en outre permet de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures.



**Figure 15.** Essai de la boîte en L.

#### **IV.2.3. L'essai de stabilité au tamis NF NE 12 350-11**

Il consiste à mesurer la proportion d'éléments fins de béton ( laitance ) passant au travers d'un tamis d'ouverture 5 mm ( Figure 16) pour qualifier le béton vis-à-vis du risque de ségrégation et de réduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non.

-Le pourcentage de laitance qui est passé au travers du tamis est calculé selon l'expression suivante :

$$\Pi = \frac{\text{Plaitance}}{\text{Péchantillon}} \times 100\%$$

-Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes :

- ✓  $0\% < \pi \text{ Laitance} < 15\%$  : stabilité satisfaisante.
- ✓  $15\% < \pi \text{ laitance} < 30\%$  : stabilité critique.
- ✓  $\pi \text{ Laitance} > 30\%$  : stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).



**Figure 16.** Essai de stabilité au tamis.

#### IV.2.4. La masse volumique

La masse volumique du béton frais doit être systématiquement mesurée. Cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse volumique théorique. Elle est mesurée par la pesée d'un récipient de 3 litres, remplis de béton sans vibrer (Figure 17).

La densité est déduite par l'application de la formule suivante :

$$M_V = (m_2 - m_1) / V \quad (\text{Kg/m}^3)$$

$M_V$  : la masse volumique du béton frais en ( $\text{Kg/m}^3$ ).

$m_1$  : la masse volumique du récipient vide en ( $\text{Kg}$ ).

$V$  : le volume du récipient utilisé en ( $\text{m}^3$ ).



**Figure 17.** Mesure de la masse volumique des bétons à l'état frais.

### IV.3. Confection et conservation des éprouvettes pour l'essai de résistance NF NE 12390-2

Cette étude expérimentale comprend deux types d'essai devant être effectués à des échéances bien précises, chaque type d'essai nécessite plusieurs éprouvettes.

✓ **Essai de compression**

Deux éprouvettes cylindriques (16x32) pour chaque formulation.

✓ **Essai de traction par flexion**

Trois éprouvettes prismatiques (7x7x28) pour chaque formulation.

#### IV.3.1. Remplissage

Le remplissage (Figure 18) se fait en deux ou trois couches successives suivant les dimensions des moules, la finition de surface est effectuée à l'aide d'une règle.

Après mise en place du béton dans les moules, ils sont laissés pendant 24 heures dans la salle à température ambiante, après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées.



**Figure 18.** Remplissage des éprouvettes.

#### IV.3.2. Conservation

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau (Figure 19) à une température ambiante (20°C), jusqu'au moment de l'essai qui s'effectue à 7 et 28 jours.



**Figure 19.** Conservation des éprouvettes dans un bac d'eau.

### IV.3.3. Caractérisation des mélanges à l'état durci

#### IV.3.3.1. La masse volumique

Avant de commencer les essais sur le béton durci, on mesure la masse volumique (7j et 28j) (Figure 20):

$$M_v = M/V \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

où :  $M$  : La masse moyenne de 3 éprouvettes,  $V$  : le volume de l'éprouvette.



**Figure 20.** Mesure de la masse volumique à l'état durci.

#### IV.3.3. Surfaçage des éprouvettes NF EN 12390-3

Attendre 30 min avant l'essai, les éprouvettes destinées aux essais de caractérisation traditionnelle (16x32 cm) pour les essais de compression sont surfacées par un coulis (0% de soufre et 50% de sable siliceux selon la norme NF EN 12390-3).

L'opération de surfaçage (Figure 21) permet d'obtenir des surfaces planes parallèles et perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette.



**Figure 21.** Surfaçage des éprouvettes de béton.

#### IV.3.3.3. Essai de compression NF NE 12390-3

Il s'agit de déterminer la contrainte de compression  $\sigma$  conduisant à l'écrasement d'une éprouvette de béton. Il s'effectue sur des éprouvettes cylindriques (16x32 cm).

La résistance à la compression correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante :

$$\sigma = F/S \text{ (KN/cm}^2\text{)}$$

Où  $F$  : la force appliqué en (KN).

$S$  : la surface de la section de l'éprouvette en (cm)



**Figure 22.** Essai de compression.

#### IV.3.3.4. Essai de traction par flexion NF NE 12390-5

L'essai de traction par flexion (Figure 23) est effectué sur des prismes de sections carrées (7x7x28 cm). Le prisme est placé dans une machine d'essai flexion et est soumis à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La résistance à la traction par flexion est donnée par l'équation suivante :

$$F_{cf} = 3 \times F \times L / 2 \times (d)^3 \quad (\text{KN/cm}^2)$$

Où :

F : La force appliquée en (KN).

L : l'écartement entre les rouleaux d'appui, en (mm) .

D : L dimension de la section de l'éprouvette, en (mm).



**Figure 23.** Essai de traction par flexion.

# BIBIOGRAPHIE

---

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] Khayat K.H., Viscosity-Enhancing Admixture for cement-based materials-And overview, Cement and Concrete Composites, 20, pp.171-188, (1998).
- [2] Chekireb.S, Valorisation de la poudre de verre dans le béton autoplaçant, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, (Québec) Canada, Juillet 2015.
- [3] Collection Technique CIM béton, Fiches Techniques, Tome 2, Les bétons : Formulation, fabrication et mise en œuvre, Edition octobre 2006.
- [4] Rissel Kheifa.M, Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants, thèse de doctorat, 2009.
- [5] GHERNOUTI.Y, Cours durabilité de béton. Boumerdès, 2012.
- [6] Francois.D, Pineau.A, Zaoui.A, Comportement mécanique des matériaux Elasticité et lasticité, Editions Hermes, 1995.
- [7] European standard norme européenne européenne norm, Composition, specifications and conformity criteria for common cements, juin 2000.
- [8] Mme Benakli.s, Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction, Mémoire de Magistère, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [9] Compact C., Etude des interactions entre les phases modèles représentatives d'un ciment Portland et des superplastifiants du béton, Thèse de Doctorat en chimie-physique, Université de Bourgogne-UFR des Sciences et techniques, Ecole doctorale Carnot; le 8 Octobre 2004.
- [10] ACI, Processes, Self-Compacting Concrete, Advanced Concrete Technology III, 203.9/3, 2003.
- [11] Kara-Ali.R, Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaire, Thèse de Doctorat, Université cergy Pontoise, décembre 2002.
- [12] Neville.A.M, ''Propriétés des bétons'', Edition Eyrolle, 2000.
- [13] Boubekour.M. Kelanemer,A. Contribution à l'étude de l'influence des superplastifiants et des ajouts minéraux sur le comportement physicomécanique et rhéologique des bétons autoplaçants (BAP), mémoire de fin d'étude 2015.
- [14] Meziani Salah Eddine, Lemmou El Mehdi, Réparation d'un béton endommagé avec un BAP à base des fibres de récupération, Mémoire de fin d'étude, université de Boumerdes FSI, 2015.
- [15] Site web: [fr.wikipedia.org/wiki/Marbre](http://fr.wikipedia.org/wiki/Marbre).
- [16] Meme.Belkhadem.F, Effet des différents adjuvants sur la performance du béton, Enseignante Chercheur chez Université d'Oran.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [17] Walraven.J, Structural aspect of self compactin concrete, Proceeding of the fourth CANMET/ACI/ JCI International Symposium: Advance in Concrete Technology, Tokushima, Japon, 1998.
- [18] Projet Région Amélioration des constructions par la maitrise des BAP'',Conseil régional Midi-Pyrénées dans la thématique de recherche,L'homme et sa région,2005.
- [19] Grunewald.S. Walraven, J.C'',Rheological Measurement son Self-compacting Fibre reinforced concrete, Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Island,pp.49-58,2003.
- [20] Nielsson.I, Wallewick.O.H, Rheological Evaluation of some empiric methods-preliminary results, Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande,pp.59-68,2003.
- [21] Utsi.S, Emborg.M, Carsward.J, Relation between Workability and Rheological parameters, Proceeding of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande,pp.154-164,2003.
- [22] Bui.V.K., Akkaya.Y, Shah.S.P, Rheological Mode for self-consolidating concrete, ACI Materials Journal, 99,6, pp. 549-559, november-décembre 2002.
- [23] Turcry, Retrait et fissuration des bétons autoplaçants-influence de la formulation, thèse de doctorat de L'Ecole central de Nantes.
- [24] Bouafia.Y,Four.B ,Kachi.M.S, Proposition d'une relation contrainte déformation pour le béton armé de fibres d'aciers ,séminaire National de Génie-civil M'sila, 16,17 novembre 1997.
- [25] Cherait.Y, Optimisation de la composition des bétons renforcés de fibres en fonte amorphe, séminaire National de Génie-civil, M'sila, 16, 17, novembre1997.
- [26] Pierre.R, Les bétons de fibres métalliques, presses Ponts et Chaussées.
- [27] Meziani.S.D, Lemmou.M, Réparation d'un béton endommager avec un BAP a base des fibres de Récupération, mémoire fin d'étude, Université m'hamed Bougara-Boumerdes, 2015-2016.
- [28] Benyahia.A, L'influence des fibres métalliques sur le comportement mécanique du béton, thèse de magister, centre universitaire Mohamed Boudiaf m'sila, 2001.
- [29] Mokhfi.M, Bagha.A, Etude des propriétés physico-mécanique du béton fibré ultra performant contenant la chamotte, Mémoire fin d'étude, Universite m'hamed bougara-Boumerdès ,2015-2016.
- [30] Richane.S, Prise en compte de l'orientation des fibres dans une poutre continue à matrice de béton, thèse de Magister ,université mohamed boudiaf m'sila,2004.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [31] Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton.
- [32] Casanova P. Bétons renforcés de fibres métalliques : du matériau à la structure, Thèse de Doctorat, Laboratoire National des Ponts et Chaussées, 203p, 1996.
- [33] Miloud.B, Permeability and porosity characteristic of steel fibre reinforced concrete, Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), vol 6, n° 4, 2005.
- [34] Benkechkache.G, Étude de comportement diffère des bétons autoplaçants influence des paramètres de composition et de chargement, thèse de Magister, Université Mentouri Constantine. Novembre, 2007.
- [35] Grünwald.S, Performance-based design of self-compacting fibre-reinforced concrete, PhD Thesis, 2004.
- [36] Yagoub.M, Evaluation de la qualité du béton de fibres in situ cas de béton autoplaçant avec des fibres mixtes, thèse de maitrise, Université Mohamed Khider – Biskra ,2009.