



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

---

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

---



Polytechnique, 1<sup>er</sup> Partenaire  
des Professionnels

*Département : Science des Matériaux et Métallurgie*

*Option : Science et Ingénierie des Matériaux*

***Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention***

***du Diplôme d'Ingénieur Matériaux***

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DU  
BETON AUTOPLACANT  
INCORPORE DE FIBRES DE  
BAMBOU**

**Présenté par :** *MAHITAVELO Zafindro Andréas Delphin*

**Soutenu :** *Le 23 Décembre 2013*

**Rapporteur :** *Professeur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely*

PROMOTION 2012



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

---

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

---



Polytechnique, 1<sup>er</sup> Partenaire  
des Professionnels

*Département : Science des Matériaux et Métallurgie*

*Option : Science et Ingénierie des Matériaux*

***Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention  
du Diplôme d'Ingénieur Matériaux***

# CONTRIBUTION A L'ETUDE DU BETON AUTOPLACANT INCORPORE DE FIBRES DE BAMBOU

**Présenté et soutenu par :** MAHITAVELO Zafindro Andréas Delphin

**Membres du jury :**

*Président : Professeur Titulaire ANDRIANARY Philippe Antoine*

*Examineurs :*

- *Docteur RANDRIANARIVELO Frédéric*
- *Docteur RANARIVELO Michel*
- *Docteur RAKOTOMALALA Zolimboahangy*

**Rapporteur :** *Professeur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely*

**Encadreur professionnel :** *Docteur RANDRIAMALALA Tiana Richard*

PROMOTION 2012

## REMERCIEMENTS

Si ce travail a abouti, c'est grâce à la bénédiction et à la bienveillance de DIEU Créateur, Tout-Puissant de la terre et du ciel, qui m'a donné santé, force et courage durant la réalisation de cet ouvrage. Je me permets d'exprimer mes reconnaissances et mes respects à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA) et plus particulièrement à l'endroit de:

- Professeur Titulaire *ANDRIANARY Philippe*, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ; pour tous les efforts qu'il a déployés pour bien mener nos études au sein de l'Ecole ;
- Professeur *RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely*, Responsable de la formation doctorale au sein du Département Science des Matériaux et Métallurgie à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo; pour l'effort qu'il a consacré pour bien mener ses encadrements et ces précieux conseils.
- Les honorables membres de Jury de ce mémoire :
  - Docteur *RANDRIANARIVELO Frédéric*, Maître de conférences, Chef du département SMM.
  - Docteur *RANARIVELO Michel*, Maître de conférences, enseignant chercheur au sein du Département SMM de l'ESPA ;
  - Docteur *RAKOTOMALALA Zolimboahangy*, Maître de conférences, enseignant chercheur au sein du Département SMM de l'ESPA ;
  - Docteur *RANDRIAMALALA Tiana Richard*, Maître de conférences, Responsable Recherche et Matériaux au sein du LNTPB pour ses disponibilités et ses conseils dispensés tout au long de l'élaboration de cet ouvrage.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements au Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment pour m'avoir accueilli pour permettre d'effectuer mon projet d'Etude. Et je remercie également l'ensemble du personnel de ce laboratoire pour leur accueil et pour la disponibilité dont ils ont fait preuve à mon égard.

Egalement, un grand merci à l'équipe enseignante de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo pour la qualité de l'enseignement qui nous a été dispensé, ainsi qu'à tous mes amis sur qui je pourrai toujours compter et notamment pour leurs soutiens et leurs bonnes humeurs dans les bons et les mauvais moments.

Enfin, je remercie tout particulièrement mes parents, mon frère et mes sœurs, qui étaient à mes côtés tout au long de ce travail. C'est grâce à leur amour, leur soutien et leur courage que j'en suis là aujourd'hui. Je leur dédie ce manuscrit en gage de ma reconnaissance.

***Sincères remerciements***

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>AFNOR :</b>	Association Française de la Normalisation
<b>Ar :</b>	Ariary
<b>BAP :</b>	Béton Autoplaçant
<b>BAN :</b>	Béton Autonivelant
<b>BAPF :</b>	Béton Autoplaçant Fibré
<b>BO :</b>	Béton Ordinaire
<b>BV :</b>	Béton Vibré
<b>C :</b>	volume du ciment
<b>Cv :</b>	Coefficient volumétrique
<b>CPA :</b>	Ciment Portland Artificiel
<b>D<sub>max</sub> :</b>	Diamètre maximale
<b>e<sub>g</sub> :</b>	volume d'eau de gâchage
<b>ES :</b>	Equivalent de Sable
<b>ESV :</b>	Equivalent de Sable à Vue
<b>E/C :</b>	rapport Eau sur Sable
<b>f :</b>	volume des fines
<b>f<sub>CE</sub> :</b>	classe vraie du ciment (à 28 j)
<b>f<sub>c28</sub> :</b>	résistance moyenne en compression désirée (à 28 j)
<b>FM :</b>	Fibre Métallique
<b>FS :</b>	Fibré Synthétique
<b>g :</b>	volume de graviers
<b>G/S :</b>	rapport Gravillon sur Sable
<b>L :</b>	liant équivalent
<b>MA :</b>	Module d'Alumine
<b>MC :</b>	Module de Chaux
<b>MS :</b>	Module de Silice

<b>NF :</b>	Norme Française
<b>NM :</b>	Norme Malagasy
<b>s :</b>	volume de sable
<b>S<sub>p</sub> :</b>	Super plastifiant
<b>v :</b>	volume des vides
<b>V<sub>f</sub> :</b>	Volume en fibre
<b>γ :</b>	Compacité
<b>Δ<sub>Th</sub> :</b>	densité théorique
<b>C<sub>2</sub>S :</b>	Bélite
<b>C<sub>3</sub>S :</b>	Alite
<b>C<sub>3</sub>A :</b>	Célite
<b>C<sub>4</sub>F :</b>	Alumino Ferrite
<b>KN :</b>	Kilo Newton
<b>M<sup>3</sup> :</b>	Mètre cube
<b>γ<sub>a</sub> :</b>	masse volumique apparente
<b>γ<sub>s</sub> :</b>	masse spécifique

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableaux 1</b> : Propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales .....	20
<b>Tableaux 2</b> : Composition chimique du ciment CEMII/A-V 42.5 N.....	32
<b>Tableaux 3</b> : Composition minéralogique potentielle du ciment .....	33
<b>Tableaux 4</b> : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.....	33
<b>Tableaux 5</b> : Caractéristiques chimiques de la cendre de balle de paddy.....	34
<b>Tableaux 6</b> : Analyse granulométrie du sable 0/3.....	37
<b>Tableaux 7</b> : Analyse granulométrie du gravillon 3/8.....	38
<b>Tableaux 8</b> : Analyse granulométrie du gravillon 8/20.....	38
<b>Tableaux 9</b> : Equivalent du sable.....	43
<b>Tableaux 10</b> : Masse volumique apparente du sable 0/3.....	48
<b>Tableaux 11</b> : Masse volumique apparente du gravillon 3/8.....	48
<b>Tableaux 12</b> : Masse volumique apparente du gravillon 8/20.....	49
<b>Tableaux 13</b> : Poids spécifique du sable 0/3.....	50
<b>Tableaux 14</b> : Poids spécifique du gravillon 3/8.....	51
<b>Tableaux 15</b> : Poids spécifique du gravillon 8/20.....	51
<b>Tableaux 16</b> : Matière organique dans les fibres de bambou.....	55
<b>Tableaux 17</b> : Matière minérale dans les fibres de bambou.....	55
<b>Tableaux 18</b> : Dimension des fibres.....	56
<b>Tableaux 19</b> : Propriétés physiques et mécanique des fibres de bambou.....	56
<b>Tableaux 20</b> : Caractéristiques de l'eau de JIRAMA.....	57
<b>Tableaux 21</b> : Composition d'un mètre cube de béton autoplaçant.....	62
<b>Tableaux 22</b> : Evolution de l'étalement en variant le dosage en eau.....	63
<b>Tableaux 23</b> : Caractéristiques rhéologiques du BAP.....	64
<b>Tableaux 24</b> : Résultats obtenus à l'état durci .....	66

<b><u>Tableaux 25</u></b> : Résultats de l'essai sur les BAP fibré à l'état frais .....	65
<b><u>Tableaux 26</u></b> : Résultats obtenus à l'état durci.....	66
<b><u>Tableaux 27</u></b> : Prix d'un mètre cube de BAPF.....	76
<b><u>Tableaux 27</u></b> : Prix d'un mètre cube de BO.....	77



## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Constituant des bétons.....	2
<b>Figure 2</b> : Essai d'étalement au cône (slump flow).....	10
<b>Figure3</b> : Essai de la boîte en L.....	11
<b>Figure 4</b> : Essai de stabilité au tamis.....	12
<b>Figure 5</b> : Mesure de la résistance à la compression.....	13
<b>Figure 6</b> : Les différentes formes de fibres.....	18
<b>Figure 7</b> : Courbe granulométrique du sable 0/3.....	38
<b>Figure 8</b> : Courbe granulométrique du gravillon 3/8.....	39
<b>Figure 9</b> : Courbe granulométrique du gravillon 8/20.....	40

## LISTE DES PHOTOS

<b><u>Photo 1</u></b> : Bambou.....	54
<b><u>Photo 2</u></b> : Etalement du béton.....	64
<b><u>Photo 3</u></b> : Essai à la boîte.....	67

## **SOMMAIRE**

**Remerciement**

**Liste des abréviations**

**Liste des tableaux**

**Liste des figures**

**Liste des photos**

**Introduction générale**

### **PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

**Chapitre I : BETON AUTOPLACANT**

**Chapitre II : LES BETONS DE FIBRE**

**Chapitre III : LES BETONS AUTOPLAÇANT S FIBRES**

### **PARTIE II : ETUDES EXPERIMENTALES**

**Chapitre IV : CARACTERISATION DES MATERIAUX D'EXPERIMENTATION**

**Chapitre V : COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES BETONS AUTOPLACANTS**

**Chapitre VI : ETUDES DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX-ECONOMIQUES**

**CONCLUSION GENERALE**

**REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE**

**ANNEXES**

**TABLE DES MATIERES**

## INTRODUCTION GENERALE

Beaucoup de structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle.

Afin d'adapter les bétons à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des années dans le but de développer des formulations de bétons se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (ségrégation, ressuage et tassement faibles), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité. Ces bétons désignent des bétons très fluides, homogènes et stables, mis en place sans vibrations. Leur compaction s'effectue par le seul effet gravitaire. Ils confèrent à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration d'où le qualificatif d'autoplaçant ou d'auto nivelant. On parle de béton autonivelant (BAN) pour les dalles et toutes les parois horizontales et de béton autoplaçant (BAP) pour les murs et toutes les parois verticales.

Ces nouveaux bétons dits « autoplaçants » consomment un minimum d'énergie lors de leur mise en œuvre. Ils coulent presque tout seuls, sans qu'il soit nécessaire de recourir à des moyens dont les fortes vibrations mécaniques, sonores, sont nuisibles pour les personnels qui les utilisent.

Le béton autoplaçant (BAP) permet de remplir des coffrages complexes où la densité en ferrailage est importante. Pour cela, les BAP doivent avoir des propriétés bien déterminées à l'état frais à savoir la fluidité, la capacité de remplissage et la résistance à la ségrégation. Pour assurer la stabilité rhéologique, l'utilisation des additifs comme les cendres de balles de paddy s'avère nécessaire. Néanmoins le BAP a un comportement fragile. Pour tenter de remédier à cet aspect négatif, on a imaginé plusieurs procédés dont celui d'armer le béton par l'intermédiaire de barre d'acier (Béton armé classique). Un autre procédé consiste à éviter de faire travailler le béton en traction grâce à une compression préalable : c'est le béton précontraint. A l'inverse du rôle des armatures passives et de précontraints, il existe actuellement une grande variété de matériaux composites. La plus part sont destinés à des industries de pointe, celles-ci utilisent des composites constitués de fibres de carbone, d'alumines, végétales etc..... dans des matrices minérales à base de liants hydrauliques.

Nous rencontrons aujourd'hui plus spécialement dans le bâtiment et travaux publics un produit dont les constituants, le mode de fabrication et le comportement correspondent à ceux des matériaux composites. Il s'agit du béton de fibres composé d'une matrice cimentaire et des fibres apportant une armature à celle-ci.

L'objectif d'obtenir un béton autoplaçant plus résistant en flexion et en traction fait l'objet de nombreuses recherches. La voie la plus évoquée dans la littérature pour pallier à cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibre dans la formulation du béton. Ces fibres jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macro fissuration. Ils ont aussi la capacité de contrôler l'ouverture des fissures, jouant le rôle d'absorbeurs d'énergie.

Plusieurs types de fibres sont utilisés dans le renforcement des bétons, notamment : les fibres d'acier, de polymère, de carbone et végétales.

Le renforcement par les fibres végétales a un avenir promoteur et spécialement pour notre pays, qui dispose d'énormes ressources en fibres végétales, malheureusement, leur valorisation dans les domaines pratiques, entre autre dans les matériaux de construction est encore peu exploitées.

Cette prise de conscience nous a conduits à choisir le thème de mémoire intitulé : « Contribution à l'étude du béton autoplaçant incorporé de fibres de bambou ». Ainsi, ce projet peut s'inscrire dans le contexte d'une politique de développement durable.

L'objectif de ce travail consiste à apporter notre contribution à la valorisation des ressources locales, en l'occurrence les fibres végétales de bambous, provenant d'une source renouvelable. Mais actuellement le plus grand problème qui limite l'utilisation des fibres végétales dans le béton est leur faible résistance aux alcalis cimentaires. Ainsi, le présent travail s'intéresse, à l'étude de la durabilité des bétons autoplaçants renforcés par des fibres de bambou, ainsi qu'à l'influence des cendres de balles de paddy sur le comportement des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci.

Le mémoire s'articule sur deux grandes parties :

- La première partie à dominante bibliographique, se décompose en trois chapitres :
  - Le premier chapitre traite le béton autoplaçant;
  - Le deuxième chapitre parle du béton fibré ;

- Le troisième chapitre concerne le béton autoplaçant fibré.
- La deuxième partie de ce travail est consacré à l'étude expérimentale, elle est structurée comme suit :
  - Le quatrième chapitre décrit la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques ;
  - Le cinquième chapitre parle de l'étude du comportement rhéologique des bétons autoplaçants ;
  - Le sixième chapitre essaie de montrer les avantages économiques et environnementaux de notre projet.

PARTIE I :

*ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE*

## **Chapitre I : BETON AUTOPLACANT**

### **I. 1. GENERALITES**

#### **I. 1. 1. Historique**

Le béton est utilisé par l'ensemble des grandes civilisations pour construire des ouvrages. Tout d'abord les grecs qui ont utilisé un mortier de chaux, puis les romains qui ont développé le ciment pouzzolanique formé de chaux, de briques concassées et de poussières de cendres volcaniques. Ce mélange avait la particularité de pouvoir faire prise sous l'eau. Les romains ont érigé de nombreux ouvrages célèbres avec ce matériau comme le Colisée, le Panthéon ou encore le Pont du Gard. [23]

La technologie du béton a ensuite peu évolué jusqu'à ce qu'en 1756, John Smeaton, dans le cadre de la reconstruction du phare d'Eddystone Rock, s'intéresse aux origines des chaux utilisées en association avec différents types de pouzzolanes ([Smeaton, 1793] cité par [Hewlett, 1988]). Le béton a alors connu une évolution rapide pour devenir le matériau que nous connaissons aujourd'hui. En 1818, Louis Vicat développe les premières chaux hydrauliques artificielles à partir d'argiles et de calcaires calcinés. Puis, en 1824 Joseph Aspin produit le premier ciment Portland fait d'un mélange de chaux fine pulvérisée et d'argiles, porté à hautes températures. Même si l'association entre matériau cimentaire et acier apparaît en 1850 grâce à J. Monier qui développe un mortier armé, elle ne sera utilisée avec succès que lors de la construction du premier pont en béton armé en 1889 (le Lake Alford Bridge). Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, en parallèle de la mise au point du béton précontraint (1929), Eugène Freyssinet met en avant l'effet bénéfique de la vibration pour la mise en place des bétons fermes à l'état frais. Si les outils utilisés pour le compactage des bétons se sont perfectionnés, l'étape de la mise en place des bétons frais est primordiale pour l'obtention d'une bonne qualité des bétons durcis. Son importance est accentuée avec l'évolution des structures vers la complexité des formes et, par conséquent, des ferraillements. La généralisation des adjuvants chimiques, tels que les super plastifiants, dès le début des années 80 permet d'allier facilité de mise en place et amélioration des performances du béton formulé avec une plus faible quantité d'eau et une compacité optimisée du squelette granulaire. [23]

Néanmoins, l'amélioration des performances avec l'utilisation de nouveaux constituants dans les dernières décennies ne modifie pas le caractère viscoplastique du béton à l'état frais



qui nécessite toujours un apport d'énergie pour sa mise en place. Ainsi, les performances attendues du matériau restent entièrement dépendantes du soin apporté à sa mise en œuvre.

Le contexte japonais, au début des années 80, nécessitait de limiter, voire de s'affranchir de l'intervention humaine à la mise en place afin de garantir les performances du béton et l'assurance qualité des constructions. C'est ainsi qu'en 1986, les recherches d'Ozawa et al [Ozawa, 1989] conduisirent à la première publication sur un béton qui se met en place sous le seul effet de la gravité, le béton autoplaçant (BAP).

### I. 1. 2. Définition

Les bétons autoplaçants sont des bétons très spéciaux, ils sont très fluides, très déformables, homogènes et stables. Ils se mettent en place par l'unique effet de la gravité, sans l'utilisation de moyen de vibration et épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes [3]. Ils ne doivent pas subir de ségrégation et doivent présenter des qualités comparables à celles des bétons vibrés classiques.

### I. 1. 3. Composition

Le béton autoplaçant est un matériau hétérogène, il contient deux constituants de plus qu'un béton ordinaire. Ces six (6) composants sont le ciment, l'eau, le sable, les gravillons, un additif (fine), et un superplastifiant.

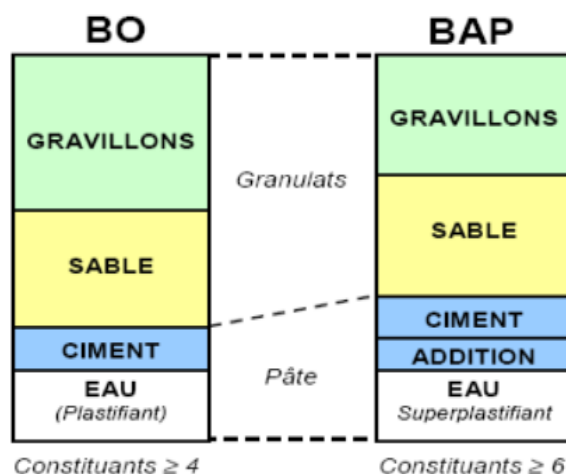


Figure 1 : constituant des bétons

### ***1.1.3.1. Ciment :***

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui est mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.[16]

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20%. [1]

Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de la clinkérisation sont :

- Le silicate tricalcique, 3CaO.SiO<sub>2</sub>, que l'on écrit C<sub>3</sub>S ;
- Le silicate bicalcique, 2CaO.SiO<sub>2</sub>, que l'on écrit C<sub>2</sub>S ;
- L'aluminate tricalcique, 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que l'on écrit C<sub>3</sub>A ;
- L'alumino-ferrite tétra-calcique, 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que l'on écrit C<sub>4</sub>AF.

Suivant la carrière d'origine et les performances recherchées, le clinker est constitué de 62% à 67 % de chaux combinée (CaO), de 19 % à 25 % de silice (SiO<sub>2</sub>), de 2 % à 9 % d'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), et de 1% à 5 % d'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Le ciment peut être constitué aussi de laitier de haut fourneau (S), de pouzzolane naturelle (Z), de cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W), de fumée de silice (D), de calcaire (L), de schistes calcinés (T), de constituants secondaires, de sulfate de calcium (gypse, anhydrite) et d'additifs. [2]

En principe tous les ciments conformes à la norme NF EN 197-1 conviennent pour la fabrication des BAP. Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton autoplaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-

CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts.

### ***1. 1. 3. 2. Les granulats***

Les « granulats » sont les matières grenues de nature, de forme et de grosseur diverses qui entrent dans la composition des bétons, par exemple sable, graviers ou cailloux. [17]

La nature du matériau est caractérisée par la roche ou les produits constituant les grains : basalte, porphyre, quartzite, silex, calcaire, silico-calcaire, grès, barytine, magnétite, pyrite, laitier expansé ou non, argile ou schiste expansé, ponce etc.

Le granulat peut être un produit naturel obtenu par criblage (type roulé à grains plus ou moins arrondis) ou un produit de concassage (type concassé à grains plus ou moins anguleux).

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

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 (par exemple des fillers calcaires) 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 exprimé en masse est de 1 dans un BAP. Le risque de blocage dans un milieu fortement ferrailé augmente lorsque le  $D_{max}$  augmente. Ainsi, le  $D_{max}$  des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm.

### ***1. 1. 3. 3. Les fines***

Les fines sont des matériaux qui, combinés au ciment Portland, contribuent aux propriétés des coulis frais et durcis par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois. Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les fumées de silice, les cendres de balle de riz en sont des exemples courants. [

Ces ajouts sont incorporés aux mélanges de coulis ou 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 ;
- Favorise la pénétrabilité dans les fissures fines : certains de ces ajouts sont plus fins que le ciment (fumée de silice).

### ***I. 1. 3. 4. L'eau de gâchage :***

Comme eau de gâchage, on ne doit utiliser que des eaux reconnues acceptables, compte tenu des usages. Quand il n'y a pas d'antécédent, les eaux doivent être analysées pour déterminer le pH, le teneur en acide carbonique, en sulfates, en chlorures et en autres sels ou impuretés.

L'eau doit être propre, pratiquement exempte de matière organique, de produits chimiques susceptibles de nuire à la durabilité de l'ouvrage. [24]

Les eaux potables conviennent pour la gâchée d'un béton. Mais les eaux de rinçage de bétonnières sont habituellement utilisables avec une vérification de leur aptitude (changement de ciment, adjuvants). Il en est de même pour les eaux de ruissellement, les eaux pompées ou surtout de rejets industriels traitées.

Les eaux usées et eaux de vannes ou contenant des détergents ne doivent en aucun cas être utilisées.

### ***I. 1. 3. 5. Les super plastifiants :***

Les super plastifiants sont des polymères à chaînes macromoléculaires très longues. Ils interagissent avec les particules de la poudre au contact de l'eau en s'adsorbant à leur surface. Les particules sont dispersées par la combinaison d'effets de répulsion électrostatiques et stériques. [20] L'eau initialement piégée entre les floes est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange. L'utilisation des super plastifiants permet ainsi d'obtenir des bétons très fluides à faible rapport E/C. L'ajout de super plastifiants engendre, à partir d'un certain dosage une diminution du seuil d'écoulement du BAP se traduisant par une augmentation de l'étalement.

Quelquefois on emploie simultanément les super plastifiants avec un agent de viscosité qui sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, ...Il interagit avec l'eau et augmente la viscosité de celle-ci.

### I. 1. 4. 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.

Ils 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 des géométries complexes: voiles courbes, etc.;
- des voiles minces et de grande hauteur: piles de ponts, etc.;
- des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures;
- des exigences architecturales et de qualité des parements particulières;
- des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration.

Ils constituent donc une alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction : bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation, etc.

### I. 2. FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS :

Formuler un béton, c'est de trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné.

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée est celle dite Dreux-Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique des mélanges sables/gravillons sur une courbe de référence.

Pour formuler un BAP, la méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les additions ni éventuellement les adjuvants plastifiant, ou superplastifiant. Chaque constituant a sa propre influence sur les caractéristiques du BAP.

Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail de la formulation :

- le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- le volume de pâte varie entre 330 à 400 L/m<sup>3</sup>.
- la masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE, soit en général de 300 à 350 kg/m<sup>3</sup>. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 à 200 kg/m<sup>3</sup>.
- le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

Il existe des techniques de formulation moins empiriques. On présente ci-dessous une revue des grandes familles d'approches.

- [Approche japonaise :](#)

La formulation des BAP par l'approche japonaise se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats [22]. 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 m<sup>3</sup> de béton est limité à la moitié de sa compacité.

**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 granulaire.

**Dosage du liant :** La résistance à la compression du BAP peut être calculée par la formule de Bolomey :

$$f_{c28} = G f_{CE} \left( \frac{L}{E} - 0.5 \right)$$

## ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Où L est le liant équivalent et se compose de ciment C et d'une partie d'additions minérales F, soit  $L = C + kF$ .

La fourchette du rapport  $F/(C + F)$  est de [20%, 25%], d'où :

$$F = mC, m \in [0.25 ; 0.33]$$

Le volume de pâte  $V_{p\grave{a}te}$  peut être exprimé comme suit :

$$V_{p\grave{a}te} = V_{ciment} + V_{fine} + V_{eau} + V_{air}$$

Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques.

D'autres méthodes moins empiriques peuvent aussi être utilisées.

- *Méthode basée 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 superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixée), 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.

D'autres auteurs proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage.

- *Méthode basée sur l'optimisation du Volume de Pâte*

Le béton est considéré comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

- *Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire :*

Il est connu que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est, elle aussi, dépendante de l'arrangement du squelette granulaire.

En considérant que l'eau de gâchage est la phase interstitielle du mélange, plus la quantité d'eau qui écarte les grains est importante, plus la suspension n'est fluide. À quantité d'eau constante, si on minimise la porosité de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume disponible pour fluidifier le mélange.

### **I. 3. ESSAIS DE CARACTERISATIONS DES BAP A L'ETAT FRAIS :**

Les connaissances acquises depuis l'apparition des BAP et la meilleure maîtrise de toutes les étapes sont suffisantes pour permettre l'utilisation de ces bétons dans de nombreuses applications. Certains points restent cependant à améliorer pour en étendre l'emploi.

Le comportement d'un BAP à l'état frais se différencie notablement de celui d'un béton ordinaire. Son ouvrabilité se décline classiquement suivant :

- sa mobilité en milieu non confiné ;
- sa mobilité en milieu confiné ;
- sa stabilité vis-à-vis de la ségrégation et du ressuage.

Lors de la formulation, la caractérisation du béton autoplaçant 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 :

- Essai d'étalement ;
- Essai de la boîte en L ;
- Essai stabilité au tamis.

#### **I. 3. 1. Essai d'étalement :**

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow), on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm. La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis

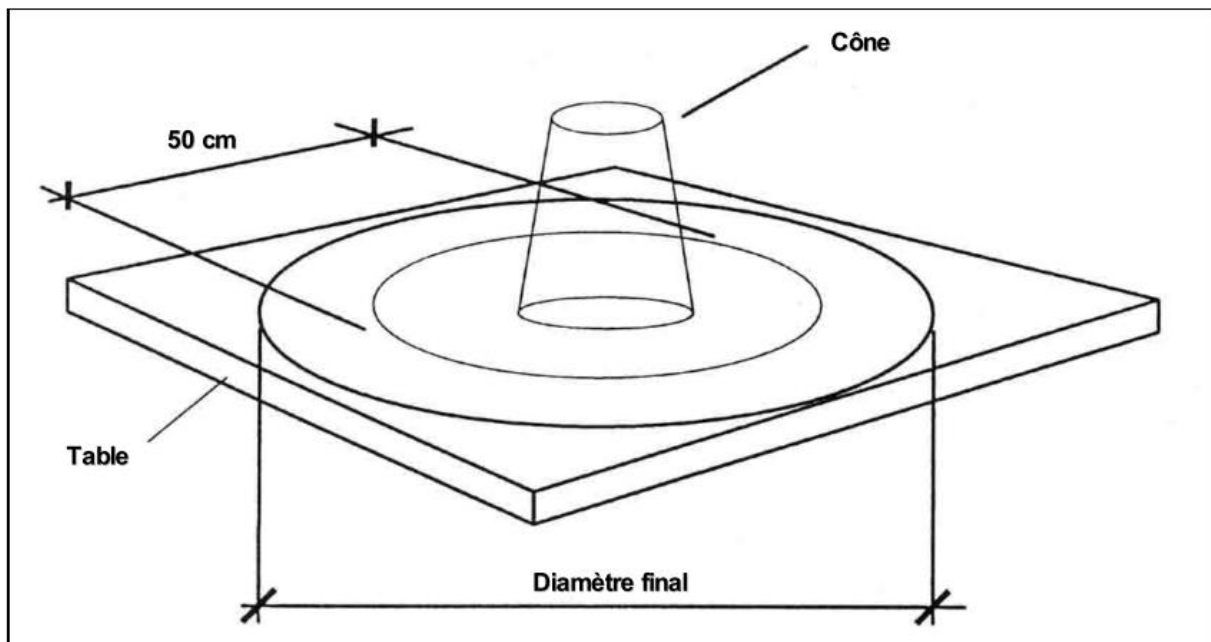


uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette.

Plus l'étalement est élevé, meilleure est la déformabilité, un grand étalement traduit donc un béton moins visqueux. Il faut rappeler qu'est considéré comme autoplaçant, un béton qui forme une galette d'un diamètre supérieur à 60 centimètres.

Des observations complémentaires peuvent aider à appréhender certaines propriétés à l'état frais des bétons autoplaçants :

- les bords de la galette donnent une indication sur le ressuage ;
- en traçant à la truelle des lignes dans la galette, on peut observer la manière dont le béton se referme ;
- on peut aussi voir si l'écoulement du cône se fait plus ou moins rapide (mesure des temps de passage au diamètre 50 cm) ;
- enfin, on peut noter la forme plus ou moins bombée de la galette, l'homogénéité du béton ...



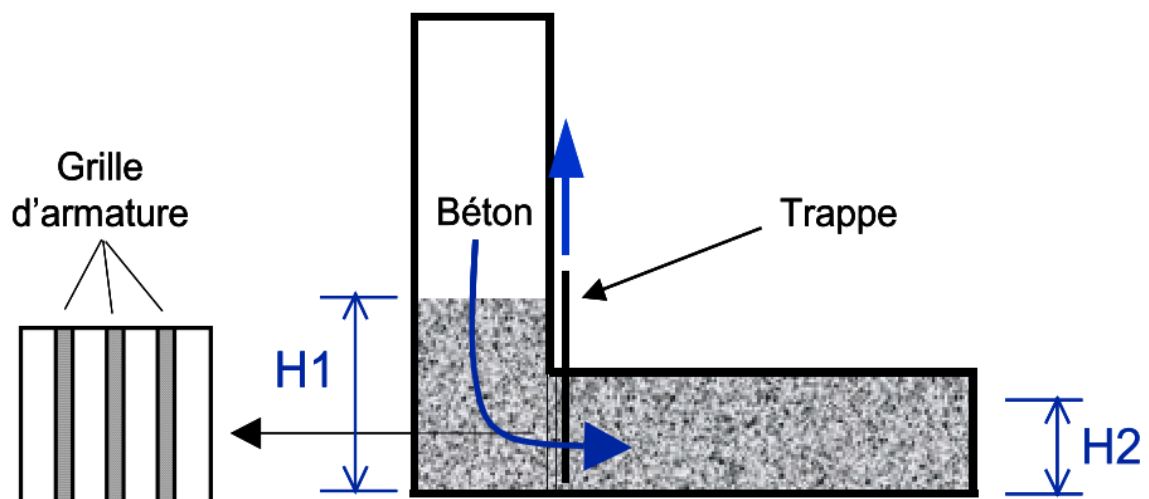
*Figure 2 : Essai d'étalement au cône (slump flow)*

### I. 3. 2. Essai de la boîte en L :

Cet essai est réalisé en utilisant une boîte ayant une forme en L. Il permet d'évaluer l'écoulement en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage.

Le principe de l'essai à la boîte en L est décrit comme suit :

- La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres) ;
- Après arasement, on laisse le béton reposer pendant 1 minute ;
- Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39 mm ;
- Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage  $H_2/H_1$  ;
- Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulat en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou ségrégation.



*Figure 3 : Essai de la boîte en L*

### I. 3. 3. Essai stabilité au tamis :

Cet essai vise à qualifier les BAP vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un BAP en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier.

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à déposer deux litres de béton sur un tamis ayant des mailles de 5 mm d'ouverture.

Après 5 minutes, on pèse la quantité de mortier ayant traversé le tamis. Cette quantité par rapport à la quantité de mortier initialement présente dans le contenant de 2 litres donne l'indice de ségrégation. On vise un indice de 30% au plus pour un béton autoplaçant.



*Figure 4 : Essai de stabilité au tamis*

### I. 4. ESSAIS DE CARACTERISATIONS DES BAP A L'ETAT DURCI :

Les propriétés du béton à l'état durci comportent trois aspects :

- propriétés mécaniques (résistances, module d'élasticité),
- déformations sans charges (retrait, fluage) ;
- durabilité (porosité, perméabilité).

Il est intéressant de présenter les tendances d'évolution des propriétés des BAP par rapport à celles des bétons vibrés.

#### I. 4. 1. Résistance à la compression :

Les BAP se caractérisent par un rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécaniques.

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense.

Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.



*Figure 5 : mesure de la résistance à la compression*

#### I. 4. 2. Résistance à la traction :

Gibbs 99 ont constatés qu'il n'y a aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons référence. Par contre, Gibbs 02 ont montrés que la résistance à la traction est plus grande que la résistance des bétons références.

En comparant des mélanges de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction.

### **I. 4. 3. Module d'élasticité :**

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une basse quantité de gros granulats. Si on se réfère à la formule réglementaire du module ( $E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$ ), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré.

Certains auteurs ont trouvé que le module élastique de BAP coïncide bien avec celui de BV avec des propriétés similaires quand la résistance est constante.

Jacob et Hunkeler ont trouvés qu'avec une résistance donnée le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV, ce comportement est du à la petite dimension de grains de BAP et la quantité élevée de pâte de ciment.

### **I. 4. 4. Retrait :**

A la vue du volume de pâte plus important dans un BAP que dans un béton traditionnel, on peut penser que le retrait de dessiccation serait plus important. Les données de la littérature spécifique sont contradictoires même si les communications traitant du problème montrent une tendance d'un retrait plus important pour les BAP.

#### ***1. 4. 4. 1. Retrait endogène :***

En ce qui concerne le retrait endogène, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés. En effet, même si certains auteurs attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés, d'autres contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportement différés équivalents pour les deux types de béton.

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés.

#### ***I. 4. 4. 2. Retrait de dessiccation :***

En dessiccation, les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires vibrés possèdent en général un retrait total équivalent. Cependant, les deux types de bétons affichent une différence pour les gammes de résistance élevées, où le retrait des BAP est supérieur.

#### **I. 4. 5. Fluage :**

Le fluage peut être défini comme une augmentation de la déformation sous une contrainte constante. Comme cette augmentation de la déformation peut être plusieurs fois supérieure à la déformation sous l'application d'une charge, la prise en compte du fluage est d'une importance considérable lors de calcul des structures de bétons.

Le phénomène de fluage dépend de la distribution des efforts au sein de la structure et aussi de type de matrice de ciment.

Proust trouve des valeurs de même ordre de grandeur de BAP et pour BV. Ces résultats sont confirmés par Turcy, où il indique qu'en compression, le fluage total du BAP est identique à celui du BV.

Les études sur le fluage sont encore peu nombreuses, en tout cas par rapport à celles sur le retrait. Cela explique peut-être pourquoi les résultats sont plus homogènes. Le fluage des BAP paraît comparable à celui des bétons ordinaires de même résistance, en mode endogène ou en mode de dessiccation.

Au cas où le fluage du béton aurait un rôle significatif sur le comportement de l'ouvrage, il est recommandé de déterminer sa valeur au moyen d'essais, car il est difficile, en l'état actuel des connaissances, de donner des indications fiables sur la différence existant entre le béton BAP et le béton vibré. Les essais sont en effet peu nombreux, leurs résultats sont souvent contradictoires et font ressortir des différences, heureusement peu importantes.

## **Chapitre II : LES BETONS DE FIBRES**

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude bibliographique des bétons renforcés de fibres, matériau utilisé depuis de nombreuses années avec succès et principalement pour des applications spécifiques telles que les éléments de préfabrication ou les dallages.

L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles. L'intérêt pour leur utilisation ne cesse de croître pour la fabrication du béton prêt à l'emploi, du béton préfabriqué, béton autoplaçant. Fabriquées à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels ou autres, les fibres sont disponibles en diverses formes (rondes, plates, gaufrées et déformées). Les fibres apportent au béton de nombreux avantages, notamment sur le comportement mécanique sous sollicitation de traction. Elles sont ajoutées au béton durant le malaxage.

Dans ce qui suit nous allons parler sur les généralités sur les fibres ainsi que le béton fibré.

### **II. 1. GENERALITES SUR LES FIBRES**

#### **II. 1. 1. Définition d'un matériau composite :**

Un matériau composite est constitué d'un mélange de plusieurs phases de nature, de structure, de composition physique et chimique distincte, et des propriétés mécaniques variées. En d'autres termes, un matériau composite est constitué d'une ou plusieurs phases discontinues (renfort) réparties dans une phase continue (matrice) de nature différente.

Généralement, dans le domaine de construction on utilise comme :

- Matrice : ciment, mortier, béton, plâtre, résine...
- Renfort : barres, fibres, fils...

#### **II. 1. 2. Historique et perspective de l'utilisation des fibres :**

L'idée de l'utilisation des fibres est très ancienne. Les fibres ont été utilisées dans la fabrication des cordes et textiles. Comme élément de renforcement des matériaux de construction traditionnels, la première utilisation des fibres a été observée dans la fabrication des briques argileuses ou dans les mises en œuvre des plâtres, et spécialement par des fibres végétales.

La naissance de la fibre industrielle, suite aux développements technologiques, a augmenté les champs d'applications des fibres dans plusieurs domaines. Utilisé dans le domaine des textiles depuis le XIXe siècle sous forme de fibre de coton, et à partir de l'année 1935 la fibre de Nylon (plastique), et récemment la fibre de polypropylène prédomine depuis l'année 1950 la production des cordes et câbles utilise les fibres de verre et d'acier. Cependant, dans le domaine de la construction, la première fibre utilisée dans le renforcement des ciments fut la fibre d'amiante vers les années 1900. Si la fibre d'amiante est considérée comme étant la première fille dans la famille des fibres minérales utilisées dans le renforcement des ciments, la fibre de verre est la première sœur. En effet, le renforcement des ciments par les fibres de verre a commencé à partir des années 50, pour répondre aux exigences et aux nécessités de production des matériaux résistants, durables et légers, mais aussi et surtout pour se substituer à l'amiante, originaire de plusieurs maladies sanitaires.[10]

Depuis 1966, les efforts ont été concentrés pour l'amélioration de la qualité de la fibre de verre notamment sa résistance aux alcalis. Parallèlement, la technologie d'utilisation des fibres d'acier fût développée. Des recherches se poursuivent pour adapter ces matériaux aux bétons à hautes performances. [10]

Dernièrement, des recherches sont axées vers l'incorporation des fibres végétales ou naturelles tels que le sisal, le jute et la hampe dans le renforcement des matériaux de construction et particulièrement dans les ciments.

L'avenir du développement dans le domaine du béton de fibre sera fort probablement attribué aux fibres végétales, notamment pour les pays en voie de développement.

### **II. 1. 3. Type des fibres utilisées dans le domaine de construction :**

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, parmi eux nous citons :

- Les fibres métalliques (acier, fonte) ;
- Les fibres organiques (polypropylènes, polyesters, polyamides et polystyrènes);
- Les fibres minérales (amiante, verre, carbone) ;
- Les fibres végétales (Jute, sisal, bois, bambou, palmier) ;
- Les fibres animales (poil, laine, soie).



## II. 1. 4. Les fibres végétales

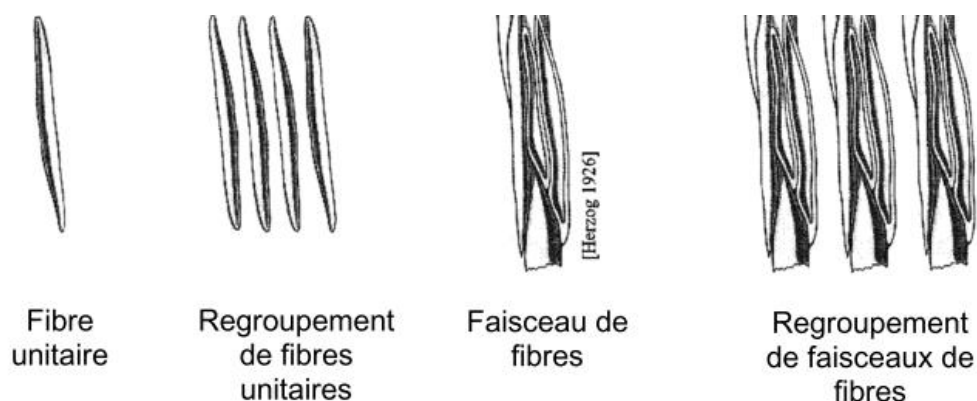
L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétales dans la construction remonte aux années où l'on fabriquait des briques renforcées par la paille ou des roseaux. Dans le temps moderne (depuis l'année 1970), le premier composite liant avec les fibres végétales était le plâtre. De ce fait, plusieurs ouvrages sont réalisés avec le plâtre renforcé de fibres végétales.[5]

Actuellement le monde connaît de récents développements dans le domaine de renforcement du ciment et béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs axes de recherches sont orientés vers la substitution de celles-ci par les fibres végétales. [5]

### II. 1. 4. 1. Définition

Une fibre végétale est une expansion cellulaire morte qui est principalement composée de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine et de pectines. Elle est soit isolée soit regroupée avec d'autres en un faisceau.

Il est primordial de ne pas confondre fibre unitaire et faisceau de fibres. Une fibre unitaire correspond à une cellule élémentaire fibreuse, qui, regroupée avec d'autres, forme un faisceau de fibres ; le lien interstitiel entre les fibres unitaires étant composé principalement de pectines et d'hémicelluloses. Ce sont généralement ces faisceaux de fibres qui sont communément appelés « fibres végétales ».



*Figure 6 : les différentes formes de fibres*

Une fibre végétale est caractérisée par sa finesse et sa forme allongée par rapport à son diamètre. La plupart des fibres végétales mesure entre 10 et 15 mm de long pour un diamètre de 10 à 50  $\mu\text{m}$ , soit un rapport longueur sur diamètre compris entre 10 et 100.

### *II. 1. 4. 2. Origines des fibres végétales*

Les fibres végétales peuvent être issues de différentes parties de la plante: des feuilles, de la tige ou tronc, de bois et de surface.

#### *a) Les Fibres de Feuilles :*

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer ces fibres sont dures et rigides. [5]

Les types de fibres de feuilles les plus cultivées sont la fibre de sisal, de Henequen et d'abaca. De ces fait, plusieurs chercheurs tel que : NILSSON, AYYAR et al ont montré l'efficacité du renforcement du ciment par les fibres de feuilles.

#### *b) Les Fibres de Tiges :*

Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges de plantes. [5]

Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet de cor et en toute longueur. Elles sont par la suite séparées individuellement par un processus de défilage. Les fibres, une fois séparées, sont utilisées dans la fabrication des cordes ou de textile ou bien dans le renforcement du ciment et béton.

Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin, de ramie, et de chanvre.

NILSSON rapporte que les fibres de tige, les plus utilisées dans le renforcement du ciment, sont celles de chanvre et de jute.

#### *c) Les fibres de bois :*

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. Plusieurs chercheurs ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des ciments.

*d) Les fibres de surface :*

Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Nous citons entre autre le coton et la noix de coco. Par ailleurs, les fibres de palmier, qui entourent son tronc, appartiennent à cette famille de fibres.

**II. 1. 5. Propriétés des fibres végétales**

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre, sa densité, sa teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. Elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, à la rupture et par le module d'élasticité.

Les propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales ont été traitées par plusieurs chercheurs [5]

**Tableau 1 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales**

Fibre	Diamètre (mm)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Résistance à la traction (Mpa)	Module d'Young (GPa)	Teneur en eau à l'état naturel (%)	Absorption d'eau après 5 min (%)	Absorption d'eau à la saturation (%)
Coton		1.5-1.6	587-597	5.5-12.6			
Jute		1.3	393-773	26.5			
lin		1.5	345-1035	27.6			
Chanvre			690				
ramie			400-938	61.4-128			
Sisal	0.08-0.30	0.75-1.5	278-577.5	9.4-26.7	10.97-14.44	67-92	92-250
Noix de coco	0.08-0.30	0.67-1.33	72-175	2.0-6.0	11.44-15.85	22-43.2	85-135

### II. 1. 6. Domaines d'application des fibres :

Les fibres de toute nature sont très employées dans différents ouvrages dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques et physiques. Actuellement, les fibres végétales sont de plus utilisées dans le but d'arriver à substituer les fibres d'amiante.

Par ailleurs, l'utilisation des fibres de polymère, de carbone et d'acier est de plus en plus pratiquée dans plusieurs domaines et spécialement dans la fabrication des panneaux et dans la restauration et la réparation des ouvrages anciens endommagés.

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.

### II. 2. LE BETON RENFORCE DE FIBRES

Le béton de fibres est un matériau qui a connu ces derniers temps beaucoup de développements et nombreuses sont les études qui ont été effectuées durant les trois dernières décennies. L'ajout des fibres a un effet positif sur les caractéristiques mécaniques des bétons. Dans ce domaine, on peut citer l'amélioration simultanée des propriétés mécaniques et de la ductilité. Par ailleurs, la formation et la propagation des fissures sont retardées et les tailles de ces fissures sont largement réduites. L'idée de renforcer les bétons avec des fibres paraît un bon moyen pour leur conférer une meilleure ductilité. Les propriétés des fibres permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton avec comme conséquence une réduction des sections.

La flexion est le type de sollicitation le plus rencontré dans les structures. Bien qu'il présente un effet d'échelle dû au gradient d'effort sur la hauteur, il est l'essai le plus utilisé au laboratoire grâce à sa simplicité et reste un bon moyen de comparaison entre les différents

bétons de fibres. La rhéologie du matériau et l'effet de paroi généré par la géométrie du coffrage, sont ceux auxquels l'orientation des fibres est la plus sensible

### **II. 2. 1. Définition de béton de fibres**

Ce sont des bétons dans lesquels ont été incorporées des fibres de nature, dimension et géométrie diverses, dans le but de leur conférer certaines propriétés. De façon générale, ces bétons présentent :

- Une meilleure résistance à la traction
- Une amélioration des résistances mécaniques (jeune âge, chocs, cisaillement, usure, abrasion...)
- Une bonne maîtrise de la fissuration
- Une amélioration en matière de plasticité, de moulage et d'aspect de surface

### **II. 2. 2. Comportement des bétons de fibres :**

Le comportement du béton de fibres est très compliqué du moment que c'est le résultat du comportement de deux matériaux non homogène. Dans ce qui suit nous allons examiner le comportement de ces matériaux sous différentes sollicitation.

#### ***II. 2. 2. 1. Comportement en compression***

La plupart des auteurs affirment que la résistance à la compression des bétons de fibres est en générale légèrement inférieure à celle du béton classique et spécialement pour les fibres végétales. Certains chercheurs révèlent qu'une orientation adéquate des fibres métalliques a permis d'améliorer la résistance à la compression des bétons de fibres par rapport au béton classique d'environ 15%.

Le comportement et le mécanisme de rupture des bétons de fibres en compression ont été interprétés par MONGAT et AZARI, qui rapportent qu'en compression, la présence des fibres favorise l'apparition des micros fissures. Celle-ci se propagent rapidement et entraînent la rupture du matériau.

### ***II. 2. 2. 2. Comportement en traction***

Les fibres ont un rôle très important dans l'amélioration de la résistance à la traction et la limitation de la propagation des fissures du béton de fibres en traction, surtout après l'apparition de la première fissure.

En fait, avant l'apparition de la première fissure le comportement du béton de fibres en traction uni axial est presque similaire au béton classique. En revanche, le comportement post-fissuration est fortement lié à la nature des fibres, à leur longueur, à leur quantité et leur orientation.

### ***II. 2. 2. 3. Comportement en flexion***

Les fibres sont très efficaces dans l'amélioration de la résistance à la flexion. Le comportement en flexion des bétons de fibres est largement influencé par la nature, le pourcentage et l'orientation de fibres dans la matrice.

## **II. 2. 3. Durabilité des bétons de fibres**

La durabilité à long terme des bétons de fibres est un problème qui se pose aux fabricants et aux utilisateurs. Elle dépend de la nature et du traitement des fibres, de la qualité des ciments utilisés ainsi que du mode de conservation.

Plusieurs essais effectués à long terme sur les résistances à la traction et à la flexion des bétons de fibres d'acier et de polymère, révèlent que ces types de béton présentent une bonne durabilité dans les milieux secs et humides.

La dégradation des fibres végétales dans les composés cimentaires se produit parce que l'eau interstitielle alcaline dissout la lignine et l'hémicellulose existant dans les lamelles moyennes des fibres, affaiblissant ainsi le lien entre les différentes cellules de fibre. Un mécanisme additionnel est l'hydrolyse alcaline des molécules de cellulose, qui cause la dégradation de la chaîne moléculaire, donc menant à une réduction du degré de polymérisation et abaisse la résistance à la traction. Ce phénomène se manifeste au niveau de la fibre soit par détérioration soit par diminution de sa résistance à la traction.

## **II. 2. 4. Traitement de la Fibre**

Les principales méthodes utilisées dans le traitement de l'état de surface des fibres sont :

- Les imprégner d'agents chimiques comme le silicate de sodium, le sulfate de magnésium et d'autre pour constituer une protection contre l'attaque chimique des alcalins.

- Imperméabiliser la fibre avec des produits comme la résine ou la bitume protégeant ainsi la surface de ces dernières contre l'attaque des alcalis libérés par le ciment lors de l'hydratation.

- La combinaison des deux méthodes. Cette méthode a donné les résultats les plus satisfaisants.

Ces procédés offrent une bonne protection aux fibres mais elles augmentent le coût de leur exploitation.

La modification de la matrice a été tentée par les méthodes suivantes:

- Obturation des pores de la matrice avec différents produits ;
- Réduction de son alcalinité par différents procédés.

### ***II. 2. 4. 1. Obturation des pores de la matrice***

D'après GRAM, la limitation des pores peut se faire par l'augmentation de la proportion des fines ou la quantité de ciment, ou par diminution du rapport E/C pour limiter ainsi le transport de l'eau et donc l'alcalinité.

### ***II. 2. 4. 2. Réduction de l'alcalinité***

Les méthodes les plus utilisées pour la réduction de l'alcalinité de la matrice sont :

- La carbonatation à jeune âge de la matrice par le gaz carbonique. L'objectif de cette technique est de réduire le taux de la chaux libérée lors des premiers jours d'hydratation ;
- L'utilisation d'un ciment ayant une faible teneur en alcalis spécialement la chaux libérée lors de la réaction d'hydratation. Ainsi plusieurs chercheurs préconisent le remplacement d'une partie de ciment par l'ajout de laitier, de cendres volantes ou bien des produits pouzzolaniques.

### **Chapitre III : BETON AUTOPLAÇANT FIBRE**

Malgré les améliorations appréciables obtenues au niveau du comportement mécanique des bétons, l'incorporation des fibres dans le béton reste problématique 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.

Bien que le béton autoplaçant renforcé de fibres soit pour l'instant peu utilisé, des chercheurs ont montré qu'il peut être une solution appropriée pour les applications sur poutres en I, en béton précontraint, au niveau des zones fortement ferraillées afin de contrôler la fissuration.

[Dhonde et al 2005]. 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 2000a], cette influence est fonction du dosage en fibres et de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élancement. [25]

Ces propriétés ont été mises en évidence par différents essais à l'état frais, par exemple l'essai d'étalement « SLUMP FLOW » et l'essai d'étalement modifié dit « J-RING » qui permet d'évaluer notamment le risque de blocage. Pour bien déterminer l'effet des fibres, ces essais ont également été effectués avec un béton autoplaçant de référence (non fibré).

#### **III. 1. Les propriétés des bétons autoplaçants fibres a l'état frais :**

Une étude réalisée par Grunewald a dédié aux propriétés des BAP fibrés en fonction de la teneur en fibres, du type de fibres et du rapport massique sable/granulat. Pour la composition de référence, le rapport sable/granulats de 40% était utilisé car considéré comme optimal pour la compacité du béton. Après les différents essais d'ouvrabilité réalisés sur les différentes compositions des bétons à l'état frais, les conclusions ci-après ont été tirées.



### III. 1. 1. Essai d'étalement :

L'analyse de ces résultats montre que l'étalement diminue lorsque la teneur en fibres augmente. Le degré de diminution dépend de la composition du béton de référence. Plus la teneur en sable est élevée, plus l'étalement est affecté. On remarque aussi une ovalisation de la galette pour les compositions renforcées de fibres, 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, une ségrégation des granulats et des fibres au centre de la galette a été remarquée. L'aspect de la galette dans le cas intermédiaire, provoquant ainsi une ovalisation de la galette et une accumulation des particules au milieu.

Sachant que l'élanement ( $L_f/D_f$ ) et le dosage en fibres sont les facteurs majeurs influençant l'ouvrabilité, [Grünewald et Walraven 2001a] se sont appuyés sur le facteur fibre défini comme le produit entre la teneur volumique en fibres  $V_f$  et l'élanement. Aucune différence n'a été observée entre l'étalement mesuré directement après malaxage et 1 heure après malaxage. En revanche, une augmentation du facteur de fibre réduit sensiblement l'étalement.

### III. 1. 2. Essai de V-funnel :

Les temps d'écoulement à travers l'entonnoir (V-funnel) pour les différentes compositions directement après malaxage sont dans une gamme comprise entre 4,5s et 5,7s.

Le comportement à l'écoulement des bétons évalué par l'intermédiaire de cet essai dépend essentiellement de la viscosité ainsi que de la taille du plus gros granulat par rapport aux dimensions de l'ouverture de l'entonnoir. Les temps de passage à travers l'entonnoir à  $t=1h$  sont nettement plus élevés qu'à  $t=0h$ .

### III. 1. 3. Essai J-RING :

Le J-Ring est un essai d'étalement modifié par les japonais pour évaluer la sensibilité au blocage des bétons fibrés dans le milieu confiné notamment par les armatures. Les fibres affectent de manière significative la capacité de passage par rapport à la composition de référence sans renfort de fibres. L'espacement exigé des barres pour le non blocage augmente avec le dosage en fibre. [Dhonde et al 2007] ont réalisé une étude sur le comportement à l'état frais des bétons autoplaçants renforcés de fibres métalliques et ont conclu que l'écoulement est obstrué par les barres, ce qui crée une différence de niveau entre le béton restant à l'intérieur de l'anneau et celui passé à travers. L'élanement de la fibre, la teneur des granulats

(fins ou gros) et les caractéristiques rhéologiques de la pâte de ciment affectent également ce comportement. [26]

### **III. 2. Résistance à l'écoulement (relation entre la teneur en fibre et la viscosité plastique) : [8]**

[Grünewald et Walraven 2001b] 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.

### **III. 3. \_Orientation et distribution des fibres [25]**

L'orientation et la distribution des fibres affectent les performances et les caractéristiques des BAP fibrés à l'état durci. [Pettersson 1998] a réalisé une étude sur la distribution des fibres métalliques dans la boîte en L qui a consisté à réaliser des photographies aux rayons X des sections transversales du béton durci. Les conclusions retenues sont que les fibres étaient relativement bien distribuées, bien qu'une légère ségrégation des fibres fût observée par rapport aux gros granulats. Par ailleurs, il a été constaté que la majorité des fibres étaient orientées dans le sens de l'écoulement ; cet effet était plus prononcé pour des fibres de plus grande longueur.

[Groth et Nemegeer 1999] a aussi conclu que l'écoulement oriente les fibres. Même si l'écoulement propre aux BAP confère aux fibres une orientation préférentielle, le même auteur est arrivé à la conclusion selon laquelle, aux dosages en fibres courants, l'effet de ce renfort est relativement le même pour un béton vibré ou autoplaçant du moment qu'ils ont la même classe de résistance et le même type et dosage en fibres. Cette conclusion a été tirée en se basant essentiellement sur les performances en flexion.

### **III. 4. Comportement Mécaniques des bétons autoplaçants fibres à l'état durci**

Les propriétés mécaniques permettant de caractériser un BAP fibré à l'état durci sont les résistances à la compression, à la traction, et à la flexion. Les fibres influent directement sur l'ouverture de la fissure et donc sur la rigidité et la ductilité après fissuration. Dans cette partie, nous nous limiterons au comportement instantané. Le retrait et le fluage peuvent être, considérés comme similaires à ceux des compositions ordinaires, même si cela reste à confirmer compte tenu du peu de recherches menées sur ce sujet.

#### **III. 4. 1. Comportement à la compression et à la traction**

La résistance à la compression n'était pas significativement sensible à l'adjonction de fibres dans un BAP. La résistance au jeune âge est quelque peu faible, probablement due à un effet retard de l'hydratation des mélanges et/ou des fillers, lié aux adjuvants. Néanmoins, à long terme, la résistance correspond à celle d'un béton ordinaire avec un même rapport E/L.

Les résistances à la compression visées à 28 jours ont été atteintes pour tous les types de bétons, avec une très légère diminution des rapports  $R_{comp}/R_{trac}$  entre 7 et 28 jours. Cette réduction modérée est probablement due à l'amélioration de l'adhérence des fibres avec le béton dans le temps, mécanisme dont dépend fortement la résistance à la traction.

#### **III. 4. 2. Comportement à la flexion [25]**

D'après [Groth 2000a], une augmentation de la quantité de fibres conduit à une amélioration de la rigidité, et du comportement en flexion des bétons autoplaçants renforcés de fibres. [Alcantara 2004, 2005] et [Granju et al 2004] ont étudié le comportement mécanique en flexion sous l'influence de deux types de fibres (métalliques de type Fibraflex (FM) 30x1, 6 x 0, 03 mm et synthétiques de type polypropylène (FS) 50x1, 6 x 0,4 mm). Les dosages utilisés étaient de 20 kg/m<sup>3</sup> pour FM, 9 kg/m<sup>3</sup> pour FS et (10 FM + 4,5 FS) kg/m<sup>3</sup> pour un fibrage mixte (compositions qui seront plus tard utilisées dans nos essais).

### III. 5. Utilisation des Bétons Autoplaçants Fibres dans Les Structures

Nous allons présenter quelques exemples d'applications des BAP fibrés dans les éléments de structure.

#### • Palplanches

A l'origine, les palplanches étaient réalisées en bois (maintenant en acier). Il s'agissait de pieux faits de planches qu'on enfonçait dans la terre pour former un encaissement dans l'eau. 'SPANBETON', un producteur hollandais d'éléments en béton préfabriqués propose aujourd'hui des palplanches en béton. Ces éléments sont précontraints et renforcés avec des barres en acier. Comparés à ceux en acier, les éléments en béton sont plus durables et peuvent être employés comme partie portante de la charge d'une structure. Des études ont été réalisées à l'université de technologie de Delft avec pour objectif la production de palplanches précontraintes sans armatures classiques. Le programme était composé de quatre parties:

- étude préliminaire sur les caractéristiques d'un mortier de haute résistance avec les fibres métalliques ;
- optimisation d'une géométrie de palplanches, en combinant les aspects structural et économique, (le calcul a montré que les palplanches en bétons autoplaçants fibrés seraient économiques si le prix de la composition était inférieur à 450 euros/m<sup>3</sup>) ;
- optimisation d'une composition basée sur l'étude de [Sato et al 2000], développée par [Grünwald et al 2002], satisfaisant tous les critères de conception, (plusieurs essais ont été effectués sur les caractéristiques du mélange optimisé à l'état durci) [25] ;
- faisabilité de la nouvelle palplanche.

#### • Voussoirs

Les voussoirs subissent souvent des dommages au cours de la construction. Les fibres, en réduisant la fragilité du matériau, peuvent éviter l'endommagement du béton d'enrobage qui est provoqué par le placement imprécis des voussoirs. Pendant leur durée de service, ils peuvent être accidentellement soumis à une augmentation de la température provoquée par un feu. A titre d'exemples récents et non des moindres, on peut citer les incendies du tunnel du Mont Blanc et du tunnel sous la Manche. Les fibres peuvent contribuer à limiter la détérioration et la désagrégation du béton. L'interface fibre – matrice cimentaire contribue à la décompression du béton (exutoire de la vapeur) et d'autant plus efficacement que les fibres sont réparties dans tout le volume, y compris au voisinage immédiat de la surface de la

structure. Des voussoirs renforcés de fibres métalliques ont été testés avec succès dans plusieurs projets d'infrastructures. Dans la plupart des cas, on peut se passer du renfort de barres, simplifiant ainsi le procédé de production.

Une des études de référence sur les BAP fibrés dans des voussoirs a été menée par [Grünewald et al 2003]. Elle présente deux volets : le procédé de production et l'effet de l'écoulement sur l'orientation des fibres, ainsi que les conséquences de cette orientation sur les caractéristiques mécaniques du béton.

Deux voussoirs ont été réalisés avec des BAP renforcés de fibres et deux différents types de fibres métalliques ont été employés : Dramix 80/60 BN ( $L_f/D_f = 80$ ,  $L_f=60$  mm) et Dramix 45/30 BN. Les compositions étudiées sont renforcées par  $60 \text{ kg/m}^3$  de fibres et elles se distinguent uniquement par la géométrie de la fibre utilisée. La composition présentant des caractéristiques d'un BAP, les voussoirs n'ont pas été vibrés.

### • **Eléments poutres [25]**

Des études ont montré que plus les fibres sont longues, plus elles ont tendance à prendre une orientation préférentielle. Les parois des moules induisent aussi une orientation préférentielle. Ceci a été confirmé par une étude de l'effet d'écoulement et la longueur des fibres sur leurs orientations sur des poutres. Deux poutres ayant une longueur de 3,7 m, une hauteur de 0,5 m et d'une largeur de 0,2 m ont été coulées. Deux types de fibres métalliques ayant le même rapport longueur/diamètre ( $L_f/D_f = 45$ ) mais de longueurs différentes (30 et 50 mm) ont été utilisés (Dramix 45/30 BN et Dramix 45/50 BN). La teneur en fibre dans chaque poutre est de  $50 \text{ kg/m}^3$ . Les résultats sur la rhéologie du matériau à l'état frais ont montré que les deux types de fibres ont des effets comparables sur les BAP fibrés.

Plusieurs études ont été effectuées pour déterminer l'effet de l'écoulement sur l'orientation des fibres dans les petites et grandes poutres. L'efficacité des fibres à réduire la fissuration, les performances des BAP renforcés de fibres et la variation des caractéristiques à l'état durci dépendent de l'orientation et de la distribution des fibres.

[Grünewald 2004] a étudié l'effet de l'écoulement sur l'orientation des fibres dans les éléments poutres. Cette étude a permis de mettre en évidence un effet de paroi significatif sur l'orientation des fibres. Cet effet, inévitable car le coffrage est incontournable, peut prendre

## ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

des proportions importantes, notamment dans le cas de petits éléments (par exemple les poutres pour des essais courants de laboratoire).

PARTIE II :  
ÉTUDES  
EXPÉRIMENTALES

## **Chapitre IV : CARACTERISATION DES MATERIAUX D'EXPERIMENTATION**

Dans ce présent chapitre seront énoncés brièvement toutes les techniques expérimentales ainsi que les modes opératoires à adopter lors des travaux au laboratoire, ainsi que les caractéristiques des matières premières utilisées.

Les éprouvettes sont préparées à partir des ingrédients suivants: ciment, granulats, eau, adjuvant, cendres de balle de riz et fibres de bambou.

### **IV. 1. LE CIMENT**

Lors de nos essais, nous avons utilisé le ciment CEM II / A 42.5 N. Ces ciments CEM II/A ou B 42.5N sont destinés aux Travaux de bâtiments et des ouvrages en Génie Civil nécessitant de fortes résistances à court terme. Sa composition chimique et sa composition minéralogique sont résumées dans le tableau ci-dessous, ainsi que ses caractéristiques physiques et mécaniques :

#### **IV. 1. 1. Caractéristiques chimiques**

Le ciment est composé de :

- Clinker : 86 % ;
- Cendre volante : 10 % ;
- Gypse : 4%.

L'analyse chimique du ciment utilisé a donné les résultats qui sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau 2 : Composition chimique du ciment CEM II / A-V 42.5 N**

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	PF	RI	CaO <sub>L</sub>
Teneur en [%]	22.74	7.67	3.37	55.27	2.77	2.15	3.57	1.21	1.46



Les modules du ciment sont :

$$MA = 1.7$$

$$MS = 1.88$$

$$MC = 98$$

C'est un mélange normal ( $MC < 100$  et  $MA > 0.638$ )

#### IV. 1. 2. Composition minéralogique du ciment

La composition minéralogique du ciment est donnée par le tableau 3.

**Tableau 3 : Composition minéralogique potentielle du ciment**

Constituants	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O	CaO <sub>L</sub>	CV
Teneur [%]	54.23	3.73	8.55	9.27	3.60	1.46	10.00

#### IV. 1. 3. Caractéristiques physique et mécanique

Les caractéristiques physiques et mécaniques du ciment CEM II /42.5 N sont données dans le tableau suivant :

**Tableau 4 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment**

couleur	gris	Exigence normative NM 031-1	
Masse volumique apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1240		
Masse spécifique [kg/m <sup>3</sup> ]	3140		
Eau de consistance normalisée [%]	27.8		
Début de prise [mn]	127	≥60	
Fin de prise [mn]	247	≤10	
Stabilité [mm]	0	≤10	
Refus 32µm [%]	14		
Surface spécifique Blaine [g/cm <sup>2</sup> ]	3267		
Classe vraie de résistance F <sub>CE</sub> [ Mpa]	54.80	≥42.5	≤62.5

## IV. 2. LES CENDRES DE BALLE DE PADDY

Les balles de paddy sont des déchets agricoles qui se trouvent en grande quantité à Madagascar. Par calcination, on obtient une cendre grisâtre qui est un produit particulièrement riche en silice et on constate que c'est une excellente pouzzolane.

### IV. 2. 1. Processus de combustion :

- On introduit une quantité de balle dans le four ;
- On amorce le feu par des charbons de bois incandescentes ;
- Quand la balle commence à s'allumer, on enlève les débris de charbon ;
- On remplit le four de balle de paddy ;
- On contrôle les systèmes d'aération en fonction du mouvement du vent atmosphérique.

La combustion de balle de paddy se fait en étapes :

- La première étape : étape de carbonisation qui se produit en 24 heures. La balle devient noirâtre et les produits organiques se volatilisent ;
- Une seconde étape : étape de combustion lente. Après 48 heures, on obtient une cendre grisâtre.

### IV. 2. 2. Caractéristiques chimiques

L'analyse chimique de la cendre de balle de paddy utilisés est présentée dans le tableau suivant :

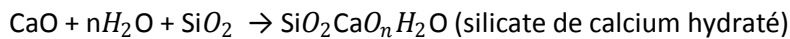
Tableau 5 : caractéristiques chimiques de la cendre de balle de paddy

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	PF
Teneur en %	80.70	2.71	1.82	3.20	3.01	0.95	1.25	0.80	4.70

### IV. 2. 3. Propriété pouzzolanique de la cendre de balle de paddy :

Les pouzzolanes ont été définies comme étant un matériau capable de réagir avec la chaux, en présence d'eau et de former des composés hydratés stables identiques à ceux produits lors de l'hydratation d'un liant hydraulique.

L'expression chimique d'une réaction pouzzolanique est la suivante:



Vue la quantité de silice dans la cendre de balle de paddy, on peut affirmer qu'elle peut donner une excellente pouzzolane artificielle, si la majeure partie de cette silice se trouve à l'état amorphe, donc réactive

## IV. 3. LES GRANULATS

Dans le béton frais, les granulats servent au remplissage de l'espace. Le rapport gravillon/ sable est proche de 1 dans les BAP.

Les granulats constituent l'ossature du béton et occupent 70 à 80% environ du volume d'un béton. Ils sont nécessaires pour la fabrication des bétons ; du point de vue économique, ils permettent de diminuer la quantité de liant qui est plus cher ; du point de vue technique, ils augmentent la stabilité dimensionnelle et ils sont généralement plus résistants que la pâte de ciment.

Trois classes granulaires sont utilisées pour la composition des BAP : du sable S 0/3, des gravillons g 3/8 et des gravillons G 8/15.

### IV. 3. 1. Prélèvements d'échantillon

La quantité d'échantillon à utiliser doit répondre aux deux impératifs qui sont contradictoires :

- . Il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif de l'ensemble ;
- . Il faut une quantité assez faible pour que le tamis ne soit pas saturé et la durée de l'essai soit acceptable.

La masse d'échantillon à utiliser est donc telle que  $M \geq 0,20 \cdot D$  où M masse de l'échantillon en kilogramme et D diamètre du plus gros granulats en mm.

### **IV. 3. 2. Préparation d'un échantillon pour essai :**

Pour l'échantillonnage en laboratoire, la méthode choisie est le quartage. L'échantillon bien homogénéisé placé dans un bac est partagé, d'abord, à l'aide d'une truelle, en deux moitiés, puis en quatre quarts sensiblement égaux. On élimine les deux fractions opposées, et on réunit les deux autres. On a recommencé des fois cette opération tant que le tas obtenu est encore important.

#### **IV. 3. 2. 1. Analyse granulométrique par tamisage :**

##### a) But

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et le pourcentage pondéral respectif des différentes classes de grains qui constituent l'échantillon.

##### b) Principe

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon, en fonction de leur taille.

##### c) Equipements nécessaires :

- Série de tamis pour le tamisage de l'échantillon, fond de tamis, couvercle ;
- Etuve pour sécher l'échantillon ;
- Balance de précision ;
- Cuvette.

##### d) Description de l'essai :

- Prendre une prise  $M$  (en kg) supérieure ou égale à  $0.2D$  où  $D$  est le diamètre maximal (en mm);
- On recueille l'échantillon dans une tare ;
- Prendre le poids de la prise d'essai ;
- Etuver la prise à  $105^{\circ}\text{C}$  ;
- Déterminer la teneur en eau de l'échantillon ;
- Laisser se refroidir en l'étalant au sol ;
- Peser l'ensemble sec ;
- Procéder au tamisage de la manière suivante :

- Aligner la série de tamis correspondant à la classe de l'échantillon (exemple de Classe granulaire : 0/3 ; 3/8 ; 8/20) ;
- Vérifier l'ordre de la série de tamis ;
- Placer l'échantillon sec sur le tamis supérieur ;
- Procéder au tamisage;
- Peser le refus sur chaque tamis ;
- On procède ainsi jusqu'au dernier tamis.

e) Mise au net :

- **Calcul des pourcentages de refus cumulés :**

% refus cumulés sur le tamis d'ouverture  $n = x \times 100$

$M_s$  : masse sèche de l'échantillon

$M_n$  : masse du refus cumulés sur le tamis d'ouverture  $n$

- **Calcul des pourcentages de tamisât de chaque tamis :**

% des tamisât = 100% - % refus cumulés

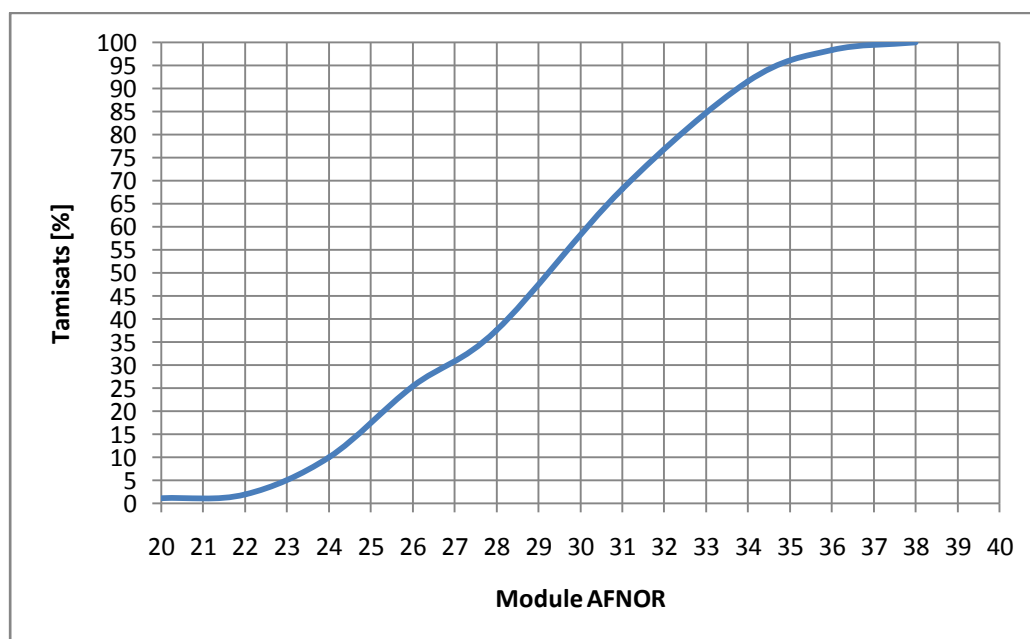
- **Traçage de la courbe granulométrie**

f) Résultats :

➤ sable 0/3 :

**Tableau 6 : Analyse granulométrie du sable 0/3**

MODULE DU TAMIS	TAMISAT CUMULE [%]
38	100
36	98.29
34	91.46
31	68.21
28	37.5
26	25.5
24	12.1
22	2
20	1.20

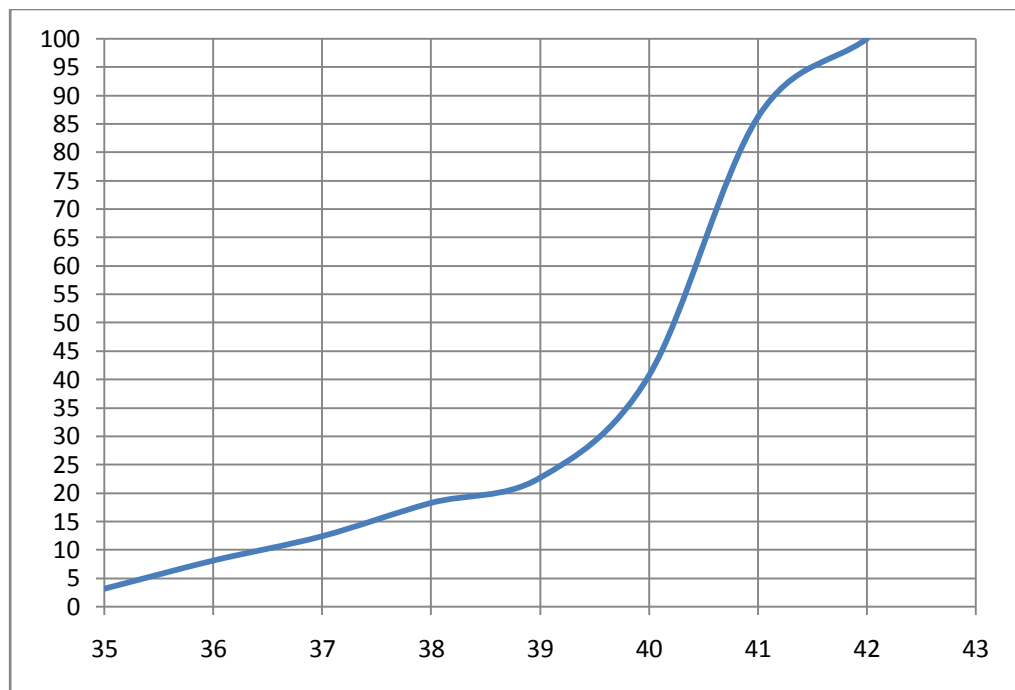


**Figure 7 : courbe granulométrique du sable 0/3**

➤ Gravillon 3/8

**Tableau 7 : Analyse granulométrique du gravillon 3/8**

MODULE DU TAMIS	TAMISAT CUMULE [%]
42	100
41	86.2
40	40.6
39	22.6
38	18.2
37	12.4
36	8.1
35	3.2

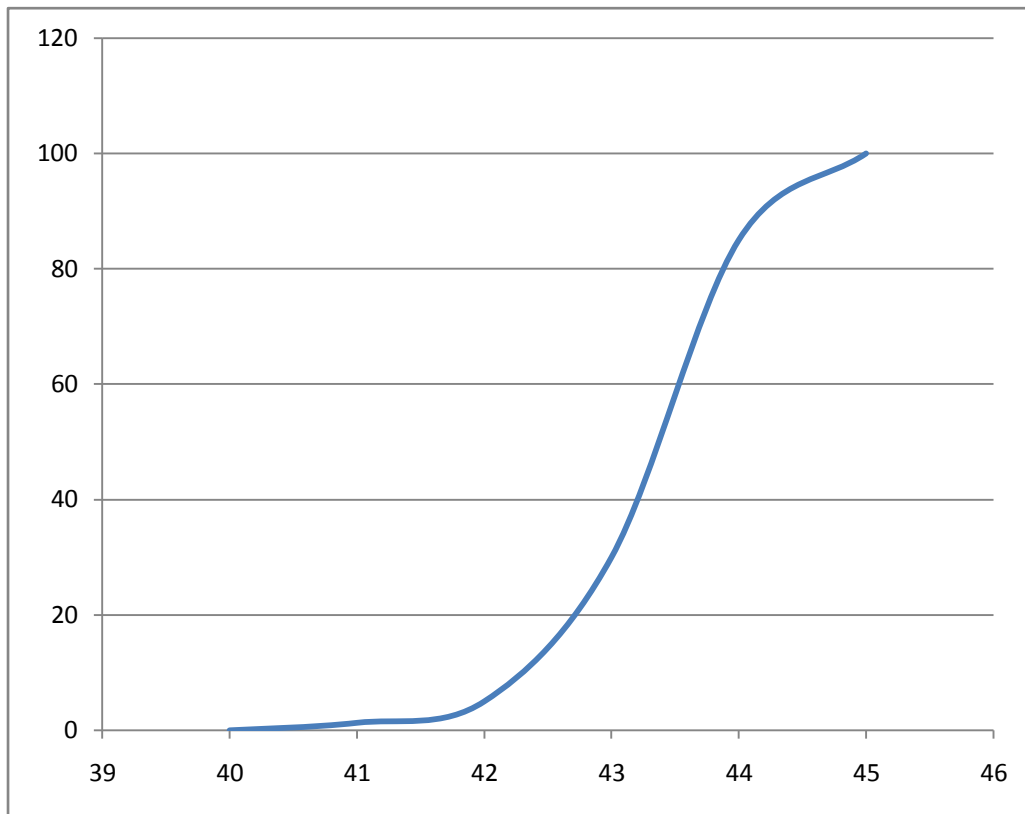


**Figure 8 : courbe granulométrique du gravillon 3/8**

➤ Gravillon 8/20

Tableau 8 : *Analyse granulométrie du gravillon 8/20*

MODULE DU TAMIS	TAMISAT CUMULE [%]
45	100
44	85
43	30
42	5
41	1.3
40	0



*Figure 9 : courbe granulométrique du gravillon 8/20*



#### **IV. 3. 2. 2. Essai d'équivalent de sable**

a) But de l'essai :

L'essai a pour but d'évaluer la propreté des sables utilisés à la composition de béton. Il consiste à séparer les particules fines et les éléments plus grossiers. Pour l'évaluation, on déterminera le coefficient d'équivalent de sable noté E.S permettant de quantifier la propreté du sable.

b) Principe :

On effectue l'essai sur la fraction 0/5 mm des matériaux à étudier. Pour éviter de perdre les éléments fins, on fait le tamisage par voie humide. On lave l'échantillon selon un processus normalisé et on laisse reposer le tout.

Au bout de 20 mn, on mesure :

$h_1$  = hauteur de sable propre + éléments fins [en mm]

$h_2$  = hauteur de sable propre seulement [en mm]

L'équivalent de sable est obtenu par la formule :

$$ES = h_2/h_1$$

Selon la façon de mesurer  $h_2$  (visuellement ou à l'aide d'un piston), on détermine ESV (équivalent de sable visuel) ou ES (équivalent de sable au piston).

Produits utilisés :

On doit utiliser une solution lavante qui permet de séparer les éléments fins argileux et on provoque la floculation.

La solution lavante est obtenue en diluant une dose de 125 cm<sup>3</sup> de solution concentrée dans 5l d'eau déminéralisée, conservée pendant deux à quatre semaines. La composition de la solution concentrée est :

- 111g de chlorure de calcium anhydre

- 480g de glycérine à 99% de glycérol de qualité pharmaceutique

-12 à 13 g de solution aqueuse à 40% en volume de formaldéhyde de qualité pharmaceutique.  
La solution concentrée est stockée en dose de 125 cm<sup>3</sup> dans des flacons en polyéthylène.

c) Equipement utilisé :

Selon la norme NF P 18 – 598, les matériels utilisés sont :

- Eprouvette en plexiglas avec deux traits repères, et leurs bouchons ;
- Entonnoir servant à introduire du sable ;
- Bonbonne de 5l pour la solution lavante avec son bouchon et un tube souple de 1,5 m ;
- Tube laveur métallique plongeant ;
- Machine agitatrice ;
- Règle métallique servant à mesurer la hauteur de sable et floculat ;
- Piston taré à masse coulissante de 1kg pour la mesure d'E.S.

d) Conduite de l'essai :

On prépare l'échantillon (sable tamisé au tamis de 5mm) et les matériels, puis on effectue les opérations suivantes :

- On place la solution lavante dans une bonbonne de 5l située à 1m au dessus du fond des éprouvettes, le dispositif si phonique est annoncé et il est relié au tube laveur.
- Pour avoir un résultat bien représentatif, on dispose de deux éprouvettes propres pour chaque type de sable étudié et on prendra la moyenne des deux résultats obtenus.
- On remplit les éprouvettes avec la solution lavante jusqu'au premier trait.
- On verse la quantité de sable voulue, prendre toute précaution pour éliminer les bulles d'air on laisse reposer pendant 10mn.
- On bouche les éprouvettes et on les agite de manière automatique à l'aide du machine agitatrice : le mouvement est rectiligne horizontale, d'amplitude 20cm, et 90 allers et retour en 30s.
- On lave et on remplit l'éprouvette avec le tube laveur. Pour cela, on enlève le bouchon au dessus de l'éprouvette et on fait descendre le tube laveur en le faisant tourner entre les doigts : on lave ainsi les parois intérieurs de l'éprouvette. On lave le sable en

faisant descendre et remonter lentement le tube laveur dans la masse du sable pour faire remonter les particules fines dans la solution supérieure.

- On ferme le robinet et on sort le tube laveur lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur

- On laisse reposer pendant 20mn en évitant toute vibration.

- On mesure à vue les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  et on obtient l'équivalent de sable à vue E.S.V tel que :  $ESV = h'_2/h_1$

La mesure de  $h'_2$  n'est pas toujours précise et E.S.V qui en résulte est donc entaché d'incertitude. C'est pourquoi on doit mesurer  $h_2$  à l'aide d'un piston taré pour avoir un résultat plus précis de l'équivalent de sable. Pour cela, on doit suivre le mode opératoire suivant :

- On descend lentement le piston taré dans le liquide à travers le flocculat, le manchon prend appui sur le bord supérieur de l'éprouvette, et l'immobiliser en contacte du sable,

- On mesure  $h'_2$

NB : les mesures de  $h_1$ ,  $h_2$  et  $h'_2$  peuvent être faite avec la précision du millimètre.

e) Résultats :

**Tableau 9 : Equivalent du sable**

Equivalent de sable		Essai 1	Essai 2
Hauteur total $h_1$		12 cm	11.6 cm
Hauteur sédiment	à vue $h'_2$	9.9 cm	9.9 cm
	Au piston $h_2$	9.6 cm	9.5 cm
ESV		0.82	0.88
Equivalent de sable	ES	0.8	0.82
ES moyen		81%	
ESV moyen		85%	

f) Interprétation :

ES > 80, on a donc un sable très propre, l'absence presque total de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton.

**IV. 3. 2. 3. Essai colorimétrique à la soude :**

a) But de l'essai :

L'essai a pour but de connaître l'existence ou l'absence de matières organiques qui conditionne l'utilisation de l'échantillon dans la fabrication du béton.

b) Principe :

L'essai consiste à attaquer le sable par une solution aqueuse de soude. Après 24 heures de repos, on compare la couleur du floculat à celle d'une solution colorée type.

c) Matériels utilisés :

- Eprouvettes graduées de 250 ml
- Tamis d'ouverture 5 mm (module A.F.N.O.R 38)

d) Les produits chimiques :

- Soude
- Alcool éthylique
- Acide tannique
- Eau distillée

e) Préparation des solutions:

- Liqueur tannique alcoolisée : Introduire dans un flacon, à raison de 90% du volume, d'une solution d'acide tannique à 2%. Compléter avec de l'alcool éthylique à 95%. Boucher le flacon. L'agiter fortement. Conserver le flacon plein à l'obscurité.
- Solution de soude à 3% : verser 30g de soude dans 1000ml d'eau distillée, agité fortement.
- Solution colorée type de densité optique 1,08 : Dans une éprouvette graduée de

250 ml, malaxer 97,5 ml de solution de soude à 3% avec 2,5 ml de liqueur tannique alcoolisée. Boucher l'éprouvette, agiter fortement et laisser au repos pendant 24h.

f) Préparation de l'échantillon :

- Prélever dans un tas de granulat bien brassé une quantité représentative de l'échantillon ;
- Sécher avec une température inférieure à 60° ;
- Procéder à l'échantillonnage ;
- A l'aide du tamis d'ouverture 5mm, séparer le sable contenu dans chaque partie.

g) Conduite de l'essai :

- Verser une partie du sable dans une éprouvette graduée de 250ml jusqu'à 100ml ;
- Ajouter la solution aqueuse de soude à 3% jusqu'à ce que le volume du liquide soit 160ml ;
- Boucher l'éprouvette, l'agiter fortement et la laisser au repos pendant 24 heures ;
- Préparer la solution colorée type de densité optique 1,08 ;

Après 24 heures, comparer la couleur du liquide au dessus du sable à celle de la solution type préparée en même temps :

- L'échantillon est dangereux c'est-à-dire contient des matières organiques si la coloration est plus foncée que celle de la solution type ;

- On peut utiliser l'échantillon à la fabrication du béton dans le cas contraire c'est-à-dire, la coloration est plus claire que celle de la solution type.

h) Résultat :

La coloration est plus claire que celle de la solution type. Donc ce type de sable peut être utilisé à la fabrication d'un béton.

#### **IV. 3. 2. 4. Coefficient volumétrique d'un gravier**

a) But de l'essai :

La détermination du coefficient volumétrique a pour but de caractériser un grain ou un granulat par sa forme afin de pouvoir prendre une décision sur sa possibilité d'emploi.

b) Equipement nécessaire :

On utilise des matériels très simples :

-Le calibre

Le chiffre correspondant à chaque encoche est le volume de la sphère correspondant au grain  $V = \Pi \frac{N^3}{6}$

-Un tamis de diamètre 5 mm qui sert à éliminer la partie sableuse de l'échantillon

-Une éprouvette graduée de volume 1000 cm<sup>3</sup> qui sert à mesurer le volume de l'échantillon à utiliser.

c) Principe :

L'essai consiste à chercher le rapport entre le volume réel V de l'échantillon et son volume fictif si chaque grain qui le compose est considéré comme des sphères.

d) Conduite de l'essai :

➤ Préparation de l'échantillon :

- Sécher l'échantillon ;

- Tamiser au tamis de 5 mm pour éliminer les éléments de diamètre inférieur à 5 mm ;

- Garder les éléments supérieurs à 5 mm c'est-à-dire le refus du tamis de 5 mm ;

- Prendre un échantillon d'environ 250g.

➤ Mesure de chaque grain au calibre et détermination du volume de sphère.

- Prendre successivement chaque grain et chercher la plus grande encoche qui le retient ;

- Grouper les grains retenus par chaque encoche ;

- Compter les nombres de grain pour chaque groupe ;
- Multiplier ce nombre par le chiffre correspondant à l'encoche ;
- Faire la somme des valeurs obtenues et on obtient  $\Sigma \Pi \frac{N^3}{6}$

➤ Détermination du volume réel de l'échantillon :

- Mettre dans l'éprouvette graduée une quantité d'eau de volume  $V_1$ . Noter  $V_1$
- Verser tout les grains dans l'éprouvette contenant de l'eau et mesurer de nouveau le volume  $V_2$  du niveau de l'eau. Noter  $V_2$ .

e) Expression des résultats :

- On calcul  $V = V_2 - V_1$

- Le coefficient volumétrique est :  $C_v = \frac{V}{\Sigma \frac{N^3}{6}}$

Pour le gravillon 3/8, on a  $C_v = 0.10$  et pour le gravillon 8/20, on a  $C_v = 0.17$

**IV. 3. 2. 5. Mesure de la masse volumique apparente :**

a) But de l'essai :

L'essai a pour but de déterminer la masse d'une unité de volume apparente (c'est-à-dire tenant compte du vide dans les matériaux) afin de pouvoir transformer la composition massique des granulats constituant un béton, en une composition volumique.

b) Principe :

L'essai consiste à remplir un moule dont on connaît le volume et déterminer la masse du contenu.

c) Matériels utilisés :

Un moule de volume  $V$

- Un balance ;
- Une règle ;

d) Conduite de l'essai :

- Peser le moule, noter son poids  $P_1$  ;
- Remplir de l'échantillon :

Pour éviter toute influence de tassement, il faut suivre le mode de remplissage suivant :

- Prendre l'échantillon dans les deux mains formant entonnoir ;
  - Placer ses deux mains à 10 cm au dessus du moule et laisser l'échantillon tomber, ni trop vite, ni trop lentement ;
  - Verser ainsi l'échantillon, toujours au centre de la mesure, jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône ;
  - Araser à la règle
- Peser le moule rempli d'échantillon et noter son poids  $P_2$

e) Expression des résultats :

On a : Volume du moule =  $V$  [l]

Poids du moule =  $P_1$  [kg]

Poids du moule + échantillon =  $P_2$  [kg]

On calcule : Poids de l'échantillon  $P = P_2 - P_1$  [kg]

Et on obtient la masse volumique apparente :  $\gamma_d = \frac{P}{V}$

➤ **Sable 0/3 :**

**Tableau 10 : masse volumique apparente du sable 0/3**

	<b>Essai 1</b>	<b>Essai 2</b>	<b>Essai 3</b>
Poids de l'échantillon [kg]	1442	1417	1412.5
Volume du moule [l]	1000	1000	1000
Masse volumique apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1422	1417	1413

$$\gamma_d = 1417 \text{ kg/m}^3$$



➤ [Gravillon 3/8 :](#)

**Tableau 11 : masse volumique apparente du gravillon 3/8**

	<b>Essai 1</b>	<b>Essai 2</b>	<b>Essai 3</b>
Poids de l'échantillon [kg]	11107.5	10867.5	10832
Volume du moule [m <sup>3</sup> ]	8000	8000	8000
Masse volumique apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1388	1358	1354

$$\gamma_d = 1366 \text{ kg/m}^3$$

➤ [Gravillon 8/20 :](#)

**Tableau 12 : Masse volumique apparente du gravillon 8/20**

	<b>Essai 1</b>	<b>Essai 2</b>	<b>Essai 3</b>
Poids de l'échantillon [kg]	11311.5	11553.5	11619.5
Volume du moule [m <sup>3</sup> ]	8000	8000	8000
Masse volumique apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1414	1445	1452

$$\gamma_d = 1437 \text{ kg/m}^3$$

**IV. 3. 2. 6. Masses spécifiques des granulats**

a) But de l'essai :

L'essai a pour but de déterminer la masse d'une unité de volume absolue d'un matériau (c'est à dire, on ne tient pas compte du volume de vide) afin de pouvoir traduire les pourcentages de chaque granulat par rapport à la totalité d'élément sec composant le béton, en une composition massique.

b) Principe :

L'essai consiste à déterminer le volume absolu occupé par une certaine masse d'un matériau étudié.

c) Matériels utilisés :

- Pycnomètre (ayant un couvercle en bouchon) ;
- Balance ;
- chiffons propres.

d) Conduite de l'essai :

- Peser le pycnomètre avec sa couvecle, noter son poids  $P_1$  [en gramme] ;
- Remplir d'eau et le couvrir sans bulle d'air ;
- Peser le pycnomètre rempli d'eau et noter son poids  $P_2$  [en gramme] ;
- Vider le pycnomètre et bien essuie avec les chiffons ;
- Verser l'échantillon dans le pycnomètre (il faut prendre des précautions pour qu'aucun élément fin ne soit perdu) ;
- Peser le pycnomètre contenant l'échantillon et noter son poids  $P_3$  [en gramme] ;
- Remplir d'eau le pycnomètre contenant l'échantillon et le couvrir sans bulle d'air ;
- Peser l'ensemble pycnomètre + échantillon + eau et noter son poids  $P_4$  [en gramme].

$$\gamma_s = \frac{E_5}{V}$$

e) Expression des résultats :

➤ Sable 0/3 :

**Tableau 13 : Masse spécifique du sable 0/3**

Référence pycnomètre	<b>2</b>	<b>3</b>
Poids du pycnomètre : $P_1$ [g]	388.5	384.5
Poids du pycnomètre + eau : $P_2$ [g]	890	892
Volume pycnomètre : $V_1 = P_2 - P_1$ [cm <sup>3</sup> ]	501.5	507.5
Poids pycnomètre + échantillon : $P_3$ [g]	1007.5	986.5
Poids pycnomètre + échantillon + eau : $P_4$ [g]	1268.5	1243
Poids d'eau : $V_2 = P_4 - P_3$	261	256.5
Volume échantillon : $V = V_1 - V_2$ [cm <sup>3</sup> ]	240.5	251
Poids échantillon : $E_5 = P_3 - P_1$ [g]	619	602
Masse spécifique : $\gamma_s$ [g/m <sup>3</sup> ]	2.574	2.398

$$\gamma_s = 2486 \text{ kg/m}^3$$

➤ Gravillon 3/8 :

**Tableau 14 : Masse spécifique du gravillon 3/8**

Référence pycnomètre	<b>2</b>	<b>3</b>
Poids du pycnomètre : $P_1$ [g]	388.5	384.5
Poids du pycnomètre + eau : $P_2$ [g]	890	892
Volume pycnomètre : $V_1 = P_2 - P_1$ [cm <sup>3</sup> ]	501.5	507.5
Poids pycnomètre + échantillon : $P_3$ [g]	991.5	993
Poids pycnomètre + échantillon + eau : $P_4$ [g]	1267	1271.5
Poids d'eau : $V_2 = P_4 - P_3$ [g]	275.5	278.5
Volume échantillon : $V = V_1 - V_2$ [cm <sup>3</sup> ]	226	229
Poids échantillon : $E_5 = P_3 - P_1$	603	608.5
masse spécifique : $\gamma_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2.67	2.66

$$\gamma_s = 2660 \text{ kg/m}^3$$

➤ Gravillon 3/8 :

**Tableau 15 : Poids spécifique du gravillon 8/20**

Référence pycnomètre	<b>2</b>	<b>3</b>
Poids du pycnomètre : $P_1$ [g]	388.5	384.5
Poids du pycnomètre + eau : $P_2$ [g]	890	892
Volume pycnomètre : $V_1 = P_2 - P_1$ [cm <sup>3</sup> ]	501.5	507.5
Poids pycnomètre + échantillon : $P_3$	971.5	976.5
Poids pycnomètre + échantillon + eau : $P_4$	1259	1267
Poids d'eau : $V_2 = P_4 - P_3$ [g]	287.5	290.5
Volume échantillon : $V = V_1 - V_2$ [cm <sup>3</sup> ]	214	217
Poids échantillon : $E_5 = P_3 - P_1$ [cm <sup>3</sup> ]	583	592
masse spécifique : $\gamma_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2.72	2.73

$$\gamma_s = 2720 \text{ kg/m}^3$$

#### **IV. 4. SUPERPLASTIFIANT :**

On a utilisé le superplastifiant Chryso R fluid Optima 200. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau de nouvelle génération, à base de polycarboxylate modifié.

Grâce à sa structure moléculaire spécifique, CHRYSO R 200 permet d'obtenir des bétons de très bonne ouvrabilité, tout en ayant une diminution du rapport eau/ciment.

Chryso R fluid Optima 200 permet également de garder dans le temps de l'ouvrabilité du béton frais sans retarder la prise.

De par ses caractéristiques, Chryso R fluid Optima 200 apparaît comme un superplastifiant approprié pour les chantiers de génie civil. Il permet la confection de bétons autoplaçant.

Les données suivantes ont été fournies par le fabricant.

##### **IV. 4. 1 Spécification :**

Nature : liquide

Couleur : beige clair à brun

Densité (20°C) : 1.050 +/- 0.010

pH : 6.5 +/- 1.5

Extrait sec (halogène) : 19.5% +/- 1.5%

Teneur en ions Cl<sup>-</sup> ≤ 0.1 %

Teneur en Na<sub>2</sub>O équivalent ≤ 1.50 %

Durée de vie : 9 mois

#### **IV. 4. 2 Caractéristiques :**

Chryso R fluid Optima 200 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

##### ***IV. 4. 2. 1 Sur béton frais :***

- D'amélioration considérablement la fluidité ;
- D'obtenir un E/C très faible tout en gardant une très bonne maniabilité ;
- D'éviter la ségrégation ;
- De faciliter la mise en œuvre du béton.

##### ***IV. 4. 2. 2 Sur béton durci :***

- De diminuer la porosité ;
- De réduire le retrait et le risque de fissuration ;
- D'augmenter les résistances mécaniques au jeune âge et à long terme ;
- D'augmenter la durabilité

#### **IV. 4. 3 Mode d'emploi :**

Le Chryso R fluid Optima 200 est introduit dans l'eau de gâchage. Selon la norme, il doit être utilisé dans une plage de dosage : 0.3 à 3.0 kg pour 100 kg de ciment. Il est courant de doser ce produit à 0.5% à 5% du poids du ciment.

## IV. 5. LES FIBRES

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres de bambou. Plusieurs chercheurs ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des bétons.

Parmi les fibres naturelles, les fibres de bambou attirent de plus en plus l'attention. En effet, un des avantages des fibres de bambou est que c'est une ressource naturelle abondante. En plus, le bambou est l'une des dernières ressources végétales qui n'ait pas été massivement exploitée et sa croissance est très rapide.

### IV. 5. 1 Préparation des fibres

Les bambous sont tout d'abord coupés dans leurs longueurs en morceaux de 10 à 15 cm de large, les nœuds et les téguments sont éliminés. Puis, ces morceaux sont fendus en minces lamelles d'épaisseur de 1 à 3 mm. Les lamelles sont mises à macérer dans de l'eau pendant 72 heures pour gonfler. Après, les fibres de bambou sont extraites par deux techniques :

- pressage : les lamelles de bambou sont mises sous presse pendant 30 secondes. Les fibres sont ensuite séparées à la main les unes des autres.
- laminage : les lamelles de bambou sont laminées avec une vitesse de rotation de 60 tours/min, l'espace entre les deux rouleaux étant de 0,1mm. Chaque lamelle, est laminée plusieurs fois de suite soit parallèlement, soit perpendiculairement aux fibres.

Les fibres de bambou sont ensuite séchées au soleil pendant 48 heures, puis dans un four à 80 - 85°C avant incorporation dans le béton. Après extraction, les dimensions des fibres sont mesurées par tamisage et microscopie. Les dimensions des fibres de bambou peuvent être encore réduites par broyage à l'aide d'un moulin à café.



*Photo 1 : bambou*

## IV. 5. 2 Présentation de la fibre de bambou

Afin de mieux comprendre les propriétés du composite renforcé par les fibres de bambou, il est nécessaire de déterminer la composition chimique de la fibre de bambou.

### IV. 5. 2. 1 Analyse des matières organiques

L'analyse des matières organiques des fibres de bambou a donné les proportions de cellulose, d'hémicellulose et de lignine illustrée sur le tableau ci-après :

**Tableau 16 : Matières organiques dans les fibres de bambou**

Composants	Proportion en (%)
Cellulose	47.1
Lignine	20.2
Hémicellulose	16.1
Pectine	9.6
Cendre	1.1
Cires	5.9
Silice	0.7

Source : Auteur

### IV. 5. 2. 2 Analyse des matières minérales

L'analyse minérale des cendres de la fibre de bambou a donné les résultats illustrés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 17 : Matières minérales dans les fibres de bambou**

Eléments	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	PF
%	34.13	6.57	4.64	2.51	1.47	1.31	47.5

Nous constatons que les fibres utilisées contiennent un taux remarquables de SiO<sub>2</sub> et de CaO. La présence de ces dernières dans le bambou est due à la fixation des poussières des vents, de sables sur la cuticule.

### **IV. 5. 2. 3 Biométrie des fibres :**

Les dimensions des fibres, et spécialement la longueur influencent largement la qualité de la pâte. Pour notre cas, nous avons utilisé une méthode manuelle et visuelle par observation sur un microscope optique. Les caractéristiques dimensionnelles moyennes des fibres de l'échantillon analysé se résument dans le tableau suivant :

**Tableau 18 : Dimension des fibres**

Longueur L [mm]	2.4
Largeur D [ $\mu\text{m}$ ]	20
L/D	120
Diamètre moyen [ $\mu\text{m}$ ]	15-25

Source: Auteur

### **IV. 5. 3 Propriétés physiques des fibres de bambou**

Les valeurs représentant les propriétés physiques des fibres de bambou sont présentées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 19 : Propriétés physiques et mécanique des fibres de bambou**

Contrainte à la rupture [Mpa]	500- 740
Module d'élasticité [GPa]	30-50
Déformation [%]	2
Densité [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1.4

Source: Auteur

### **IV. 5. 4 Elimination des impuretés : Trempage**

Ce traitement sert à retirer les cires et les poussières qui se trouvent à la surface des fibres. Un trempage est strictement dit une immersion dans un liquide. La matière trempée ici est la fibre de bambou et le liquide utilisé est de l'eau salée. Plus spécifiquement de l'eau distillée et du chlorure de sodium (NaCl, nom commercial : le sel de cuisine) sont utilisés.

La durée d'immersion est suffisamment longue pour que les cires aient assez de temps pour se dissoudre dans l'eau salée. Elle est d'environ 72 heures.

Pendant l'extraction des composés comme les pectines et la lignine sont éliminées



## IV. 6. L'EAU

L'eau utilisée pour le gâchage du béton est celle du robinet, de l'eau potable. Elle sert d'une part à l'hydratation du ciment et d'autre part elle permet la fluidification de la pâte. Dès que l'eau entre en contact avec le ciment anhydre, on a diverses réactions qui correspondent à la formation des hydrates de ciments. L'eau a subi des traitements pour éliminer les éléments qui pourraient la rendre impropre à la consommation. Les caractéristiques de l'eau de la JIRAMA sont données par le tableau suivant :

**Tableau 20 : Caractéristiques de l'eau de JIRAMA**

constituants	caractéristiques
Insolubles [mg/l]	0
Matières dissoutes [mg/l]	0.0034 à 0.005
Carbonates + bicarbonates alcalins [%]	0.0028
Sulfates en SO <sub>3</sub> [%]	0
Sulfates en S [%]	0
Sucres [%]	0
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0
NO <sub>3</sub> [%]	0
Acidité en pH	7.20 à 8.50
Acidité humique	Aucune coloration brunâtre
Chlorures [mg/L]	3.55 à 8.50
Ions soufre [%]	0

Source : JIRAMA

### IV. 6. 1 Caractéristiques Physiques et tolérances :

Les eaux employées pour le gâchage des bétons ne doivent pas contenir de matières en suspension au-delà des proportions suivantes :

- 2 grammes par litre pour béton ou mortier type A et B
- 5 grammes par litre pour béton ou mortier type C

#### **IV. 6. 2      Caractéristiques Chimiques et tolérances :**

Les eaux employées pour le gâchage des bétons ne doivent pas contenir de sels dissous au-delà des proportions suivantes :

- 15 grammes par litre pour béton ou mortier type A et B.
- 30 grammes par litre pour béton ou mortier type C.

Les bétons ou mortiers de types A sont de haute qualité et de forte résistance, ceux de type B sont des mortiers à grande imperméabilité, tandis que le type C représente ceux dits courants.

D'après ses caractéristiques physiques et chimiques, et en tenant compte des tolérances imposées par les normes, l'eau de la JIRAMA convient bien pour le gâchage des bétons de type A, B et C (donc tous les types de béton).

## **Chapitre V :      COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES BETONS AUTOPLACANTS**

### **V. 1.      FORMULATION DES BAP ETUDIES**

En appliquant les recommandations de la méthode japonaise exposée dans l'étude bibliographique.

La compacité du gravillon est déterminée à partir de la masse volumique absolue et apparente de la manière suivante :

La compacité étant le volume solide dans un volume unitaire, elle peut être calculée en divisant la masse volumique apparente par la masse volumique absolue.

$$\text{On a : compacité} = \frac{\text{volume des solides}}{\text{volume solide} + \text{volume des vides}} = \frac{V_S}{V_S + V_V}$$

Et comme ;

$$\text{Masse volumique apparente} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volume solide} + \text{volume des vides}} = \frac{m}{V_S + V_V}$$

$$\text{Et ; masse volumique absolue} = \frac{\text{masse}}{\text{volume des solides}} = \frac{m}{V_S}$$

Donc

$$\text{Compacité} = \frac{\text{masse volumique apparente}}{\text{masse volumique absolue}} = \frac{V_S}{V_S + V_V} \quad (1)$$

#### **V. 1. 1. Détermination du dosage en gravier :**

La masse volumique apparente étant de 1,401 et la masse volumique absolue est égale à 2,70 ; notre gravier présentera alors une compacité  $\gamma$  égale à 0,518.

Selon l'approche Japonaise, que l'on a adoptées, le dosage volumique en gravier sera donc 50% de  $\gamma$ , soit alors :  $0,259\text{m}^3$ .

Le dosage pondéral sera donc :  $G = 0,259 \times 2,70 \times 1000 = 700 \text{ kg}$ .

### V. 1. 2. Détermination du dosage en sable :

Le dosage volumique en sable étant 40% du volume total du mortier (approche japonaise), il sera calculé comme suit :

En posant que  $g$ ,  $s$ ,  $c$ ,  $f$ ,  $s_p$ ,  $e_g$  et  $v$  sont respectivement les volumes de gravier, sable, ciment, fines, superplastifiant, eau de gâchage et vides on peut écrire (en litres) :

$$g + s + c + f + Sp + e_g + v = 1000 \quad (2)$$

$$s + c + f + Sp + e_g + v = 1000 - g = \text{Volume du mortier} \quad (3)$$

Et puisque le volume du sable est 40 % du volume du mortier on peut écrire :

$$s = 0.4 (1000 - g)$$

$$s = 0.4 (1000 - 259) = 296.4 \text{ litres}$$

La masse volumique absolue du sable étant 2.5, le dosage pondéral en sable sera :

$$S = 296.4 \times 2.5 = 741 \text{ kg}$$

### V. 1. 3. Pâte liante :

- Résistance cible  $f_c$  :

On se fixe une résistance  $f_{ck} = 27 \text{ Mpa}$  à 28 jours, la résistance cible sera :

$$f_c = f_{ck} + 4 \text{ Mpa car } f_{ck} > 25 \text{ Mpa et la fabrication est régulé donc } f_c = 31 \text{ Mpa}$$

- Quantité d'eau et d'air occlus :

Le dosage en eau est fixé à 250 litres et comme le béton autoplacant est très fluide d'où  $V_{air} = 15 \text{ litres}$ .

- Coefficient granulaire de BOLOMEY  $K_b$  et le coefficient  $K_v$

Notre granulat est un granite de diamètre maximale 15mm d'où  $K_b = 0.50$

$$\text{Et } K_v = E / (E + V_{air}) = \frac{250}{(250 + 15)} = 0.94$$

- Dosage en ciment et en cendre de balle de paddy :

Le calcul du dosage en ciment et en fines se fait comme suit :

La résistance à la compression du BAP peut être calculée par la formule de

$$\text{Bolomey: } f_c = K_b f_{CE} \left( K_v \frac{L}{E} - 0.5 \right)$$

$$\frac{L}{E} = \frac{\frac{f_c}{K_b f_{CE}} + 0.5}{K_v} = \frac{\frac{31}{0.50 \cdot 54.8} + 0.5}{0.94}$$

$$\frac{L}{E} = 1.73$$

$$\Rightarrow L = 1.73 \times 250 = 432.5 \text{ kg}$$

$\Rightarrow$  Pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage. On a imposé  $\frac{F}{F+C} = 0.25$

$$\Rightarrow F = 0.33C$$

L est le liant équivalent et se compose de ciment C et d'une partie d'additions minérales F, soit  $L = C + kF$  avec  $k = 0.25$

$$L = C + 0.25 \times (0.33C) = C (1 + 0.0825) = 1.0825C$$

$$\Rightarrow C = \frac{L}{1.0825}$$

$$C = \frac{432.5}{1.0825} = 400 \text{ kg/m}^3$$

Donc le dosage en ciment est égal  $400 \text{ kg/m}^3$

Et le dosage en cendre de balle de paddy est égal :  $F = 0.33 \times 400 = 132 \text{ kg}$

- Dosage en superplastifiant :

Le dosage du superplastifiant est de l'ordre de 0.5% à 2% du poids du liant. On va prendre la moyenne d'où  $S_p = \frac{1.25 \times L}{100}$

$$S_p = \frac{1.25 \times 432.5}{100} = 5.40 \text{ kg}$$

La quantité de superplastifiant en extrait sec est égale à 5.40 kg/m<sup>3</sup>. Cette quantité est contenue dans environ 24.5 L de solution, volume qui sera tenu en compte dans l'eau de gâchage.

**Tableau 21: Composition d'un mètre cube de béton autoplaçant témoin**

Constituants		Poids sec en [kg/m <sup>3</sup> ]	Volume en [L]
ciment		400	127.5
Graviers	Classe 3/8	350	129.63
	Classe 8/20	350	134.6
Sable 0/3		741	296.4
Cendre de balle de riz		132	101.5
Eau		250	250
Superplastifiant		5.40	5.14
Air occulé			15

Ce qui nous donne une densité théorique  $\Delta_{Th} = 2228.4 \text{ kg /m}^3$

## V. 2. LES ESSAIS ET CARACTERISATIONS DES BETONS

### V. 2. 1. Confection des gâchées :

Pour la confection des gâchées, nous avons utilisé beaucoup de matériels et fournitures courants (balances, récipients, truelles, spatules, huile de coffrage.....), mais également des appareils tels que le cône d'Abrams, malaxeur, boîte en L, tamis.

Les granulats, le ciment et les cendres de balle de riz sont placés, après pesage, dans un malaxeur de laboratoire. Un premier malaxage à sec a été effectué durant 30 secondes. On ajoute de l'eau, par la suite, un deuxième malaxage de deux minutes a été réalisé.

### V. 2. 2. Analyse à l'état frais

Les bétons formulés ont été testés pour vérifier si les objectifs visés sont bien atteints. Les essais réalisés pour ce béton sont :

- L'étalement,
- L'essai de stabilité au tamis,
- L'essai à la boîte en L

Ce qu'on peut remarquer en premier lieu, c'est l'étalement qui n'atteint pas les 60 cm recommandé pour un bon béton autoplaçant. Il va falloir donc, procéder à des corrections des compositions pour obtenir l'étalement souhaité (60 cm et plus).

Afin d'ajuster les compositions, nous avons, en un premier lieu augmenté la quantité d'eau et nous avons mesuré l'évolution de l'étalement. Les résultats que nous avons obtenus sont représentés ci-dessous :

**Tableau 22 : Evolution de l'étalement en variant le dosage en eau**

E	220	222	225	227	229	230
C	400	400	400	400	400	400
F	115,5	115,5	115,5	115,5	115,5	115,5
Sp (kg)	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40
Etalement [cm]	53	54.5	56,5	58.2	63.3	66

D'après ces résultats, on remarque que l'ajout d'eau permet une augmentation considérable de l'étalement. Cette demande en eau plus importante induite par une surface spécifique plus importante de la cendre de balle de riz. Ces cendres sont des composés de particules de dimensions inférieures à 125  $\mu\text{m}$ , leur surface spécifique joue un rôle prépondérant sur l'écoulement du béton.

Cependant, il est essentiel de ne pas perdre de vue l'aspect de la cohésion du béton qui doit être vérifié. On sait que l'augmentation du dosage en eau provoque une diminution de la cohésion au sein du mélange qui peut entraîner des phénomènes de ségrégations très préjudiciables. C'est pour cette raison que nous avons testé, en plus l'étalement, pour chaque mélange étudié ; la stabilité au tamis, l'essai à la boîte en L. Ces mesures qui permettent d'apprécier sur la stabilité et la capacité de remplissage du béton.

Après ajustement du dosage en eau, le tableau suivant présente les caractéristiques rhéologiques du béton après malaxage :

**Tableau 23: Caractéristiques rhéologiques du BAP**

Essai	résultats	unités
Etalement au cône d'Abrams	660	mm
Stabilité au tamis	7.5	%
Boîte en L ( $H_2/H_1$ )	0.82	

D'après ces résultats, on remarque :

- **Sur l'étalement des BAP** que nous pouvons constater que notre béton témoin respecte le critère d'étalement et on observe un étalement 660 mm qui le classerait dans les bétons autoplaçants ;



*Photo 2 : étalement du BAP*

- **Sur l'auréole de laitance des BAP** que l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était absente ou très faible (de 1 à 2 mm). De plus, les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton.
- **Sur la ségrégation statique des BAP** que l'essai de stabilité au tamis permet de déduire que notre BAP témoin possède une stabilité satisfaisante. Car notre BAP a un taux de ségrégation inférieur à 15 %.
- **Sur la ségrégation dynamique des BAP** : lors de l'écoulement en boîte en L, on n'observe aucun blocage au niveau des armatures et presque tout le mélange coule vers la partie horizontale de la boîte.

Bref, notre béton témoin présente d'excellentes propriétés rhéologiques à l'état frais. Ces excellentes propriétés sont dues à la finesse des cendres de balle de riz qui sont composées de particules de dimensions inférieures à 125  $\mu\text{m}$ . Leur surface spécifique joue un grand rôle prépondérant sur l'écoulement du béton. Ainsi l'emploi de superplastifiant permet aussi d'avoir ces excellentes propriétés dont ce rôle est de défloculer et de disperser les grains de ciment.



### **V. 2. 3. CARACTERISATION DES BETONS A L'ETAT DURCI :**

Après la mise en œuvre dans leur moule, les éprouvettes cylindriques et prismatiques sont conservées dans une chambre humide pendant 24 heures. Une fois démoulées, elles subissent une rectification et sont conservées sous l'eau.

Avant chaque essai, les éprouvettes sont pesées pour déterminer la masse volumique apparente afin de vérifier l'homogénéité du béton.

Une série de mesures mécaniques ont été faites pour chaque béton :

- Essais de compression pour la résistance à la compression à 7<sup>ème</sup> et à 28<sup>ème</sup> jours ;
- Essai de flexion pour la résistance à la traction par flexion à 7<sup>ème</sup> et à 28<sup>ème</sup> jours ;
- La variation dimensionnelle et pondérale (retrait et perte en masse) jusqu'à 28 jours.

Les éprouvettes destinées à l'écrasement pour la détermination des propriétés mécaniques sont conservées dans un milieu humide et à température de 20° C.

#### ***V. 2. 3. 1. Essais de compression sur éprouvettes cylindrique :***

L'essai a été réalisé selon la norme NF P 18-406, sur des éprouvettes cylindriques Ø16x32. Après un centrage parfait, la mise en charge a été effectuée avec une vitesse de montée de charge constante. Au moment de la rupture, on ouvre lentement la vanne de chargement et on lit alors la charge de rupture. En divisant la charge de rupture sur la section d'une éprouvette, on obtient la contrainte en compression «  $f_c$  » de cette éprouvette.

$$f_c \text{ (Mpa)} = P_r \text{ (N)} / S \text{ (mm}^2\text{)}$$

Avec  $P_r$  : la charge de rupture en Newton ;

S : la section de l'éprouvette où  $S = 201006 \text{ mm}^2$

#### ***V. 2. 3. 2. Essai de flexion :***

La résistance à la traction par flexion a été déterminée à l'aide d'une machine de flexion 3 points de 150 KN, sur des éprouvettes prismatique 7x7x28 cm conformément à la norme NF P18-407. (NA 428). Les éprouvettes ont été disposées dans la machine d'essai. Après un centrage parfait, la mise en charge a été effectuée avec une vitesse de montée de charge constante. Au moment de rupture, on ouvre lentement la vanne de chargement. L'aiguille du manomètre intégrée dans la machine indique la charge de rupture.

La résistance à la traction par flexion est calculée ;

$$f_t = 1.8 P_r / a^2$$

Avec  $P_r$  : la charge de rupture et

a : le côté de la section carrée de l'éprouvette

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques rhéologiques du béton autoplaçant témoin à l'état durci.

**Tableau 24 : Résultats obtenus à l'état durci**

	7 <sup>ème</sup> jours	28 <sup>ème</sup> jours
Résistance à la compression [Mpa]	13.5	27
Résistance à la flexion [Mpa]	3.25	5.18

Le tableau ci-dessus donne les résultats obtenus des éprouvettes de chaque gâchée sur les résistances à la compression et à la traction par flexion. Compte tenu de la résistance obtenue à 28 jours, on peut considérer que l'objectif est presque atteint.

L'utilisation de la cendre de balle de riz dans la formulation de béton génère donc une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges. Les particules fines de la cendre, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique du béton.

### **V. 3. INFLUENCE DES FIBRES DE BAMBOU SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES BAP**

#### **V. 3. 1. Les essais à l'état frais pour les bétons Autoplaçants fibrés :**

Pour la composition de ce type de béton nous avons réalisé la même composition que celle de béton autoplaçant précédent mais avec l'incorporation des fibres de bambou.

Nous avons incorporé de fibres de bambous avec des dimensions différentes avec un pourcentage fixe de 5 % du poids du liant.

Le tableau suivant présente les résultats :

**Tableau 25 : Résultats de l'essai sur les BAP fibré à l'état frais**

fibres	5 % du poids du liant		
Eau [L]	230	250	265
Etalement en [mm]	600	635	660
Stabilité au tamis %	6.5	5.65	4.80
Boîte en L	0.45	0.65	0.78

On s'aperçoit que les fibres diminuent la maniabilité du béton ; c'est pour cela que l'ajout d'une quantité d'eau supplémentaire est nécessaire.

Lors de l'essai à la boîte en L, la majeure partie des grains s'est tassée au fond de la partie verticale derrière les armatures, tandis qu'une partie seulement et la majeure partie de la laitance se sont écoulées dans la partie horizontale. Il y a une séparation du mélange. Ceci s'explique par la forme et la dimension des fibres qui dépasse l'espacement entre les armatures.



**Photo 3 : Essai à la boîte en L**

### **V. 3. 2. Les essais à l'état durcis des bétons Autoplaçants fibrés**

Les propriétés mécaniques permettant de caractériser un BAP fibré à l'état durci sont les résistances à la compression, à la traction, et à la flexion.

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques rhéologiques du béton autoplaçant fibré à l'état durci.

**Tableau 26 : Résultats obtenus à l'état durci**

	7 <sup>ème</sup> jours	28 <sup>ème</sup> jours
Résistance à la compression [Mpa]	13.45	25.54
Résistance à la flexion [Mpa]	7.25	8.50

D'après les résultats représentés dans le tableau, on remarque que l'ajout des fibres influe sur les propriétés mécaniques des BAP.

***V. 3. 2. 1. Dans le cas de la résistance à la compression :***

La résistance à la compression est sensiblement la même que celle du béton sans fibres. Toutefois, on n'observe qu'un éclatement très limité du béton. Par contre la rupture se produit brutalement par élargissement rapide, sans avertissement, d'une fissure pour les mélanges sans fibres. Cela s'explique que les fibres influent directement sur l'ouverture de la fissure et donc sur la rigidité et la ductilité après fissuration.

D'après ces résultats, on peut dire que les fibres de bambous n'apportent pas d'amélioration sensible en compression.

***V. 3. 2. 2. Dans le cas de la résistance à la flexion :***

Les résultats obtenus nous montrent que l'ajout des fibres influe positivement sur la résistance du béton. Pour les résistances à la flexion, on observe une nette augmentation de la résistance à la flexion pour tous les mélanges de 7 à 28 jours. Cela s'explique que les fibres de bambous jouent le rôle de frein pour la propagation des fissures et ralentissent ainsi le processus de rupture.

Les fibres influent directement sur l'ouverture de la fissure et donc sur la rigidité et la ductilité après fissuration.

Les fibres végétales absorbent l'eau. On remarque que, les fibres de bambou ont l'avantage de posséder une faible densité.

Le béton subit des fissurations dont les causes sont diverses : retrait, réactions chimiques, contraintes mécaniques ou environnementales,... Pour lutter contre ces fissurations, on a tendance à augmenter la section des aciers d'armatures. L'adhérence entre l'acier et le béton empêche alors les fissures de se propager car l'acier ne souffre pas du phénomène de retrait.

La présence de fibres dans le béton modifie son comportement interne. En effet, elles ont l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton de façon uniforme. Lorsqu'une fissure apparaît, les fibres empêchent la fissure de se propager par un effet de couture. Chaque fibre qui est, alors, soumise à un effort de traction entre les deux bords de la fissure. Cet effort de traction est, ensuite, reporté sur les parois du béton en adhérence avec la fibre. Ce phénomène s'effectue dès l'amorçage de la fissure, augmentant ainsi la résistance à la fissuration du béton.

Ces fibres améliorent, également, la résistance à la flexion des bétons.

L'un des principaux avantages des fibres de bambou par rapport aux armatures réside dans leur faible densité à l'origine de l'allègement des bétons. Elles ne sont pas sujettes aux problèmes de corrosion contrairement aux fibres métallique. Elles permettent ainsi une meilleure durabilité du béton tout en ayant des propriétés mécaniques comparables aux bétons armés ou renforcés par des fibres métalliques courtes.

## **Chapitre VI : ETUDES DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX-ECONOMIQUES**

Etant donné la réelle potentialité que présentent les cendres de balles de paddy et les bambous ainsi que ses disponibilités et ses acquisitions facile, l'étude de la valorisation de ces produits locaux est une opportunité pour nous.

Nous allons donc présenter dans ce qui suit les avantages économiques globaux et les études d'impact du projet.

### **VI. 1. Avantages de l'utilisation des BAP :**

#### **VI. 1. 1. Ouvrabilité**

La capacité du béton autoplaçant de se mettre en place sous le seul effet de la gravité, sans préjudice pour les autres propriétés du matériau, constitue un atout significatif dans bien des domaines.

C'est ainsi que :

- Le béton autoplaçant se révèle apte à garnir les éléments les plus fins ;
- Le béton autoplaçant garantit un bon enrobage des aciers, même si le ferrailage est très dense ou très compliqué ;
- Le béton autoplaçant conserve sa cohésion, son homogénéité et de bonnes résistances, sans apport d'énergie de serrage.

#### **VI. 1. 2. Qualité d'aspect**

Conséquence de leur ouvrabilité, on peut obtenir facilement avec les bétons autoplaçant des effets architectoniques aussi variés qu'étonnants et séduisants :

- Aspect très lisse ;
- Arêtes parfaitement définies ;
- Reproduction fidèle de moules extrêmement fins ;
- Absence de défauts d'aspect.

### VI. 1. 3. Le Bruit

Avec les bétons autoplaçants les gains en termes d'acoustique pour les travailleurs concernés et l'environnement du chantier sont significatifs :

- les activités rattachées à l'usage des B.A.P. verticaux (vidange de la benne, coulage...) engendrent des bruits instantanés compris entre 80 dB(A) et 82,5 dB(A). A contrario, lors de la mise en œuvre des bétons ordinaires, l'utilisation de l'aiguille vibrante montre des niveaux sonores s'échelonnant, selon les circonstances, entre 94 dB(A) et 112 dB(A) (notamment lors du contact avec le coffrage).
- le coulage des B.A.N. horizontaux génère un niveau de bruit instantané d'environ 79 dB(A). Lors de la réalisation de planchers en béton ordinaire, le vibrage à l'aiguille et le talochage à l'hélicoptère indiquent respectivement des niveaux de bruit de 94 dB(A) et 100 dB(A).

La mise en œuvre de bétons ordinaires, comportant le positionnement des banches, les opérations de ferrailage, le coulage et le vibrage du béton, objective un niveau de bruit continu équivalent de 88,7 dB(A) pendant les 5 heures et 49 minutes qui ont été nécessaires à ces différentes opérations, ce qui, rapporté à la journée de travail, correspond à un niveau d'exposition sonore quotidienne de 87,3 dB(A). On observe donc un dépassement de la valeur limite d'exposition fixée à 87 dB(A) par le Décret n° 2006-892 du 19 Juillet 2006 relatif aux prescriptions de sécurité et de santé applicables en cas d'exposition des travailleurs aux risques dus au bruit (sans tenir compte, cependant, dans le cas présent de l'atténuation assurée par les protecteurs individuels portés par les travailleurs, en l'occurrence des bouchons moulés).

L'utilisation des B.A.P. verticaux influence de manière sensible ces niveaux sonores : le niveau d'exposition sonore quotidienne atteint 84,9 dB(A) se situant donc légèrement en dessous de la valeur d'exposition supérieure déclenchant une action de prévention. Il est à noter, cependant, que lors des opérations de coffrage et de ferrailage, aussi bien avec le béton ordinaire qu'avec le béton autoplaçant, l'utilisation de marteaux et de disquieuses contribue à augmenter grandement les niveaux sonores mesurés.

En ce qui concerne les B.A.N. horizontaux, l'absence de mesure sur la durée totale du bétonnage ne permet pas de comparaisons chiffrées avec le béton ordinaire. Cependant, l'absence de vibrage et de talochage mécanique laisse à supposer, compte tenu des résultats

des mesures instantanées, que la réduction des risques liés à l'exposition au bruit est assez conséquente.

#### **VI. 1. 4. Les vibrations**

La fréquence des vibrations induites par les aiguilles vibrantes se situe aux alentours de 200 Hertz pour le matériel électrique et entre 300 et 400 Hertz pour le matériel pneumatique.

Ces valeurs concernent l'embout de l'aiguille. Les vibrations transmises sont nettement atténuées du fait que l'opérateur tient l'outil par le câble ou par le tuyau d'alimentation du vibreur.

Les fabricants d'aiguilles vibrantes affirment qu'à une distance de 20 cm de l'embout la transmission des vibrations est négligeable.

Nous avons procédé à des mesures afin de connaître l'importance exacte de la transmission des vibrations aux mains et aux bras afin de pouvoir la comparer aux valeurs journalières rapportées à une période de huit heures fixées par le décret n° 2005-746 du 4 juillet 2005 relatif aux prescriptions de sécurité et de santé applicables en cas d'exposition des travailleurs aux risques dus aux vibrations mécaniques.

Nous avons réalisé une série de mesures à l'aide d'un capteur triaxial solidement fixé au niveau de la place de la main qui tient l'outil. Ce type de capteur permet de mesurer en temps réel les trois axes : longitudinal Z, transversal Y et sagittal X. A la fin de nos mesures nous avons calculé l'exposition journalière sur huit heures selon la formule fixée par l'arrêté du 6 juillet 2005. Les résultats montrent qu'il y a effectivement un excellent amortissement du câble et du tuyau et que le poste de travail peut être considéré comme peu vibrant. De plus l'observation sur le terrain a permis de quantifier la fréquence d'utilisation de l'aiguille vibrante d'occasionnelle (moins de 30 minutes) dans la plupart des cas et d'intermittente (30 minutes à deux heures) lors de gros coulages de planchers avec le béton ordinaire. Dans ces conditions, l'absence de vibrage lors de la mise en œuvre de B.A.P. verticaux a donc un impact limité sur les conditions de travail des opérateurs en regard du risque vibratoire.

Il n'en est pas de même pour la mise en œuvre des B.A.N. horizontaux en raison de la suppression du talochage mécanique à l'hélicoptère. En effet nous avons également effectué des séries de mesures avec le même capteur triaxial fixé sur le guidon de la machine, au niveau du positionnement des mains du salarié. Les mesures ont été réalisées lors de la



première passe de l'hélicoptère puis lors des travaux de finition. Les résultats montrent que les vibrations sont plus importantes lors du premier passage que lors de la finition.

L'observation sur le terrain a permis de quantifier la fréquence d'utilisation de l'hélicoptère d'intermittente (1 heure 30 à 2 heures par jour). Dans ces conditions nous constatons que nous sommes très proches du seuil d'alerte fixé à  $2,5 \text{ m/sec}^2$  par le décret du 4 juillet 2005 et que le retentissement est important sur les conditions de travail des opérateurs en regard du risque vibratoire.

### **VI. 1. 5. La Pénibilité**

Nous avons pu remarquer qu'avec le béton ordinaire, l'utilisation de l'aiguille vibrante pouvait générer une charge physique de travail parfois importante. Sur un voile, le maçon peut être amené à réaliser des efforts pour dégager le vibreur coincé entre le coffrage et le treillis soudé ; de même, sur un voile de grande hauteur, l'ouvrier en charge de la vibration doit sans cesse descendre et remonter l'aiguille à des niveaux différents. Par ailleurs, le passage du vibreur entre les multiples réservations à l'intérieur du coffrage nécessite des déplacements répétés avec dénivellation.

Une étude réalisée dans le cadre du projet BRITE EURAM (programme européen de recherche dans le secteur des technologies industrielles et des matériaux de pointe), a permis de comparer les efforts physiques engendrés par la mise en place des bétons ordinaires et des bétons autoplaçants en utilisant comme paramètres la fréquence cardiaque maximale de l'opérateur et sa consommation maximale d'oxygène exprimée en ml/mn/kg. Les résultats, exprimés en pourcentage des capacités maximales de l'individu, sont ensuite reportés sur une échelle de pénibilité permettant de déterminer plusieurs niveaux d'intensité physique de très faible à très dur.

Les résultats de cette étude mettent en évidence l'apport important des bétons autoplaçants en terme de réduction de la pénibilité passant d'un niveau d'intensité physique qualifié de dur pour le béton conventionnel (14,2 pour les planchers, 14,1 pour les voiles) à très faible pour le béton autoplaçant (8,8 pour les planchers, 7,8 pour les voiles). Cette différence est due à l'absence de vibrage et à la propriété autonivelante des B.A.N. horizontaux qui diminue la part du ratissage des planchers. Il faut ajouter également que lors du passage de l'hélicoptère, les bords et les angles des dalles sont réalisés manuellement d'où le maintien de postures contraignantes (penchées en avant notamment) ; de même l'opérateur doit à chaque passage

de travées soulever la machine, d'où des efforts de manutention importants. Enfin, ce poste de talochage mécanique est soumis, selon le temps de séchage du béton, à des cadences élevées.

Cette amélioration des conditions de travail a été confirmée par un questionnaire remis aux salariés concernés :

- l'avis des « compagnons » est unanime en matière de B.A.P. verticaux puisque 41% d'entre eux estiment que leurs conditions de travail sont très améliorées et 59% un peu améliorées ;
- En ce qui concerne les B.A.N horizontaux, 88% des salariés ont une opinion très positive : le caractère autonivelant des B.A.N. facilite grandement les opérations très contraignantes d'étagage et de talochage du béton. Cependant, 12% des personnes interrogées ne perçoivent pas de différence notable entre les deux techniques. Cette constatation peut s'expliquer par le maintien répété et prolongé de postures inconfortables (accroupies ou penchées en avant) pour colmater les joints entre les prédalles avant le coulage du B.A.N.

## **VI. 2. Valorisation des ressources locales**

### **VI. 2. 1. Bambou**

Madagascar est sous l'influence d'un climat tropical caractérisé par de hautes températures et une humidité élevée, conditions propices à la croissance du bambou. On retrouve le bambou principalement, dans les forêts humides et denses près des côtes Est et Sud-Est de la grande île.

Actuellement, le bambou est surtout utilisé en milieu rural pour la réalisation d'ossature, de planchers ou de toiture dans la construction légère. Il est aussi largement utilisé pour construire les échafaudages. Il est aussi utilisé comme matériaux de construction, dans l'industrie papetière, dans la fabrication de meubles et dans l'artisanat. Mais certaines études ont démontré qu'il peut aussi être utilisé comme armature dans le béton. Lorsque cette possibilité fut démontrée la première fois dans les années soixante, cela généra un intérêt considérable de la part de la communauté scientifique. Le bambou n'est donc pas seulement un matériau du passé, mais bien un matériau dont les usages sont aujourd'hui innombrable et croissants, même dans les pays industrialisés. Il ouvre la voie à de nouvelles perspectives d'avenir qui enrichiront le développement humain dans les diverses sphères suivantes de la vie:

- amélioration des conditions de vie des collectivités rurales;

- affirmation de l'identité culturelle;
- développement durable de l'environnement;
- production de produits industriels;
- produit de remplacement du bois au 21<sup>e</sup> siècle.

Le marché des produits écologiques est en plein essor, offrant de nouvelles occasions de promouvoir le bambou comme substitut à des matériaux industriels comme l'acier. Le bambou est un matériau très polyvalent qui se prête à la création d'une nouvelle génération de matériaux de construction et à un vaste éventail d'articles de toutes sortes, créant ainsi beaucoup d'emplois.

Le bambou représente un potentiel économique immense, d'une part, parce qu'il atteint sa pleine croissance en quelques mois et sa résistance mécanique maximale en quelques années et d'autre part, parce qu'on le retrouve en abondance dans toutes les régions tropicales et subtropicales du globe. Le bambou comme fibre de béton demeure une possibilité inexploitée qui pourrait favoriser le développement social et économique pour les habitants. Cette « plante miracle » peut avoir un impact important et positif sur plusieurs aspects du développement humain dans les décennies à venir.

De plus, l'utilisation des fibres de bambou, comme substitut à l'acier, serait certainement une solution profitable au bien-être de la population et tout à fait rentable au point de vue économique. La nouvelle industrie de préfabrication locale pourrait notamment aider à revitaliser la transformation artisanale du bambou et à augmenter le revenu d'hommes et de femmes sans emploi. L'épreuve de défibrage est une tâche pouvant être facilement exécutée par une main d'œuvre non spécialisée.

De plus, l'utilisation du bambou comme matériau de construction est une alternative intéressante pour tous, car elle limite l'utilisation de matériaux polluants, énergivores et non renouvelables.

## **VI. 2. 2. Cendre de balle de paddy**

L'ajout d'un matériau pouzzolanique, en remplacement partiel du ciment Portland, contribuerait à réduire considérablement les problèmes de ségrégation. Ces matériaux sont formés de particules plus petites que les grains de ciment qui, en présence de la chaux libérée par l'hydratation du ciment Portland réagissent avec l'eau pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H). Ces particules peuvent donc se loger entre les grains de ciment pour accroître la cohésion de la pâte de ciment et prévenir les problèmes de ségrégation et de

ressuage. De plus l'activité pouzzolanique contribue à accroître la résistance mécanique en formant des C-S-H.

Le riz est un produit en grandes quantités à Madagascar. Après la récolte, le grain doit être séparé de son enveloppe, la balle. Il en résulte un volume important de balles. Ces balles sont utilisées comme des matériaux combustibles remplaçant quelque fois le bois. Après calcination, on obtient une cendre grisâtre qui est un produit particulièrement riche en silice et on constate que c'est une excellente pouzzolane.

Donc l'intérêt de ce projet porte sur sa disponibilité, son abondance et son accessibilité, car elles sont encore considérées comme des déchets.

### VI. 3. ÉTUDE ESTIMATIF

Il est important d'avoir une idée sur le coût de revient de notre béton autoplaçant fibré avec des fibres de bambou. Compte tenu du fait que notre étude a abordé un élément nouveau à Madagascar, nous essayerons d'évaluer le coût du mètre cube du béton autoplaçant fibré et le compare au coût du mètre cube du béton ordinaire.

**Tableau 27: Prix d'un mètre cube de BAPF**

Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire [Ar]	Sous total [Ar]
Ciment CEM II/A 42.5 N	Sac	7	25 000	175 000
Cendre de balle de riz	M <sup>3</sup>	4.8	300	1 440
Gravillon 3/8	M <sup>3</sup>	0.25	30 000	7 500
Gravillon 8/20	M <sup>3</sup>	0.25	35 000	8 750
Sable 0/3	M <sup>3</sup>	0.5	15 000	7 500
Superplastifiant	L	5.14	7 500	38 550
Fibre	kg	1	1 000	1000
<b>TOTAL</b>				<b>239 740</b>

**Tableau 28: Prix d'un mètre cube de BO**

Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire [Ar]	Sous total [Ar]
Ciment CEM II/A 42.5N	Sac	7	25 000	175 000
Gravillon 3/20	M <sup>3</sup>	0.8	30 000	24 000
Sable 0/3	M <sup>3</sup>	0.4	15 000	6000
<b>TOTAL</b>				<b>205 000</b>

Le coût des matières premières pour confectionner 1 m<sup>3</sup> de BAPF est élevé par rapport au béton ordinaire. Mais n'oublions pas que :

- Le nombre d'ouvrier nécessaire pour sa mise en place peut être réduit et le temps d'écoulement est raccourci ;
- Les BAP n'ont pas besoin d'être vibré donc on économise sur l'énergie et les appareillages.

Ces remarques nous prouvent que le coût des BAPF est abordable.

## **CONCLUSION**

Pour conclure, la valorisation des bambous et les cendres de balle de riz permet d'améliorer les aspects environnementaux non seulement par la réduction des déchets en tas dans notre pays mais aussi en les transformant en des produits utiles pour l'amélioration de la vie de la société.

Au niveau économique, le recyclage des déchets ne dépense pas plus que la fabrication d'un tout nouveau produit. Dans le contexte Madagascar, la cendre de balle de riz est un matériau pouzzolanique de grande qualité qui est à la fois abondant et bon marché, parfois considérée comme déchet. La valorisation de ce produit se joue sur le prix du liant minéraux utilisé : le ciment. De plus, la mode opératoire n'entraîne aucun impact environnemental négatif ou dangereux.

L'emploi du béton autoplaçant fibré avec des fibres de bambou, répond simultanément au souci d'économie des ressources naturelles ainsi qu'à l'obligation de limiter la dégradation de l'environnement.

La suppression du vibrage et la réduction des opérations contraignantes de ratissage, intéressantes, notamment, pour les travailleurs, représentent les facteurs prépondérants de cette amélioration. Ce qui accentue considérablement l'intérêt que peuvent présenter économiquement ces composites.

# CONCLUSION GENERALE

---

Les objectifs principaux de notre travail étaient, d'une part d'évaluer l'influence d'un renfort par des fibres de bambou sur les comportements du béton autoplaçant, et d'autre part de valoriser les ressources locales.

La première partie du mémoire a été consacrée à l'étude bibliographique qui a porté à la fois sur les bétons autoplaçants, en général et sur les performances mécaniques du matériau béton fibré. Nous nous sommes intéressés en particulier à l'influence des fibres de différentes natures sur les bétons. Enfin, nous nous sommes penchés sur le cas des bétons autoplaçants renforcés par des fibres de bambou qui, par définition, apportent la solution à la problématique des nuisances environnementales des bétons vibrés. Ces bétons, relativement nouveaux, paraissant promoteurs de par leurs nombreux avantages, nous avons fait de les retenir pour notre étude.

Dans la deuxième partie, expérimentale, nous avons tout d'abord caractérisé physico-chimiquement et mécaniquement nos matériaux d'études. L'étude a ensuite été consacrée aux essais et caractérisation des bétons. Dans le dernier chapitre, on a évalué les impacts environnementaux et socio-économiques de ce matériau d'étude.

Bref, les bétons autoplaçants constituent une nouvelle avancée pour la construction en béton et ils offrent en cela des avantages aussi bien d'ordre économique, technique que sociaux.

L'absence de vibration limite l'utilisation des matériels énergivores, réduit les coûts globaux de production, et permet de construire des éléments à géométrie complexes ou fortement ferrailés et également de réduire les nuisances sonores et la pénibilité du travail des ouvriers.

La prise en compte du développement durable dans le domaine de la construction nous a conduits de valoriser les produits locaux qui sont disponibles et abondants dans notre pays, plus particulièrement les cendres de balles de paddy et les bambous.

A partir de ce travail, on peut d'ores et déjà retenir deux points :

- Du point de vue mécanique, et dans le but de réduire les impacts environnementaux négatifs des matériaux cimentaires, on peut envisager le remplacement d'une partie du ciment par la cendre de balle de riz ;
- Du point de vue de la réduction du retrait, on constate qu'il est tout à fait possible de diminuer les différents types de retrait et d'améliorer le comportement fragile des

béton en introduisant des fibres végétales qui ont des impacts environnementaux faibles .

Cette étude constitue un essai et une étape préliminaire en vue d'orienter les recherches vers des applications plus concrètes et plus diversifiées. Toutefois, il est souhaitable d'approfondir ces recherches sur l'utilisation pour parvenir à des résultats probants.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) MOHAMMED Rissel Khelifa, « effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants », thèse de l'Université d'Orléans et de l'Université de Constantine, Juin 2009.
- 2) Khelifa R., «L'impact des cimenteries sur l'environnement – Cas de la cimenterie de Ain-Touta», Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d'Orléans, le 18 Septembre 2002.
- 3) ASSIÉ Stéphan, « durabilité des bétons autoplaçants », thèse de l'Institut National Des Sciences Appliquées de Toulouse 2004.
- 4) BOUKNI B., Tenue au feu des bétons autoplaçants, Mémoire Magistère, Université Mentouri de Constantine, Novembre 2008.
- 5) MOKHTARI ABDESSAMED, « Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés de Fibres Végétales de Palmier Dattier », Mémoire Magistère, Université DE KASDI MERBAH OUARGLA, Novembre 2006.
- 6) CHABANE A., Contribution à l'étude du comportement différé des bétons sous sollicitations de flexion, mémoire de magistère, Université Mentouri de Constantine, Novembre 2000.
- 7) COQUILLAT G. et L. HASNI, Bétons Autoplaçants : Mise en Evidence de l'Influence des Conditions de Fabrication. Rapport de Recherche N°. 99-000, Recherche FNTP, Octobre 1999.
- 8) TABET Nesrine, Contribution à l'Etude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur le comportement physico-mécanique des bétons autoplaçants fibrés, Mémoire de Magister, Faculté des Sciences de l'Ingénieur de l'université M'HAMED BOUGARA- BOUMERDES, 2011.

- 9) El Barrak M., Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplacants à l'état frais, Thèse de l'université Paul Sabatier, 2005.
- 10) AKCHICHE Hamida, « Contribution à la modélisation du retrait et du fluage des bétons et mortiers renforcés par des fibres de palmier dattier en régions désertiques » Mémoire de Magistère, Université KASDI Merbah de Ouargla 16/05/2007
- 11) Rapport final FILLTECH, Technologie des bétons liée à l'utilisation de fillers calcaires valorisation de ceux-ci par une utilisation dans les bétons, 2007.
- 12) Lawrence P., Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires, Thèse de l'Université Paul Sabatier, 2000.
- 13) ALCANTARA MARCO « Bétons autoplacants et fibrages hybrides : composition, rhéologie et comportement mécanique » Thèse de doctorat présentée à l'LMDC INSA Toulouse (Septembre 2004), N°16.
- 14) RASOLOFOHARITIANA Rado Nantenaina, contribution à l'étude des bétons autoplacants, Mémoire d'Ingénieur Matériau à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 4 Juin 2009.
- 15) HOLCIM, « Le béton autocompactant », Recommandation éditée par HOLCIM du 26/11/2004.
- 16) RANARIVELO Marcel David, « Contribution à l'étude de la valorisation de la coque de noix de coco en matériaux de construction » , Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Science des Matériaux et Métallurgie l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo Université d'Antananarivo, 2007.
- 17) TURCRY Philippe, « Retrait et fissuration des bétons autoplacants influence de la formulation », Thèse de Doctorat Spécialité Génie Civil École Centrale de Nantes, Université de Nantes, 2004.

- 18) RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, Cours de Liants hydrauliques 3<sup>e</sup> Année Science et Ingénierie des Matériaux, École Supérieur Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, 2009-2010.
- 19) RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, Cours de Mortiers et Bétons 4<sup>e</sup> Année Science et Ingénierie des Matériaux, École Supérieur Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, 2010-2011.
- 20) N. BOUHAMOU, « Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais », Article dans « Afrique science » du 04/01/2008.
- 21) DO THI Vi Vi, « Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non », Thèse de Doctorat de l'Universités de GRENOBLE et de l'Université des Sciences de HOCHIMINH VILLE, 20 juillet 2011.
- 22) MOHAMED A S MOHAMED, « Influence de la valorisation des microfibrilles végétales sur la formulation et la résistance aux cycles gel et dégels de BAP », Thèse de Doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise, Décembre 2011.
- 23) PACO DIEDERICH, « Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton », Thèse de Doctorat de l'Université de TOULOUSE, 17/12/2010.
- 24) RANJIVAHARIMANANA Lalao Evelyne, « Etude Comparative des méthodes de formulation de Béton : Les Méthodes de Dreux-Gorisse Et Baron-Ollivier », Mémoire d' Ingénieur Matériaux, École Supérieur Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, 29 Juin 2011.
- 25) GROTH P , (2000a), Fiber reinforced concrete- Fracture mechanics methods applied on self compacting concrete and energetically modified binders, PhD-thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Lulea University of Technology.

26) Dhonde H.B, Mo Y.L, et Vogel. J (2007) « Fresh and Hardened Properties of Self-Consolidating Fiber-Reinforced Concrete” ACI Materials Journal, V. 104, No.5, pp. 491-500.

27) [www.Wikipédia](http://www.Wikipédia)

# ANNEXES

**ANNEXE A. : DETERMINATION DES VALEURS REQUISES ET DE  
LA COMPOSITION MINERALOGIQUE POTENTIELLE DU CIMENT**

Le ciment est composé de :

- Clinker : 86 % ;
- Cendre volante : 10 % ;
- Gypse : 4%.

Les compositions chimiques de ces matières premières sont les suivantes en % massique :

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	PF	RI
Gypse	12,00	3,20	0,00	30,00	8,10	42,80	4,10	0,00
Clinker	19,40	6,01	3,54	62,00	2,37	0,43	3,48	1,41
CV	55,80	23,70	3,20	7,50	4,10	0,70	4,20	0,00

Ce qui donne pour la composition chimique du ciment, pour un élément X :

$$X(\text{ciment}) = 0.84 X(\text{clinker}) + 0.10 X(\text{CV}) + 0.04 X(\text{gypse})$$

Ce qui donne la composition chimique du ciment en % massique:

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	PF	RI	CaO <sub>L</sub>
22,74	7,67	3,37	55,27	2,77	2,15	3,57	1,21	1,46

➤ **Modules et valeurs requises :**

• **Module d'alumine MA :**

- Pour un mélange quelconque :  $MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$
- Pour un ciment composé :  $MA = \frac{Al_2O_3^*}{Fe_2O_3^*}$

$$\text{Avec: } Al_2O_3^* = Al_2O_3 - 0,04 Al_2O_3(\text{gypse}) - 0,10 Al_2O_3(\text{CV})$$

$$Fe_2O_3^* = Fe_2O_3 - 0,04 Fe_2O_3(\text{gypse}) - 0,10 Fe_2O_3(\text{CV})$$

$$MA = 1.70$$

• **Module de silice MS :**

- Pour un mélange quelconque :  $MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$
- Pour un ciment composé :  $MS = \frac{SiO_2^*}{Al_2O_3^* + Fe_2O_3^*}$

$$\text{Avec : } SiO_2^* = SiO_2 - 0,04 SiO_2(\text{gypse}) - 0,10 SiO_2(\text{CV}) - RI$$

$$MS = 1.88$$

- **Module de chaux MC :**

- **Pour un mélange quelconque :**  $MS = \frac{100CaO}{2.8SiO_2 + 1.65Al_2O_3 + 0.35Fe_2O_3}$
- **Pour un ciment composé :**  $MS = \frac{100CaO^*}{2.8SiO_2^* + 1.65Al_2O_3^* + 0.35Fe_2O_3^*}$

Avec  $CaO^* = CaO - CaO_l - 0,04 CaO(\text{gypse}) - 0,1CaO(\text{CV})$

**MC = 98**

➤ **Composition minéralogique potentielle du ciment :**

MC = 98 et MA = 1,7 : On a un mélange normal pour lequel la formule de Bogue est :

$$C_4AF = 3,04Fe_2O_3^* = 9,27 \%$$

$$C_3A = 2,65Al_2O_3^* - 1,69Fe_2O_3^* = 8,55 \%$$

$$C_3S = 4,07CaO^* - 7,61SiO_2^* - 6,72Al_2O_3^* - 1,43Fe_2O_3^* = 54,23 \%$$

$$C_2S = 2,87SiO_2^* - 0,75C_3S = 3,73 \%$$

Composition minéralogique potentielle en % massique :

<b>C<sub>3</sub>S</b>	<b>C<sub>2</sub>S</b>	<b>C<sub>3</sub>A</b>	<b>C<sub>4</sub>AF</b>	<b>CaO<sub>L</sub></b>	<b>CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O</b>	<b>CV</b>
54,23	3,73	8,55	9,27	1,46	3,60	10,00

**ANNEXE B. : DOMAINES D'APPLICATION DES CIMENTS  
CEM II/ A 42.5 N**

Les ciments **CEM II/A ou B 42,5 N ou R CE CP2 NF** sont destinés aux travaux de bâtiment et de Génie Civil nécessitant de fortes résistances à court terme. Ils sont particulièrement adaptés aux utilisations suivantes :

➤ **POUR LES CLASSES DE RESISTANCES R :**

- Béton armé préfabriqué en usine avec ou sans traitement thermique.
- Béton précontraint fabriqué en usine avec ou sans traitement thermique.
- Béton coulé en place sur chantier exigeant des décoffrages rapides.

➤ **POUR LES CLASSES DE RESISTANCES N :**

- Béton armé ou non armé ;
- Bâtiment : dallage, maçonnerie ;
- Génie Civil : radiers, voiles, silos ;
- Béton extrudé, glissières de sécurité ;

Béton prêt à l'emploi : environnements – X0, XC, XS1, XD, XF1, XF2, XF3 – de la norme NF EN 206-1.



**ANNEXE C. : RECOMMANDATIONS POUR LES EXIGENCES  
RELATIVES AU BETON AUTOPLACANT A L'ETAT FRAIS**

**Spécifications des classes d'étalement:**

CLASSE	ETALEMENT en mm
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

➤ la **classe SF1** est souvent appropriée :

- aux structures en béton non ou faiblement armées, bétonnées par le haut, avec un libre déplacement du point de remplissage (dalles de maison)
- au bétonnage à la pompe par injection (revêtement de tunnels)
- aux sections suffisamment petites pour éviter de grande longueur de cheminement horizontal (pieux et certaines fondations profondes)

➤ la **classe SF2** est appropriée à de nombreuses applications courantes (par exemple voiles, poteaux, etc.)

➤ la **classe SF3** est normalement produite avec un diamètre maximum des granulats peu élevé (inférieur à 16 mm) et est utilisée pour des applications verticales dans des structures qui comportent un ferrailage dense, ou qui sont de formes complexes.

9

## Spécifications liées à l'écoulement:

CLASSE	TAUX DE REMPLISSAGE
PL1	$\geq 0,80$ avec 2 armatures
PL2	$\geq 0,80$ avec 3 armatures

L'**aptitude à l'écoulement** est associée à la capacité du BAP à s'écouler de manière homogène dans des zones à forts ferrillages.

L'« **intervalle d'écoulement** » est la plus petite maille d'armatures à travers laquelle le BAP doit s'écouler de manière continue pour remplir le coffrage.

- **PL1** pour les structures avec un intervalle d'écoulement compris entre 80 mm et 100 mm (structures verticales d'habitation types)
  - **PL2** pour les structures avec un intervalle d'écoulement compris entre 60 mm et 80 mm (ouvrages de génie civil types)
-

## Spécifications sur l'essai de ségrégation au tamis:

	POURCENTAGE DE LAITANCE
SR1	$\leq 20$
SR2	$\leq 15$

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

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

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

Elle convient également pour les applications verticales avec un intervalle

# TABLES DE MATIERES

REMERCIEMENTS.....	I
LISTE DES ABREVIATIONS.....	II
LISTE DES TABLEAUX.....	IV
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES PHOTOS.....	VI

---

---

## **INTRODUCTION GENERALE .....1**

---

---

### **Chapitre I : BETON AUTOPLACANT .....4**

---

---

<i>I. 1. GENERALITES</i> .....	4
I. 1. 1. Historique.....	4
I. 1. 2. Définition.....	5
I. 1. 3. Composition .....	5
I. 1. 4. Domaine d'utilisation des BAP .....	9
<i>I. 2. FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS :</i> .....	9
<i>I. 3. ESSAIS DE CARACTERISATIONS DES BAP A L'ETAT FRAIS :</i> .....	12
I. 3. 1. Essai d'étalement : .....	12
I. 3. 2. Essai de la boîte en L : .....	14
I. 3. 3. Essai stabilité au tamis : .....	15
<i>I. 4. ESSAIS DE CARACTERISATIONS DES BAP A L'ETAT DURCI :</i> .....	15
I. 4. 1. Résistance à la compression : .....	16
I. 4. 2. Résistance à la traction : .....	16
I. 4. 3. Module d'élasticité : .....	17
I. 4. 4. Retrait : .....	17
I. 4. 5. Fluage : .....	18

---

---

### **Chapitre II : LES BETONS DE FIBRES .....19**

---

---

<i>II. 1. GENERALITES SUR LES FIBRES</i> .....	19
II. 1. 1. Définition d'un matériau composite : .....	19
II. 1. 2. Historique et perspective de l'utilisation des fibres : .....	19

II. 1. 3.	Type des fibres utilisées dans le domaine de construction : .....	20
<hr/>		
II. 1. 4.	Les fibres végétales.....	21
<hr/>		
II. 1. 5.	Propriétés des fibres végétales.....	23
<hr/>		
II. 1. 6.	Domaines d'application des fibres :.....	24
<hr/>		
II. 2.	<i>LE BETON RENFORCE DE FIBRES</i> .....	24
<hr/>		
II. 2. 1.	Définition de béton de fibres.....	25
<hr/>		
II. 2. 2.	Comportement des bétons de fibres :.....	25
<hr/>		
II. 2. 3.	Durabilité des bétons de fibres.....	26
<hr/>		
II. 2. 4.	Traitement de la Fibre.....	27
<hr/>		
<b>Chapitre III : <i>BETON AUTOPLAÇANT FIBRE</i></b> .....		<b>28</b>
<hr/>		
III. 1.	<i>Les propriétés des bétons autoplaçants fibres à l'état frais</i> :.....	28
<hr/>		
III. 1. 1.	Essai d'étalement :.....	29
<hr/>		
III. 1. 2.	Essai de V-funnel :.....	29
<hr/>		
III. 1. 3.	Essai J-RING :.....	29
<hr/>		
III. 2.	<i>Résistance à l'écoulement (relation entre la teneur en fibre et la viscosité plastique)</i> :.....	30
<hr/>		
III. 3.	<i>Orientation et distribution des fibres</i> .....	30
<hr/>		
III. 4.	<i>Comportement Mécaniques Des bétons autoplaçants fibres à l'état durci</i> .....	31
<hr/>		
III. 4. 1.	Comportement à la compression et à la traction .....	31
<hr/>		
III. 4. 2.	Comportement à la flexion.....	31
<hr/>		
III. 5.	<i>Utilisation Des Bétons Autoplaçants Fibres Dans Les Structures</i> .....	32
<hr/>		
<b>Chapitre IV : <i>CARACTERISATION DES MATERIAUX D'EXPERIMENTATION</i></b> .....		<b>35</b>
<hr/>		
IV. 1.	<i>LE CIMENT</i> .....	35
<hr/>		
IV. 1. 1.	Caractéristiques chimiques .....	35
<hr/>		
IV. 1. 2.	Composition minéralogique du ciment.....	36
<hr/>		
IV. 1. 3.	Caractéristiques physique et mécanique .....	36
<hr/>		
IV. 2.	<i>LES CENDRES DE BALLE DE PADDY</i> .....	37
<hr/>		
IV. 2. 1.	Processus de combustion :.....	37
<hr/>		
IV. 2. 2.	Caractéristiques chimiques .....	37
<hr/>		
IV. 2. 3.	Propriété pouzzolanique de la cendre de balle de paddy :.....	38
<hr/>		
IV. 3.	<i>LES GRANULATS</i> .....	38
<hr/>		
IV. 3. 1.	Prélèvements d'échantillon.....	38
<hr/>		
IV. 3. 2.	Préparation d'un échantillon pour essai :.....	39

IV. 4.	<i>SUPERPLASTIFIANT</i> :.....	55
IV. 4. 1	Spécification :.....	55
IV. 4. 2	Caractéristiques :.....	56
IV. 4. 3	Mode d'emploi : .....	56
IV. 5.	<i>LES FIBRES</i> .....	57
IV. 5. 1	Préparation des fibres.....	57
IV. 5. 2	Présentation de la fibre de bambou .....	58
IV. 5. 3	Propriétés physiques des fibres de bambou .....	59
IV. 5. 4	Elimination des impuretés : Trempage .....	59
IV. 6.	<i>L'EAU</i> .....	60
IV. 6. 1	Caractéristiques Physiques et tolérances :.....	60
IV. 6. 2	Caractéristiques Chimiques et tolérances :.....	61

### **Chapitre V :COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES BETONS AUTOPLACANTS....62**

V. 1.	<i>FORMULATION DES BAP ETUDIES</i> .....	62
V. 1. 1.	Détermination du dosage en gravier :.....	62
V. 1. 2.	Détermination du dosage en sable : .....	63
V. 1. 3.	Pâte liante : .....	63
V. 2.	<i>LES ESSAIS ET CARACTERISATIONS DES BETONS</i> .....	65
V. 2. 1.	Confection des gâchées :.....	65
V. 2. 2.	Analyse à l'état frais .....	65
V. 2. 3.	CARACTERISATION DES BETONS A L'ETAT DURCI :.....	68
V. 3.	<i>INFLUENCE DES FIBRES DE BAMBOU SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES BAP</i> .....	69
V. 3. 1.	Les essais à l'état frais pour les bétons Autoplaçants fibrés :.....	69
V. 3. 2.	Les essais à l'état durcis des bétons Autoplaçants fibrés.....	70

### **Chapitre VI :ETUDES DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX-ECONOMIQUES ..73**

VI. 1.	<i>Avantages de l'utilisation des BAP</i> :.....	73
VI. 1. 1.	Ouvrabilité.....	73
VI. 1. 2.	Qualité d'aspect.....	73
VI. 1. 3.	Le Bruit.....	74
VI. 1. 4.	Les vibrations.....	75
VI. 1. 5.	La Pénibilité .....	76
VI. 2.	<i>Valorisation des ressources locales</i> .....	77
VI. 2. 1.	Bambou.....	77

VI. 2. 2. Cendre de balle de paddy .....	78
VI. 3. <i>ÉTUDE ESTIMATIF</i> .....	79
CONCLUSION GENERALE.....	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXE A.....	i
ANNEXE B.....	iii
ANNEXE C.....	iv

Auteur : **MAHITAVELO Zafindro Andréas Delphin**

Titre : « **CONTRIBUTION A L'ETUDE DU BETON AUTOPLACANT INCORPORE DE FIBRES DE BAMBOU** »

Rapporteur: **Professeur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely**

Nombre de pages : **83**

Nombre de tableaux : **27**

Nombre de figures : **09**

Nombre de photo : **03**

Annexes : **03**

## **RESUME**

Les bétons autoplaçant fibrés est une technique de plus en plus utilisée, dans le but d'améliorer les résistances à la flexion et à la fissuration.

Vue, les performances élevées des bambous, la valorisation de ces ressources abondante dans notre île constitue une motivation non négligeable à mener cette étude.

Une large campagne expérimentale a été menée. Nous avons montré que le renforcement des bétons par des fibres de bambou améliore la résistance à la flexion du béton. Ainsi que, la finesse des cendres de balle de paddy affecte de manière significative la résistance à la compression du béton.

L'ensemble de ces travaux constitue un ensemble cohérent d'outils d'aide à la formulation des bétons autoplaçants, destiné à l'Ingénieur de formulation.

**Mots clés** : Béton autoplaçant, fibres de bambou, résistance à la compression, résistance à la flexion, cendre de balle de paddy, superplastifiant.

## **ABSTRACT**

The self-compacting concrete by fibers is a technique increasingly used, with the aim of improving their mechanical characteristics their flexural ability and cracking résistance.

Seen, the high performances of bamboos, the valorization of these resources in our island can constitute a non negligible incentive to do this survey.

A large experimental campaign has been implant. We have shown that we could strengthen concrete by using bamboo-fibers. It also could improve the concrete flexibility resistance. In addition, the thinness of the paddy bullet ashes significantly affects the concrete resistance.

This work then can constitute a coherent range of tools to help to the formulation of the self-compacting concrete, for the engineer of formulation.

**Key words**: Self-compacting concrete, fibers of bamboo, resistance to the compression, resistance to bending, ash of paddy bullet, superplastifiant.