

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES



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

## Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme Master

Spécialité : Génie de matériaux

Option : Contrôle-Qualité des Matériaux

## THEME

---

*Réparation d'un béton endommager avec un BAP a base des fibres de  
récupération*

---

**Réalisé Par :**

**Meziani Salah Eddine**

**Lemmou El Mehdi**

**Sujet suivi par**

**Pr . Ben mounah .A**

**Encadrer par :**

**Mr.Bellal .A**

**(C.E.T.I.M boumerdes)**

N° d'ordre ...../FSI/2016

\*\*\*\*\*

Vu sa polyvalence et son bas prix, le béton est certainement l'un des matériaux les plus utilisés dans l'industrie de la construction d'aujourd'hui. C'est un matériau inerte et incombustible qui résiste au froid et à la chaleur. C'est aussi un élément architectural particulièrement intéressant car on peut lui donner n'importe quelle forme, une multitude de finis (texture) et même le colorer.

La durabilité et la résistance du béton dépendent de la qualité des matières premières utilisées, de la rigueur dans sa fabrication et du nombre et de l'intensité des contraintes physiques et chimiques auxquelles il sera soumis.

Obtenir un béton plus résistant en flexion et en traction fait l'objet de nombreuses recherches. Dans les constructions en béton, on cherche généralement à produire des surfaces uniformes et sans défauts apparents. Toutefois, dans la réalité, ce n'est malheureusement pas toujours le cas : les surfaces de béton montrent souvent des irrégularités ou des détériorations, Et là on est obligé de faire une réparation.

Le technologue appelé à travailler dans l'industrie du béton doit donc connaître à fond toutes les propriétés et les usages de ce matériau ainsi que les normes et les spécifications qui régissent sa fabrication et sa mise en place. Plus on exploite à fond les qualités du béton, plus le contrôle de la qualité devient important.

Le développement de la technologie des bétons se poursuit ainsi, grâce aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants, on est maintenant capable de produire certains bétons spéciaux qui auraient semblé irréalisables. On peut penser par exemple à la construction du WATER TOWER place de Chicago, un gratte-ciel de 74 étages, rendue possible par l'utilisation combinée de béton de très grande résistance et de béton léger de structure.

\*\*\*\*\*

**1-1 Introduction :**

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

Ces dernières années, une nouvelle génération de béton a vu le jour : les bétons auto plaçant (BAP). Ce béton na apparu que récemment, mais il est en plein augmentation, comme le montre la multiplication du nombre d'équipes de recherche dans ce domaine. Cet intérêt tardif peut s'expliquer du fait que les chercheurs et les industriels japonais n'ont commencé

**1-2 : Définition des bétons autoplaçants :**

Les bétons autoplaçants dite BAP, sont des bétons très fluides en écoulement, homogènes et stables, et se mettent en œuvre sans vibration ce qui constitue un grand avantage pour la réalisation des constructions. [1]

Ce béton est défini comme : béton auto nivelant, béton hyper fluide. Toutefois, l'appellation la plus connue aujourd'hui en Générales : béton autoplaçant.

Dans certains cas, on parle de béton auto nivelant (BAN) pour les dalles et les parois horizontales et de béton autoplaçant (BAP) pour les murs et les parois verticales.

La spécificité principale de ces bétons réside du fait qu'ils sont mis en place sans vibration sous le seul effet de la pesanteur. Ils sont très déformables et épousent parfaitement les formes de coffrages les plus complexes et très encombrés sans nécessiter pour autant des moyens de vibration afin de consolider le mélange, grâce à leur bonne uniformité une fois mis en place, ils donnent des structures très résistantes et durables.

Les principes de formulation de bétons autoplaçants se distinguent des bétons ordinaires par le fait qu'ils présentent un volume de pâte (ciment + fines + eau + adjuvants) plus élevé, Ils sont caractérisés par une quantité de fines élevée et l'emploi d'adjuvants nommés : super plastifiants hauts réducteurs d'eau.

Une nouvelle vague d'adjuvants appelés : rétenteurs d'eau ou agents de viscosité entrant quelque fois dans leur formulation. Ces derniers assurent la viscosité de la pâte pour lui conférer des propriétés limitant la ségrégation

La dernière caractéristique des BAP est la faible teneur de granulats de l'ordre 20 à

25millimètres. Pour ce béton, on se fixe de travailler le plus possible avec des granulats de16mm de taille maximale, voire dans la mesure du possible moins.

Seulement, la fluidité n'est pas la seule propriété recherchée, car il faut bien s'assurer de l'homogénéité de l'ensemble pâte-granulats. De façon corollaire, le mélange du BAP doit être très cohésif et très stable lors de la mise en place et cela jusqu'à son durcissement. Ceci implique que le BAP doit présenter le minimum de tassement et de sédimentation des particules solides et éviter de présenter un ressuage trop fort, car cela génère une hétérogénéité des propriétés mécanique.

Une bonne stabilité liée, entre autres, à la viscosité du mortier et de son seuil de cisaillement nécessite soit l'ajout d'un agent de viscosité afin d'améliorer la cohésion de l'ensemble, soit d'augmenter la teneur en matière cimentaire et de réduire la teneur en eau libre. Aussi une bonne stabilité peut être liée à une optimisation de la compacité granulaire. Or, l'augmentation de la teneur en liant n'est pas sans conséquence sur la durabilité, vu le dégagement de chaleur d'une part, et d'autre part, le risque de nuire à la capacité de remplissage, propriété très recherchée pour ce genre de béton.

Cette complexité amène à combiner différents paramètres pour obtenir le niveau désiré en termes de résistance à la compression.

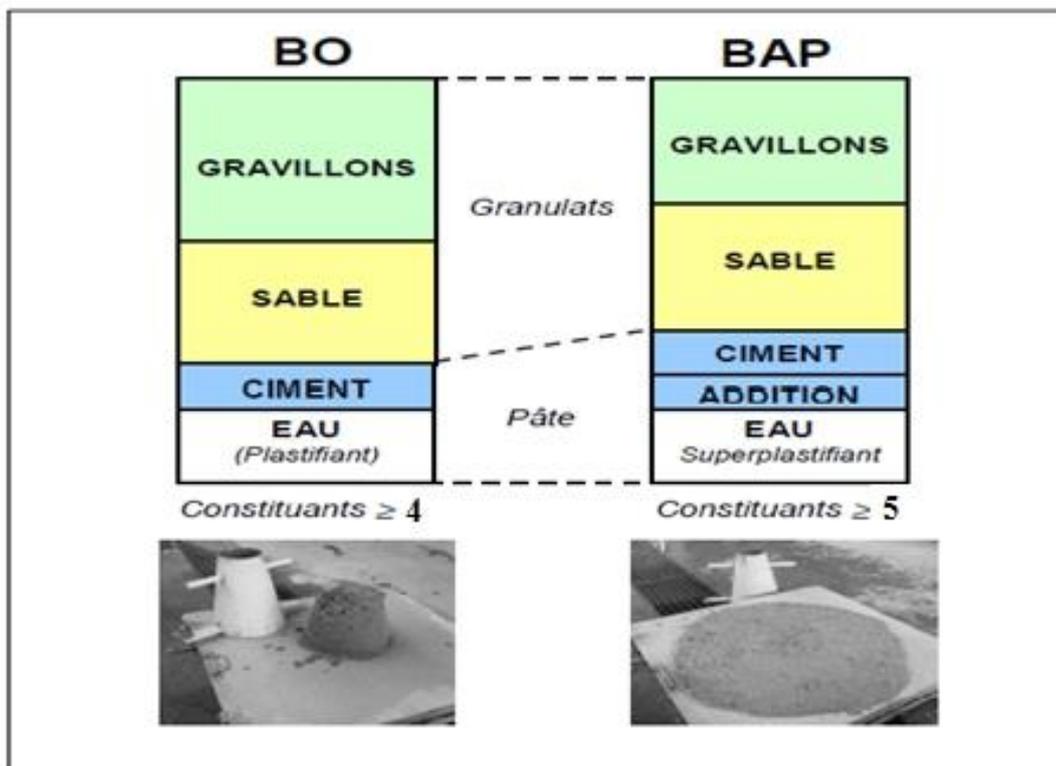


**Figure I-1** : béton autoplaçant

**1-3 : Constituants d'un BAP :**

La qualité du béton dépend de la qualité de la pâte et des granulats, ainsi que de celle du lien qui les unit. Dans du béton bien constitué, chaque particule de granulat est complètement enrobée de pâte et tous les espaces entre les particules sont complètement remplis de pâte.

Les constituants d'un BAP sont le ciment, les fines (ajouts minéraux), les granulats (sable, gravier), eau et les adjuvants (superplastifiants, rétenteurs d'eau). Les BAP se différencient des bétons ordinaires (BO) ou vibrés, par leurs caractéristiques à l'état frais, par leur composition (présence indispensable des fines minérales et de superplastifiants) ; voir le schéma suivants :



**Figure I-2 :** aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.

### 1-3.A :Le ciment :

#### -Définition :

Le ciment portland est un liants hydraulique composée principalement de silicates de calcium hydrauliques qui font prise et durcissent en vertu d'une réaction chimique avec l'eau appelée hydratation.

Le ciment résulte du broyage d'un certain nombre de constituants. Le plus importants étant le clinker formé de silicates et d'aluminates de chaux.

De par son origine (calcaire et argile), le ciment portland est constitué de minéraux.

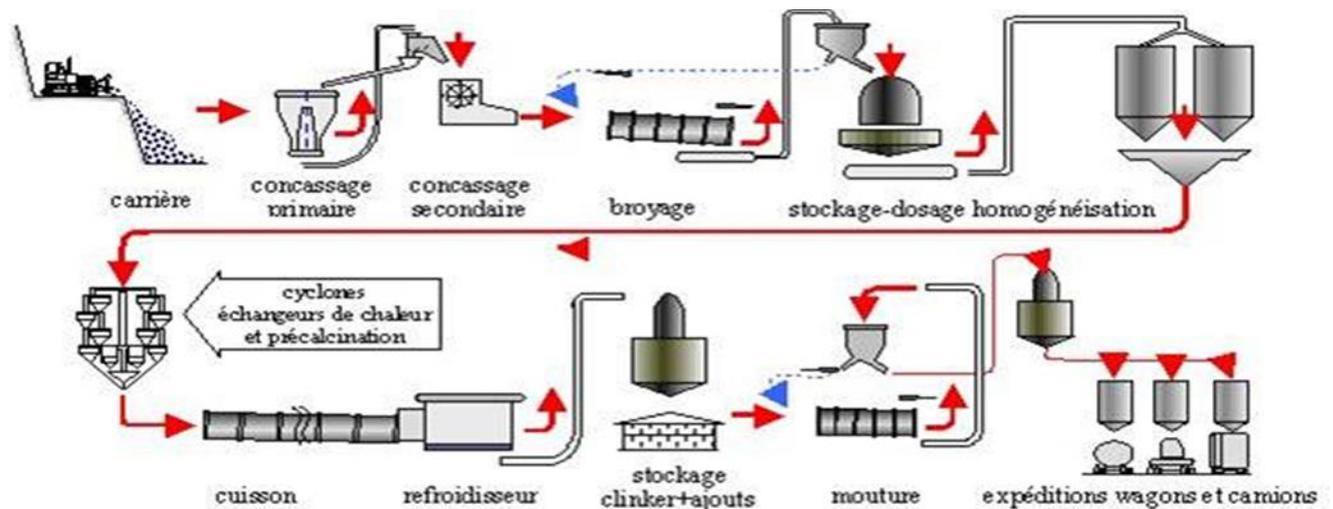


Figure I-3 : Schéma fabrication ciment (simplifier)

Sa cuisson et sa trempe conduisent à avoir quatre constituants de base, très solubles, leurs proportions volumiques moyennes sont les suivantes :

**Le C3S :** Silicate tricalcique ( $\text{SiO}_2 - 3 \text{CAO}$ ), en abrégé C3S : 50 à 65%, permet l'obtention de résistance élevée à court et moyen terme.

**Le C2S :** Silicate bicalcique ( $\text{SiO}_2 - 2 \text{CAO}$ ), en abrégé C2S : 15 à 20%, participe à l'acquisition de la résistance à long terme. En quantité importante il réduit la chaleur d'hydratation du ciment.

**Le C3A :** Aluminate tricalcique ( $\text{Al}_2\text{O}_3 - 3 \text{CAO}$ ), en abrégé C3A : 5 à 15%, accélère la prise. En quantité notable, il génère de forte chaleur d'hydratation initiale. Il permet d'obtenir des ciments à résistance initiale élevée.

**Le C4AF :** Ferro-aluminate tétracalcique ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3 - 4 \text{CAO}$ ), en abrégé C4AF : 5 à 10%, réagit avec une vitesse plus faible que le C3A, ne peut être considéré comme un produit inerte. Ce sont les oxydes de fer inclus qui confèrent au ciment sa couleur grise caractéristique.

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 [2].

### **1-3.B :Les Granulats :**

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0,1 mm et 40 mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle.

Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés, obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières.

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

#### **\*Influence des granulats sur les propriétés des BAP :**

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer les quantités optimales en gros granulats capables de donner un maximum de déformabilité et d'ouvrabilité au béton.

Selon Yurugi et coll. (1989) le volume des gros granulats dans le béton est le facteur le plus important pour le contrôle de la maniabilité et de la capacité de remplissage : plus la teneur en gros granulats augmente et plus la capacité de remplissage diminue [3].[4]

Okamura et coll. (1993) mentionnent que le premier point dont il faut tenir compte lors de la formulation d'un BAP est de limiter la teneur en gros granulats car les bétons frais à faibles dosages en granulats se caractérisent généralement par une haute résistance aux ségrégations [3].

Khayat et coll. (1994) ont déterminé les quantités optimales en gros granulats et en sable capables d'améliorer la fluidité des mélanges de béton en présence d'un agent colloïdal et de superplastifiant. La quantité des granulats (granulats concassés lavés) a été de 300 l/m<sup>3</sup> avec une teneur de 70% de granulats de diamètre maximum 14 mm et 30% de diamètre maximum 20 mm. Quant à la quantité de sable, elle correspondait à un rapport Sable/Pâte (volumique) de 0,6 [4].

### **1-3.C :L'eau de gâchage :**

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

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [5] :

- 2 g/l pour les bétons à haute résistance.
- 5 g/l pour les bétons à faibles résistances.

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de :

- 15 g/l pour les bétons à haute résistance.
- g/l pour les bétons à faibles résistances.

### **1-3.D : les ajouts :**

Les ajouts cimentaires sont des contributeurs 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 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.
- Favoriser la pénétrabilité dans les fissures fines : certains de ces ajouts sont plus fins que le ciment (fumée de silice).

**\*la fumée de silice :**

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

**1-3.E : Les adjuvants :**

Ainsi que le définit la norme NF EN 934-2, un adjuvant est un Produit chimique incorporé à faible dose (moins de 5% de la masse du ciment) dans le béton ou le Mortier, afin de modifier certaines de ses propriétés.

Les adjuvants utilisés en faible proportion améliorent les propriétés du béton (béton frais ou béton durci). Ils permettent de formuler des bétons "sur mesure" aux performances adaptées à chaque ouvrage. Certains, par exemple, rendent le béton liquide lors de sa mise en œuvre, sans pour autant réduire ses résistances mécaniques finales.

Les adjuvants les plus utilisés dans les BAP sont les superplastifiants et les agents de viscosité.

**1-3.E-1 : Superplastifiants hautement réducteurs d'eau :**

Cette désignation complexe, traduction de l'anglais *Superplastifiers - High RangeWaterReducer*, se rapporte à des produits qu'en France on appelait auparavant « fluidifiants. Les superplastifiant sont des polymères de synthés fabriquer spécialement pour l'industrie du béton, ils améliorent la fluidité en réduisent le rapport  $\frac{E}{C}$

### 1-3.E-1- a-Superplastifiants à base de carboxylates :

Les superplastifiants à base de polycarboxylates ont été mis au point après les Polysulfonates et sont pour cette raison communément appelés superplastifiants de nouvelle génération. La molécule d'un superplastifiant de type polycarboxylate est composée **d'une chaîne Principale**, qui porte les fonctions carboxylates  $-\text{COO}-$  et sur laquelle sont greffées de nombreuses **chaînes secondaires**

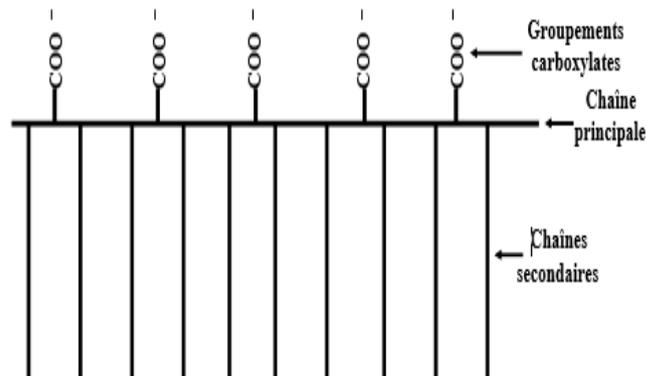


Figure I-3 : Polymère de type « peigne »

### 1-3.E-1- b :Mode d'action (eau + ciment) :

En raison de leurs compositions chimiques différentes, les particules de ciment peuvent présenter des charges différentes. Les charges opposées vont s'attirer les unes les autres. Les particules de ciment vont flocculer et augmenter la viscosité du coulis.

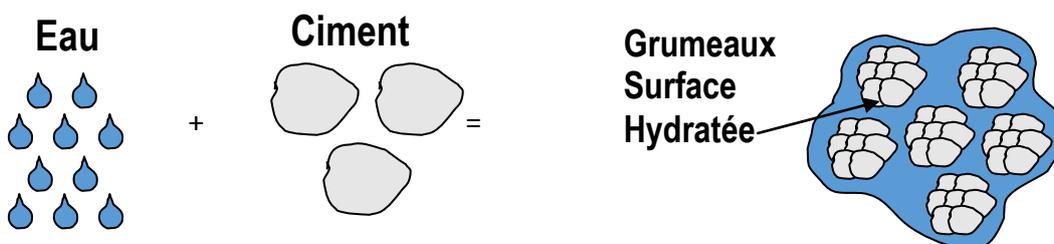
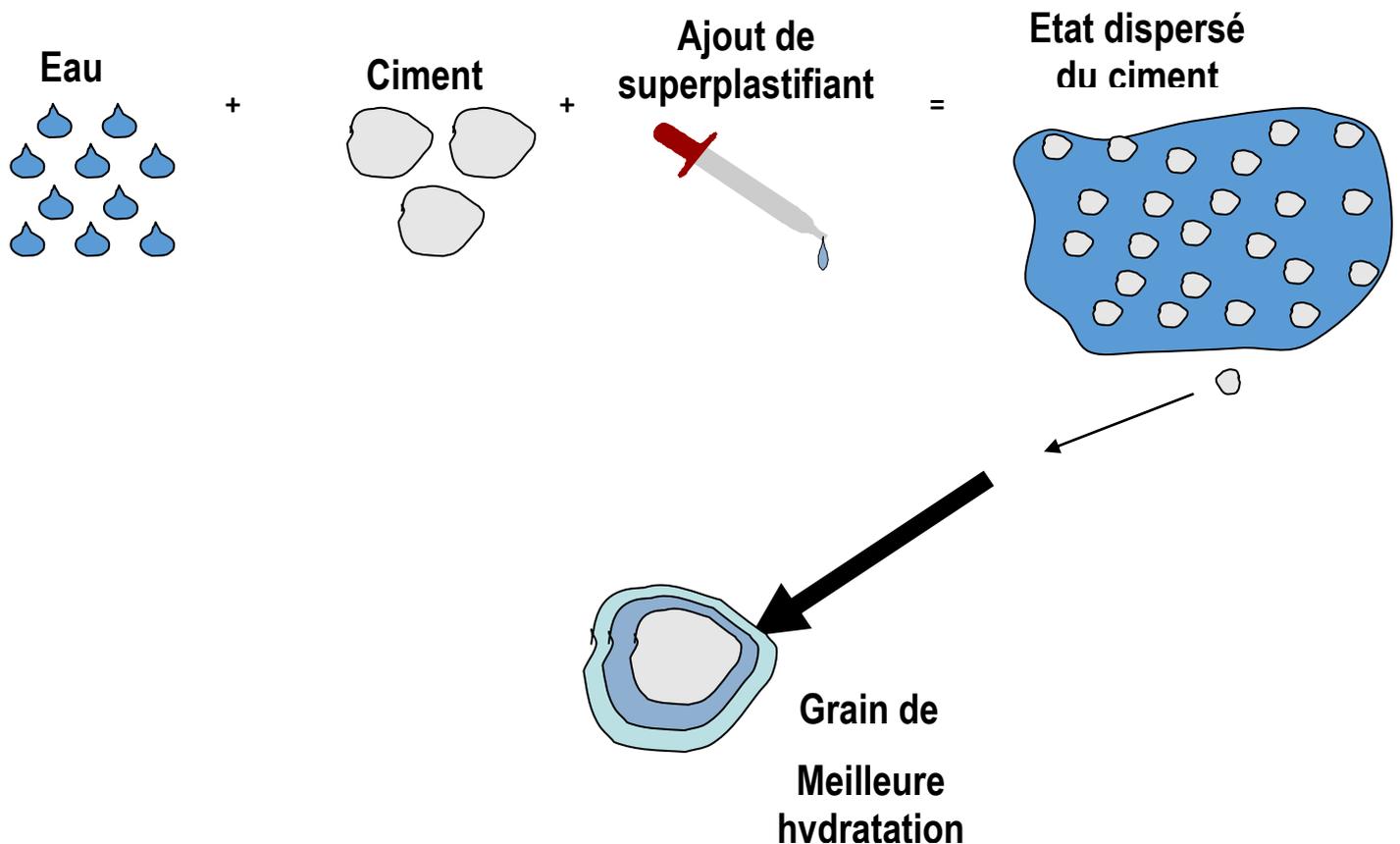


Figure I-4 :Les particules de ciment vont flocculer et augmenter la viscosité du coulis

### 1-3.E-1- c : Mode d'action des superplastifiants haut réducteurs d'eau :

Par adsorption à l'interface solide-liquide, les superplastifiants neutralisent les différentes charges des particules et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules.



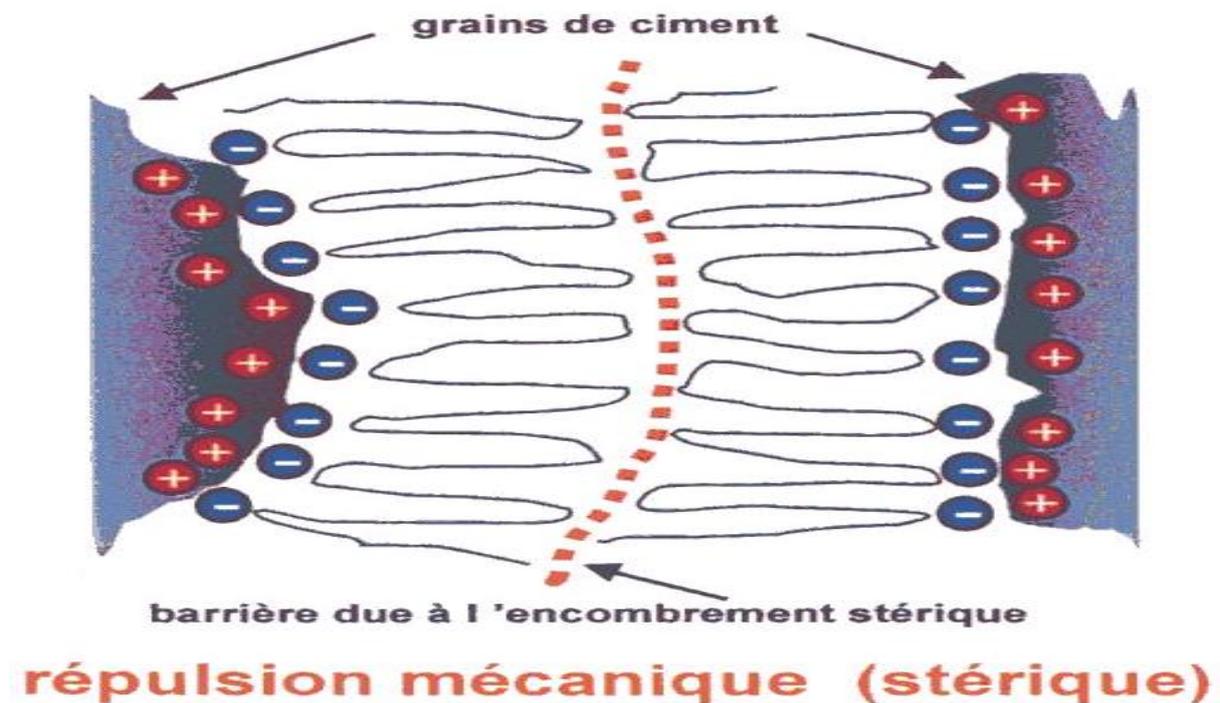
**Figure I-5 :** Mode d'action des superplastifiants haut réducteurs d'eau

#### **1-3.E-1- d Mode action des polycarboxylate (l'encombrement ou répulsion stérique) :**

L'encombrement stérique est le type de répulsion créée par les superplastifiants de type polycarboxylate. Les polymères anioniques s'adsorbent à la surface des particules et les chaînes secondaires s'étendent aux alentours.

Lors du rapprochement de deux grains de ciment, les couches d'adsorption des superplastifiants se chevauchent. La densité de chaînes augmente et les molécules d'eau vont s'accumuler dans la solution. Cela a pour conséquence l'apparition d'une pression osmotique, laquelle maintient les particules séparées l'une de l'autre.

L'encombrement stérique apparaît dès que la distance entre les polymères adsorbés est inférieure à deux fois l'épaisseur des polymères. L'encombrement stérique est donc une force purement répulsive, qui n'agit que si les molécules sont très proches.



**Figure I-6 :** L'encombrement stérique est donc une force purement répulsive

#### **1-4 : techniques de formulation des BAP :**

Formuler un béton, c'est de trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants, le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, c'est à dire l'affaissement au cône d'abrams. Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées, comme par exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix de revient. Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux-gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment méthode originale pour proportionner les granulats qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sable /gravillons sur une courbe de référence.

La mise en point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais ; il faut réaliser, en plus de l'essai au cône, l'essai à la boîte en L et l'essai de stabilité au

tamis. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation. [6]

\*pratique actuelle de la formulation des BAP :

La plus part des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de dreux-gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit a sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés a l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de BPE, et notamment de VM matériaux, est l'industrie du bâtiment, qui utilise principalement des bétons de 25 a 35 MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances ordinaires sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer).

En outre. L'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en super plastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement a Caus de leur cout. Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formateur.

- 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 et 400 l/m<sup>3</sup>.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 a 350 kg/m<sup>3</sup>. en complément. La masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m<sup>3</sup>.
- Le dosage en super plastifiant est proche de son dosage a saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formateurs ont certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode dreux-gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. ces approches sont intéressantes dans le sens ou elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques a proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence

universelle (nous le voyons au chapitre suivant : la granulométrie aussi essentiel). Ce sont plus des supports qui facilitent la formulation.

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plus part du temps directement en centrale à béton. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale. Par ailleurs, le diagnostic d'une mauvaise formule est rendu difficile, en centrale à béton, par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication ; par exemple, la teneur en eau exacte du sable fait parfois défaut. On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP. Il est à noter en fin que les précurseurs et les acteurs de la formulation –sur terrain- sont les fournisseurs des adjuvants, ce qui est tout à fait cohérent avec le rôle fondamental du superplastifiant dans le concept du BAP.[6]

**\* :Formulation des BAP :**

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont des composants essentiels d'un BAP. La formulation est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années.

Dans l'industrie du bâtiment, on utilise principalement des bétons de 25 à 35 MPa, et par expérience on sait que ces résistances dites « ordinaires » sont facilement atteintes par les bétons autoplaçants

Avec l'expérience acquise ces dernières années, certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés :

-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 et 400 l/m<sup>3</sup>.

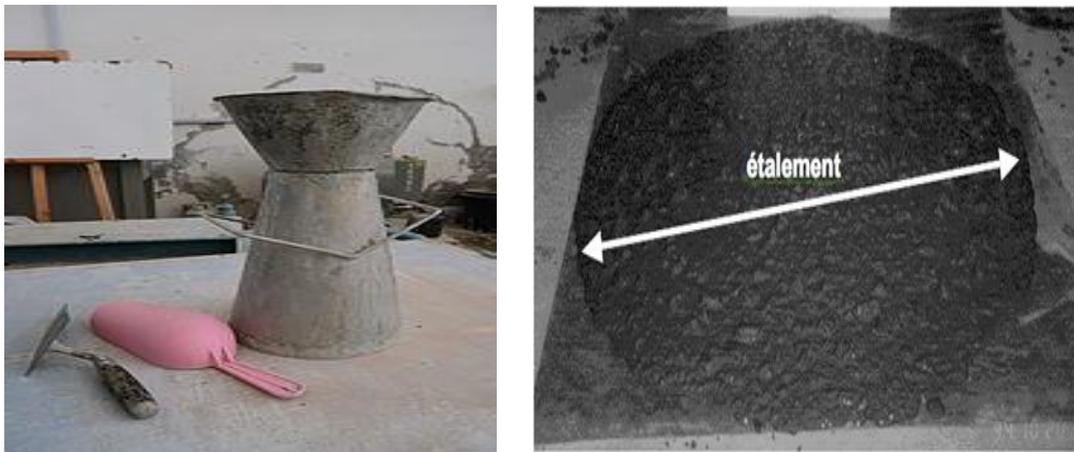
-La masse du ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme BPE (P18 305), soit en général de 300 à 350 kg/m<sup>3</sup>. En complément la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m<sup>3</sup>.

-Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait donc par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formateurs ont certes développés leur propre, outil. Après la conception sur le papier, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.

**1-5 : caractérisation du BAP a l'état frais :****1-5-1 : Essai d'étalement ( cône d'Abrams -NF EN 12350-8) :**

Pour la détermination de l'étalement 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, La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 550 et 850 mm 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.



**Figure I-7 :**Essai d'étalement

**1-5-2 : Essai de la boîte en L (NF EN 12350-10):**

La boîte en « L » permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage. 13 litres de béton sont mis dans la partie verticale puis on laisse le béton se reposer pendant 1 minute. La trappe est ensuite levée et le béton s'écoule dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. A la fin de l'écoulement, on mesure les hauteurs H1, H2 et le résultat est exprimé en termes de taux de remplissage  $H2/H1$ . Ce rapport permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à 0,8.

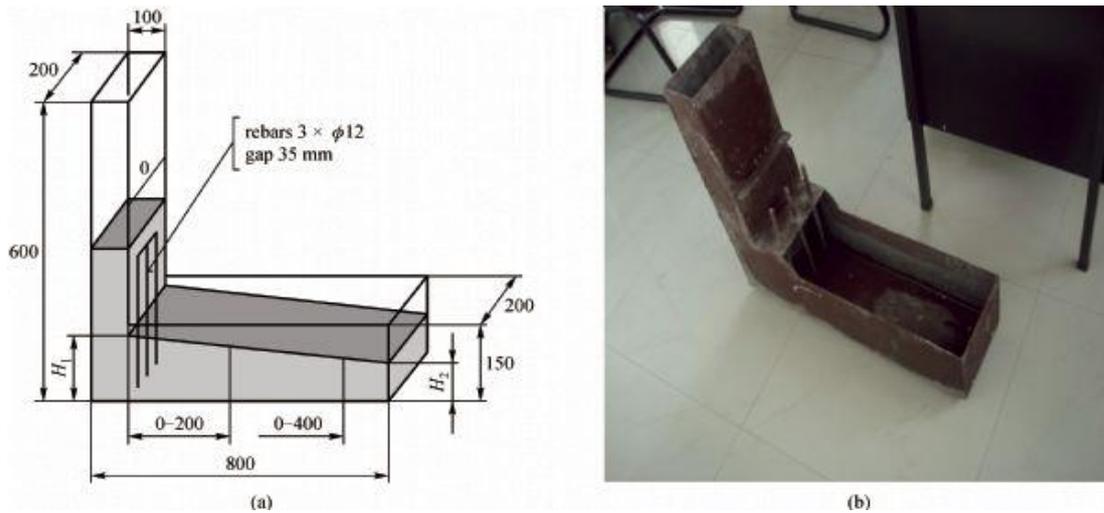


Figure I-8 :Essai de boîte en L.

### 1-5-3 :Essai d'entonnoir :

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante : l'entonnoir dont les dimensions sont définies. La figure est remplie de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture située sa base est ensuite ouverte, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto compactant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le BAP. [6]



Figure I-9 : Essai d'entonnoir.

**1-5-4 :Essai stabilité au tamis NF EN 12350-11 :**

A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de quinze minutes, une masse 4,8 kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5 mm.

Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Il consiste à mesurer la proportion  $\pi$  d'éléments fins de béton (laitance) passant au travers le tamis pour qualifier le béton vis-à-vis du risque de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes : [6]

- $0 \% < \pi$  (laitance)  $< 15 \%$  : stabilité satisfaisante,
- $15 \% < \pi$  (laitance)  $< 30 \%$  : stabilité critique,
- $\pi$  (laitance)  $> 30 \%$  : stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, Béton inutilisable).



**Figure I-10** : Essai de stabilité au tamis

**1-5-5 :La masse volumique EN 12350-6 :**

La masse volumique réelle du béton frais doit être systématiquement mesurée. Cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse volumique théorique. Elle est mesurée par la pesée d'un récipient de 8 litres (fond de l'aéromètre) remplis de béton autoplaçant sans vibrer (Figure I-7).

La masse volumique réelle MVR est normalement égale à la masse volumique théorique MV calculée à partir de la formulation théorique du béton avec comme source d'incertitude la quantité d'air occlus



Figure I-11 : Mesure de la masse volumique réelle

### **1-6 : Les propriétés principales d'un BAP à l'état durci :**

#### **A : Les essais de compression :**

La résistance en compression à 28 jours est désignée par  $f_{c28}$ . Elle se mesure par compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre.

Elle varie suivant la taille des éprouvettes essayées. Plus celles-ci sont petites et plus les résistances sont élevées

#### **B : Les essais de traction par flexion :**

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages (.Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont propre uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions 4x4x16 cm.

La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante :  $\sigma = Mf.a/2I$ , avec le moment de flexion :  $Mf = F.L/4$ , où F est la charge de rupture, L la portée, I l'inertie de flexion, et a le côté du prisme

### **1-7 : Classification des BAP :**

Les BAP sont classés en trois catégories (numérotées de 1 à 3) suivant leur domaine d'utilisation.

Le classement s'effectue suivant la valeur de l'intervalle d'écoulement, le type d'application (horizontal ou vertical) et l'épaisseur (dans le cas d'application horizontale) et selon le tableau ci-après :

		Application horizontale				Application verticale	
		Épaisseur $\leq$ 300 mm		Épaisseur $>$ 300 mm			
	Longueur maximale de cheminement	Inférieur à 5m	Entre 5m et 10m	Inférieur à 5m	Entre 5m et 10m	Inférieur à 5m	Entre 5m et 10m
Intervalle d'écoulement	$I \geq 100$	①		②a	②b	②a	②b
	$80 \leq I < 100$	②a	②b	②a	②b	②a	②b
	$I < 80$	③a	③b	③a	③b	③a	③b

Tableau I-1 : Intervalle d'écoulement

Dimension (en mm) de l'espace le plus petit à travers lequel le béton doit cheminer pour remplir correctement l'élément à bétonner. L'intervalle d'écoulement  $I$  tient compte de la géométrie des coffrages, de la disposition des armatures et des différents accès à un point donné pour le béton.

**La catégorie 1** correspond aux BAP utilisés dans le cas de coulages horizontaux de faible épaisseur (inférieure ou égale à 300 mm) et ayant un intervalle d'écoulement supérieur 100 mm (anciennement appelés BAN – bétons auto-nivelant).

**La catégorie 2** couvre principalement les BAP utilisés pour des applications horizontales de forte épaisseur (supérieure à 300 mm) ou pour des coulages courants en vertical. L'intervalle d'écoulement  $I$  est supérieur ou égal à 80 mm

**La catégorie 3** est réservée aux BAP pour lesquels l'intervalle d'écoulement  $I$  est inférieur à 80 mm (parties d'ouvrage exigües ou fortement ferrillées).

**Pour les catégories 2 et 3**, on distingue de plus deux sous-classes (2a, 2b et 3a, 3b) en fonction de la longueur maximale de cheminement horizontal du BAP dans le coffrage (5 m pour 2a et 3a, 10 m pour 2b et 3b).

L'entrepreneur doit définir et justifier la catégorie de BAP correspondant au type d'ouvrage (ou partie d'ouvrage) et au mode de mise en œuvre.

Note : L'utilisation d'un BAP donne des possibilités accrues d'obtenir des parements de qualité (homogénéité de teinte en particulier). Dans le cas de bétons architectoniques, il convient, comme pour les bétons ordinaires vibrés, de vérifier au tout début de l'opération

que les caractéristiques du béton et les moyens de mise en œuvre sont inadéquations avec les objectifs visés.

### **1-8 : avantages et inconvénient de BAP :**

#### **A- Les avantages des BAP :**

##### **\*pour la mise en œuvre :**

- diminution du temps de coulée ;
- suppression de la vibration et donc diminution notoire des nuisances sonores et de l'usure des moules métalliques et des coffrages ;
- meilleures conditions de travail, ce qui permet d'attirer une main d'œuvre qui n'appréciait pas toujours les conditions de travail « bruyantes » ;
- possibilité de couler des bétons dans des endroits inaccessibles ;
- possibilité de couler des voiles de grande hauteur en une seule opération.

##### **\*sur la qualité du béton :**

- parfait remplissage des éléments fortement ferraillés ;
- obtention d'une bonne qualité de parement (surface de béton lisse et donc moins de pores en surface) ;
- et d'une manière générale, obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation ; cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.

##### **\*concernant la conception :**

- permet d'envisager de nouveaux types d'éléments en béton ;
- possibilité d'intégrer des réservations dans le coffrage.

**B-Inconvénients des BAP :**

Le désavantage principal de ce béton est qu'il entraîne un accroissement du coût des matières premières, de la fabrication et du contrôle. Sur chantier, il nécessite également des coffrages plus lourds afin de reprendre les pressions exercées. En effet, les données de la littérature concernant les pressions exercées par les BAP sont parfois contradictoires mais il est recommandé de retenir de manière conservatrice une pression en pied de coffrage correspondant à la poussée hydrostatique du béton frais. Cependant, de manière globale, des économies résultant de la rapidité de mise en place, de la diminution de main d'œuvre, de l'usure moindre des coffrages et de l'amélioration sensible de la qualité finale ont toujours été constatées.

**II-1.introduction :**

Les bétons ont plusieurs types, parmi ces bétons on a les bétons fibrés. Ils ont fait l'objet d'efforts de recherche importants. Le développement depuis une dizaine d'années de matrices cimentaires performants a relancé l'intérêt pour l'utilisation des composites cimentaires renforcés de fibres.

On obtient des produits plus ductiles, multifissurants , capables de limiter la propagation de l'endommagement tout en assurant une durabilité accrue.

Ces matériaux sont très récents pour un secteur comme le génie civil, ou innover est difficile. Les composites « ciment – fibres » et « bétons – fibres » sont une avancée technologique importante dans les nombreux domaines du bâtiment et des travaux publics : Panneaux minces, panneaux décoratifs, encadrements, dallages, voutes de galeries, isolation, réparation, mobilier urbain ...

Grace à leurs propriétés, les fibres permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton avec comme conséquence une réduction des sections.

Le béton est un matériau poreux et fragile, dote d'une faible résistance à la traction donc sujet à la fissuration. C'est un matériau composite, donc un solide polyphasé dans lequel tous les constituants sont associée en vue de lui conférer, à l'échelle macroscopique et au moins dans certaines directions, un ensemble original de propriétés que les constituants pris isolément ne peuvent pas atteindre.

Le renfort donne de la résistance mécanique, alors la matrice unit les fibres, conserve la disposition géométrique des fibres, leur transmet les sollicitations et les protège de l'environnement [21].

**II-2 :Définition :**

Le terme « fibre » se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque millimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu.

Les fibres sont produites à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels sous différentes formes et dimensions. Chacun des catégories de fibre procure au béton des propriétés spécifique mais en général il serait suffisant de vouloir parler de béton renforcé de fibre.[8]



Figure II-1 : les fibres métalliques

### **II -3 : Les différents types des fibres :**

Les fibres utilisées dans la confection des bétons sont classées en quatre grandes familles selon leurs caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques :

- fibre minérales : verre, carbone.
- fibres métalliques : acier, inox, fonte.
- fibres organiques : polypropylène, acrylique.
- fibres naturelles :hévéa, sisal, bois.

Les fibres diffèrent par leur nature, leur diamètre, leur longueur (macro ou micro fibres), leur forme (droite, ondulée, aiguille,...etc.) et leur état de surface .par leurs caractéristiques, différentes les unes des autres, les fibres sont définies suivant qu'elles soient naturelles, synthétiques ou artificielles [9].

#### **II -3-1 :fibres d'acier :**

Les fibres d'acier sont des filaments d'acier courts et indépendants dont le rapport de forme (longueur par rapport au diamètre).et ayant une section de forme et de dimensions variables. Certaines fibres d'acier ont des crochets à leurs extrémités de façon à améliorer l'ancrage dans la matrice cimentaire.

La norme ASTM A820 énumère quatre différents types de fibres, en fonction de leur mode de fabrication.

Le type 1, les fibres de fil d'acier étiré à froid, les plus largement répandues sur le marché, sont fabriquées à partir de fils d'acier étirés.

Le type II, les fibres d'acier découpées, sont fabriquées exactement comme leur nom l'indique : les fibres sont tranchées latéralement à partir de feuilles d'acier.

Le type III, les fibres extraites de la fonte, sont fabriquées en utilisant une technique relativement compliquée. Une roue en mouvement est utilisée pour prélever, par capillarité, du métal liquide d'une surface de métal en fusion. Le métal en fusion sur la roue est refroidi rapidement pour ensuite être détaché de la roue sous l'effet de la force centrifuge. Ces fibres ont une section en forme de croissant.

Le type IV regroupe tous les autres types de fibres. La norme ASTM A 820 présente les longueurs et le diamètre acceptés, le rapport de forme, la résistance à la traction minimale et les exigences concernant la flexion [9].

Le volume des fibres d'acier dans le béton varie généralement entre 0,25% et 2%. en général, un contenu de plus de 2% réduit la maniabilité du béton et la dispersion des fibres et exige des formulations spéciales ou l'utilisation de technique de mises en place spécifiques. La résistance en compression du béton est peu influencée par la présence de fibres. L'ajout de 1,5% de fibres d'acier par volume peut augmenter la résistance à la traction directe de 40% et la résistance à la flexion de 150%. Les fibres d'acier n'ont pas d'effet sur le retrait libre. Les fibres d'acier permettent de retarder la rupture du béton soumis à un retrait empêché et favorisent la relaxation des contraintes sous l'effet du fluage [9].

Le mélange des fibres métalliques au béton doit être particulièrement soigné, certaines fibres ayant tendance à s'agglomérer. l'incorporation des fibres peut être faite soit au malaxage, soit au moment du coulage, soit à la projection. La composition du béton doit être mise au point en fonction des caractéristiques de la fibre et des emplois. L'emploi de super plastifiant est en particulier recommandé pour compenser la diminution d'ouvrabilité provoquée par l'incorporation de fibres. La mise en œuvre et le compactage doivent être étudiés pour le béton considéré et en fonction de sa maniabilité qui diffère généralement de celle des bétons classiques sans fibres. Les dosages en fibres sont de l'ordre de 0,3 à 2% en volume, soit 25 à 160kg/m<sup>3</sup> de béton [10].



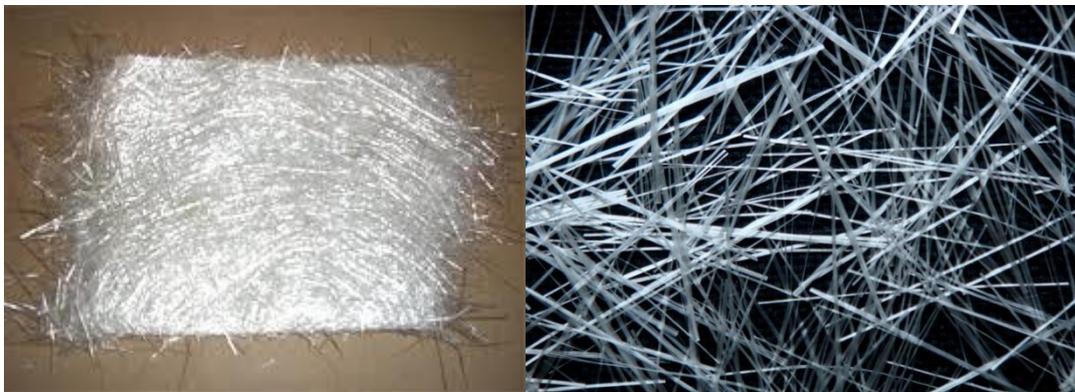
figure II-2 : fibres d'acier

### **II -3-2 - fibres de verre :**

Les premières recherches sur les fibres de verre, étaient en début des années 60, ont porté sur le verre borosilicaté conventionnel (verre E) et sur le verre silico sodo calcique (verre A). Des recherches plus poussées ont mené à la découverte de fibres résistantes aux alcalis (fibres de verre RA) qui amélioraient la durabilité à long terme.

La résistance à la traction est très élevée : 3000MPa.

Les fibres « E » sont les fibres de classique à forte teneur en bore. Elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, mais sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment. Leur emploi dans le béton nécessite donc l'incorporation de polymères ou autres ajouts au mélange [10].



**Figure II-3** : fibres de verre

### **III -3-3 -les fibres de bois :**

Les propriétés des fibres de cellulose du bois dépendent fortement de la méthode d'extraction de la fibre et du procédé de raffinement utilisé. Le procédé kraft est le plus couramment utilisé pour la production de fibre de cellulose de bois. Ce procédé consiste à faire bouillir des copeaux de bois dans une solution d'hydroxyde de sodium, de carbonate de sodium et de sulfate de sodium. La fibre de cellulose de bois présente d'excellentes propriétés mécaniques en comparaison avec plusieurs fibres synthétiques comme le polypropylène, le polyéthylène, le polyester et l'acrylique. Avec certains types de bois et procédés de production de la pâte, on peut produire des fibres de cellulose délignifiées (sans lignine) possédant une résistance à la traction élevée d'environ 2000 MPA. Des fibres ayant une résistance à la traction de 500 KPA sont régulièrement produites à l'aide d'un procédé chimique de production de pâte et en utilisant des essences de bois communes et peu coûteuses.

**II -3-4 -les fibres polypropylène :**

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

- \*Disponibilité à prix relativement faible
- \*Résistance aux attaques en milieux alcalins et corrosifs
- \*Augmentation notable de la résistance aux chocs
- \*Limite l'ouverture des fissures

Ces fibres sont fréquemment utilisées dans le bâtiment, en particulier dans la réalisation de panneaux décoratifs, revêtement de façades, de tuyaux...

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

**Tableau II-1:** propriétés de différents types de fibres

**II -4 : critères de choix des fibres :**

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leur nature ou leur géométrie



**Figure II-4** : béton fibrée

Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux (certaines fibres de verre ou fibres naturelles).[9]

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

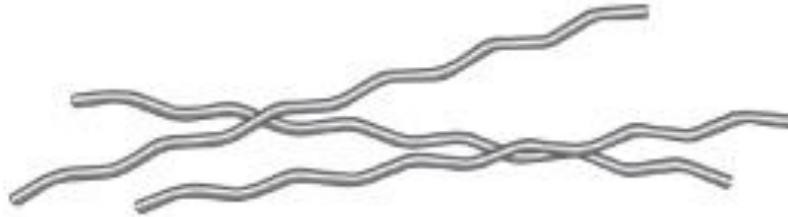
Il existe des fibres à crochets, leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre et par frottement à l'interface avec la matrice.



**Figure II-5** : les fibres à crochets

On trouve aussi des fibres ruban, des fibres à tête d'ancrage ou encore des fibres ondulées dont, qualitativement, les modes de fonctionnement sont les mêmes que ceux cités précédemment. L'avantage des fibres crochets ou ondulées est qu'elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice les rendant plus efficaces que les fibres droites. Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant une réparation non homogène dans le béton. Les fibres

droites sont généralement utilisées pour pallier à ce problème mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacité s'en ressent. [10]



**Figure II-6** : fibres ondulées

Le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métalliques) [10]. Pour un dosage en fibre donné, plus le rapport (L/D) est important, plus la maniabilité du béton diminue.

Le choix dépend aussi de l'usage recherché (pièces minces, pièces massives, réparation d'une structure, projection, renforcement d'une pate pure ....).

### **II-5 -les bétons de fibre :**

Le béton de fibre, c'est un mélange homogène d'une matrice minérale (mortier ou béton) et d'éléments de renfort discontinu présenté ici sous forme de fibre. L'incorporation de ces renforts se fait par l'inclusion directe de fibre isolée au moment gâchage (béton de fibre) ou de la projection (cas de béton de fibre projeté) il peut aussi contenir de la pouzzolane ou autre adjuvant généralement utilisée avec le béton ordinaire.

Le béton de fibre est un béton conventionnel au auquel on a ajouté des longueurs discontinues de fibre durant la préparation du mélange.

Dans la littérature, le béton de fibre n'est pas considéré comme un substitut aux bétons ordinaires, mais comme un matériau de type nouveau. Il est considéré dans le domaine des matériaux de construction comme un béton spéciale.

### **II-6-composition d'un béton fibré :**

La composition d'un béton a pour but de déterminer les proportions des différents constituants, conduisant à un béton dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possédera après durcissement les meilleurs caractéristique ( bonne étanchéité , bonne résistance mécanique , faible retrait , bonne ouvrabilité ...etc.)

L'optimisation de la composition d'un béton renforcé de béton est un travail qui consiste à étudier les propriété du béton de fibre à l'état frais puis à l'état durci.

**II-6-1-la formulation d'un béton fibré :**

La formulation de béton renforcé de fibres n'introduit pas de nouvelles conditions sur la nature des composants de celui-ci. L'optimisation de l'efficacité des fibres nécessite une étude minutieuse de la composition. Les résultats de ce type des études sont plutôt rares.

L'USCOLD CONCRETE COMMITTEE propose un faisceau granulométrique avec deux dimension maximales de granulats ( 10et20mm),pour l'élaboration des bétons renforcés de pas dépasser la moitié de la quantité totale des granulats.

$$G/(G+S)<0,5$$

Avec G=Gravillons=sable

D'autre part MOENS, dans son travail concernant la formulation de béton de fibres, propose une limité au produit primordial (Vf. l/d) qui caractérise bien l'effet de volume de fibres et là l'élancement de la fibre. Il a pris en compte le dosage et la dimension du granulat.

La formule de MOENS est traduite par cette inégalité :

$$V_f.L/d < C_m$$

Ou Vf est le pourcentage en volume des fibres  $\frac{i}{d}$  est la longueurs relative et, Cm est un coefficient donné par la formule

$$C_m = \sum P_{gn} . C_{gn}$$

$P_{gn}$ =dosage du granulat « n »

$C_{gn}$ =coefficient d'interaction qui dépend de la dimension du granulat

- coefficient d'interaction fonction de la dimension des granulats :

Dimension du granulat	Cg.min	Cg.max	Cg.moyen
	1,7	2,00	1,85
	0,95	1,12	1,03
	0,66	0,91	0,78
	0,54	0,69	0,62
	0,10	0,22	0,16
	0,00	0,13	0,07

**Tableau II-2** : coefficient d'interaction fonction de la dimension des granulats

**II-6-2-exigences et propriétés :**

Les deux caractéristiques principales à suivre sont l'ouvrabilité et l'homogénéité du béton.

**II-6-2-A :ouvrabilité :**

La consistance du béton est déterminée par l'essai d'affaissement au cône d'ABRAMS

(NF P 18-451), et devra être adaptée selon les besoins du chantier, tout en respectant les spécifications de la norme NF EN 12620.

La mise en œuvre du béton renforcé de fibres dosées et sa compatibilité par vibration sont en effet classiques, leur ouvrabilité étant d'autant moins bonne que le pourcentage de fibres est élevé et que la dimension des granulats est plus grande. Le rapport longueurs/diamètre des fibres influe également sur l'ouvrabilité. Dans ces conditions de fibre ; il faut :

- Limiter le rapport  $G/G+S$  à 0,5, ce qui se traduit par une augmentation des éléments fins et éventuellement une légère augmentation du dosage en ciment.
- Limiter la dimension maximale « D ».

**II-6-2-B : homogénéité :**

L'arrangement homogène des fibres est nécessaire pour assurer les caractéristiques optimales du béton. Le contrôle de la dispersion des fibres est visuel.

Quand la densité de fibre un paramètre a priori maîtrisable par la formulation du matériau, le facteur « orientation » reste difficile à évaluer, et la plupart des dimensionnements considérant les bétons renforcés de fibre se basent sur l'hypothèse d'un arrangement des fibres aléatoire en orientation, et homogène dans la masse. En d'autres termes, tout est ramené à la notion de densité de fibre. Pourtant cette hypothèse peut être mise en défaut dans les certains cas structure à géométrie complexe, proximité des bords, présence de reprise de bétonnage. De plus, la connaissance précise de l'orientation des fibres serait un facteur qui assurerait les ingénieurs du bon dimensionnement de leur structure, voire qui permettrait l'optimisation de la quantité de fibre à prévoir dans la formulation initiale.

Homogénéité de béton mis en place : la bonne homogénéité de béton de fibre dépend de l'ouvrabilité du béton frais en fonction du moyen de mise œuvre.

Le coefficient E/C maximum de 0,55 étant respecté, il convient de fluidifier le béton comme suit :

- SLUMP de 15 à 20 cm après fluidification pour une mise en place sans moyen de compactage mécanique
- SLUMP de 6 à 10 cm après fluidification pour mise en place à règle vibrante.

Teneur en fibres : il est nécessaire de contrôler le dosage en fibres. Ce contrôle s'effectue sur des échantillons de 10 litre minimum. Après lavage et séchage du béton, les fibres sont

prélevées à l'aide d'un aimant et pesées. Il est nécessaire d'effectuer plusieurs prélèvements ( suivant N.I.T.204).

## **II-7 : rhéologie et propriété mécanique du béton de fibré :**

### **II-7-1 : rhéologie de béton de fibre :**

La rhéologie du béton fibré est un souci majeur pour tous les utilisateurs. En effet, la facilité de mise en place du béton fibré a un impact direct sur l'orientation des fibres, et par conséquent sur l'efficacité de ces dernières.

#### **a-Seuil d'écoulement :**

Le seuil d'écoulement augmente avec le pourcentage de fibre et ce jusqu'à une concentration de fibre métallique égale à 2,75% au-delà de ce pourcentage, le seuil d'écoulement devient très grand, ce qui en pratique, se traduit par le blocage de l'écoulement du béton de fibre.

Des essais ont montré que, pour un pourcentage variant de 0,3 à 1% de fibres métalliques, le seuil d'écoulement augmente rapidement, ce qui traduit la diminution de la maniabilité. Cela peut être expliqué par la déstabilisation de la matrice, composée initialement uniquement de béton. Entre 1 à 2% de fibre, on remarque une certaine stabilisation du seuil.

Cela est dû probablement à l'orientation des fibres, qui tend à améliorer l'écoulement. Au-delà de 2% de concentration, le seuil augmente de nouveau très vite. La raison de ce changement est due principalement à la formation d'amas et d'enchevêtrement de fibre lors de l'écoulement. Au-delà de 2,75% de concentration en fibre métallique, le seuil d'écoulement devient très grand, ce qui veut dire qu'au-delà de cette valeur de concentration, il n'y a plus d'écoulement du béton frais (le béton frais de fibre métallique se trouve dans un état bloqué).

#### **b-Viscosité :**

L'augmentation de pourcentage de fibre incorporée est importante, plus la viscosité plastique est importante. De plus, à taux de fibre donné, cette viscosité est plus importante lorsque les fibres sont longues. Jusqu'à une concentration de fibre métallique de 2,5%, la viscosité plastique augmente avec une pente très faible. Au-delà de ce pourcentage, cette dernière devient nettement plus grande, ce qui justifie la consistance élevée du milieu. Cela veut dire qu'au-delà de cette valeur de concentration de fibre métallique ; il n'y a plus d'écoulement du béton frais.

### **II-7-2 : propriété mécanique du béton fibré :**

Le principe de renforcement du béton par des fibres métalliques est nettement différent d'un renforcement par des armateurs classiques. Dans le béton armé, l'acier travaille fréquemment à sa contrainte maximale admissible ; cela est possible lorsque les armateurs sont suffisamment ancrés. Mais dans le béton armé de fibre lisse et droites (dans la plupart des cas) ; seule une petite longueur d'ancrage est souvent disponible. Cela veut dire que les propriétés mécaniques des bétons renforcés de fibre dépendent de façon générale de la qualité des fibres, de celle de la matrice et de l'adhésion entre elles.

#### **II-7-2- A - comportement à la compression :**

La bibliographie montre que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression, et que la résistance à la compression n'est pas affectée que d'une façon insignifiante par la présence de fibres.

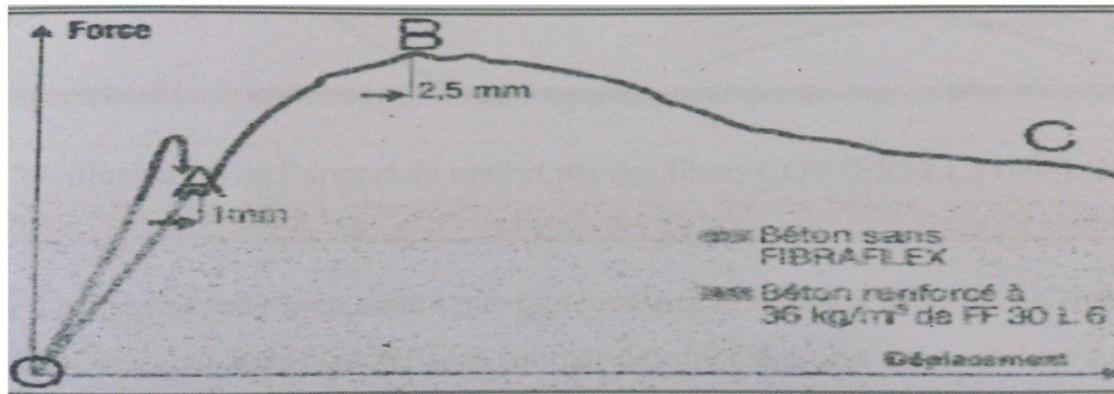
JOHNSON et AL ont fait des essais au laboratoire sur des éprouvettes cylindriques  $300 \times 150 \text{ mm}^2$  (avec des agrégats de  $D \leq 15 \text{ mm}$ ) et cubiques ( $100.100.100 \text{ mm}^3$ ), ont rapporté qu'une amélioration peut être obtenue lors de l'utilisation des fibres dans le béton.

Ils sont arrivés à conclure que la présence de fibres d'acier permet un gain maximal de 15% de la résistance en compression. DARDARJ a montré cependant que la résistance peut être diminuée par l'addition de fibre dans le béton (figure 8). Il a conclu, dans son étude qu'à partir de  $V_f = 0,5\%$  pour les fibres de polypropylène, la résistance à la compression diminue et les fibres les plus longues présentent la plus faible efficacité suivant l'auteur cette diminution peut s'expliquer par une mauvaise homogénéité du béton et par une valeur E/C élevée, ou une mauvaise compacité due à un excès de fibres.

En revanche de cette dernière conclusion, GOPALARATNAM et AL, ont montré dans leurs résultats statiques faits sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 76 mm et de hauteur 152 mm sollicitées en compression, que la présence des fibres d'acier dans la matrice cimentaire augmente la résistance à la rupture de 35% pour 1,5% de fibre en volume, et la déformation correspondante à la résistance maximale augmente de 38%.

#### **II-7-2 -B- Comportement à la flexion :**

Il est bien connu que dans les utilisations courantes, les bétons de fibres sont souvent soumis à des contraintes de flexion, et c'est là que l'ajout des fibres dans le béton a les conséquences les plus marquées. Ces contraintes –là représentent la capacité de résistance de béton fibrés. Cette résistance est habituellement présentée par le diagramme charge flèche d'une poutre soumise en flexion (3 ou 4 points) comme il est représenté dans figure :



Ce diagramme se caractérise par deux points :

- Un point « A » correspondant à la fin d'une partie linéaire est dénommé limite de proportionnalité. Il correspond en fait à la première fissuration de la matrice.
- Un point « B » correspondant à la rupture du composite. La contrainte correspondante au point B est appelée contrainte ultime pour certains, ou module de rupture par d'autres.

Entre O et A, on retrouve la même allure de comportement que pour la matrice seule sur la courbe force-déformation. Le rôle de la matrice est très important dans cette zone.

Cependant, les fibres en apportant un soutien aux zones faibles, ont pour effet d'homogénéiser la répartition des efforts internes, ce qui contribue à augmenter l'importance du domaine linéaire. Zone OA est à permettre le développement d'un écoulement important avant l'apparition de la première fissure au-delà du point A [10].

Le gain appréciable est celui réalisé sur la formation de première fissuration. Au-delà du point A, il y a développement d'une microfissuration, les fibres jouant un rôle important pour la reprise des efforts. Au point B la contribution des fibres inférieures est maximale. Au-delà de ce point, les fibres inférieures se déchargent.

En général, les fibres d'acier peuvent améliorer nettement la résistance à la flexion dans le cas de forts dosages en fibres.

Les essais de flexion sont réalisés à vitesse de déformation constante, une transformation très significative de la courbe efforts-déformation est généralement constatée et qui fait apparaître un accroissement faible ou nul de la résistance à la première fissuration et une résistance parfois supérieure après la première fissuration qui s'étend sur une forte déformation [10].

### II-7-2 -C-comportement a la traction :

Les fibres sont introduites dans le béton pour compenser la fragilité du matériau en traction par une couture de la microfissuration

De nombreux auteurs utilisent des essais de traction (indirecte) : l'essai de fendage ou l'essai dit de 'module de rupture' (essai de flexion pour lequel on mesure l'effort maximum atteint), le problème est qu'on cherche à tirer de ses essais une résistance intrinsèque à la traction, alors qu'ils intègrent un mécanisme de structure. On mesure donc, indirectement, l'effet de couture des fibres à travers une microfissure, mais cette mesure est soumise à des effets d'échelle importants.

Les fibres interviennent essentiellement dans la phase post-fissuration assumant un transfert des contraintes à travers la discontinuité du champ des déplacements. Avant fissuration, les fibres n'ont aucune ou peu d'influence sur le comportement mécanique, que ce soit à la compression ou à la traction. Une fois la fissure ouverte, les fibres par leur action directe restreignent la propagation de la fissure. La figure montre le comportement global d'une éprouvette en béton fibré soumise à la traction

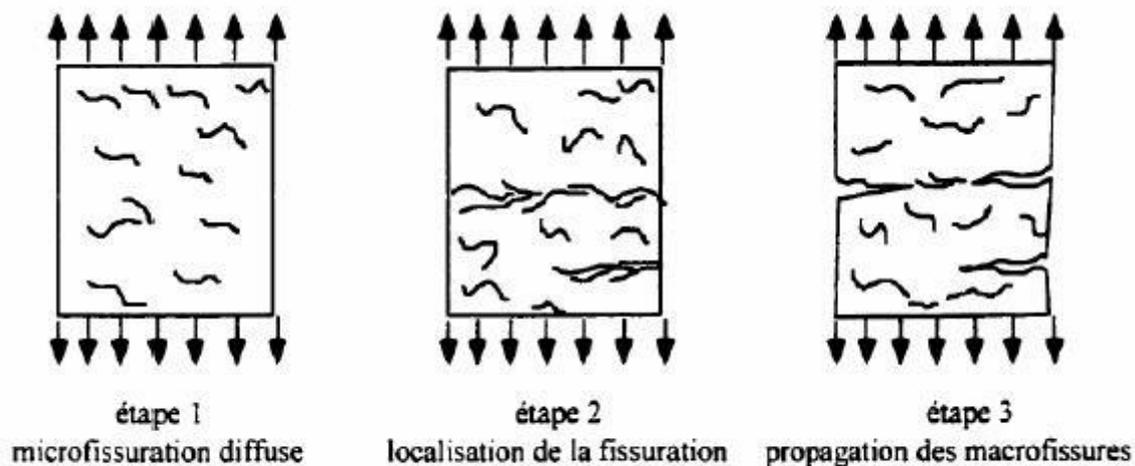


Figure II-7 ; comportement à la traction d'un BAPF

### II-7-3-le rôle des fibres dans les bétons :

Le rôle principal des fibres dans un matériau peut-être lié à deux points essentiels :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures.

- Transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qu'accroît la sécurité des états de chargement ultimes.

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

Le béton renforcé de fibres d'acier, la force peut transmise à travers la fissure par les fibres qui assurent la couture des microfissures. Ces microfissures ne peuvent s'agrandir que lorsque la fibre qui forme un pont entre les deux lèvres de la fissure permet par un écoulement plastique de la fibre l'ouverture de celle-ci. Par analogie, on peut dire que les fibres jouent un rôle qui peut alors s'apparenter à celui des aciers passifs dans une structure en béton armé. Ceci peut être justifié par les études qu'ont été mené, aussi bien sur les aspects expérimentaux, tels que les travaux de SWAMY que sur les aspects théoriques concernant les problèmes d'espacement, d'orientation et de ségrégation des fibres.

En résumé, il est nécessaire de dire que les fibres assurant le rôle principal de modifier la réparation des fissures, de les coudras, par conséquent de rendre le matériau moins fragile et donc plus ductile. Cela veut dire qu'il faut plus d'énergie pour faire progresser la fissure [10].

**III-1 : Introduction :**

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

L'addition des fibres influe directement sur la rhéologie des bétons à l'état frais et donc de manière similaire sur l'ouvrabilité des BAP. D'après GROTH, cette influence est fonction du dosage en fibres et de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élançement. Ces propriétés ont été mises en évidence par différents essais à l'état frais, par exemple l'essai d'étalement « SLUMP FLPX » qui permet d'évaluer notamment le risque de blocage pour bien déterminer l'effet des fibres, cet essai a également été effectué avec un béton autoplaçant de référence [11].

**III-2 :Composition des BAPF :**

La composition de mélange du béton autoplaçant renforcé de fibres est souvent un compromis entre conditions sur l'état frais et durci. La forme des fibres diffère de celle des agrégats ; en raison de la longue forme ovale et/ou d'une superficie plus élevée l'ouvrabilité du béton est affectée. Le contenu pratique de fibre est limité : une diminution soudaine d'ouvrabilité se produit à un certain contenu de fibre, qui dépend de la composition du mélange et du type appliqué de fibre. Les paramètres touchant sur le comportement du béton dans l'état frais ont été variés dans plusieurs études expérimentales pour trouver leur effet sur les caractéristiques principales du BAP [12].

**III-3 : Formulation des BAPF :**

Il y a quelques principes de la base de la conception de mélange BAPF : augmenter la teneur en pâte, le dosage du super plastifiant et le contenu de granulats fins à l'allongement et au volume croissants de fibre. ROSSI, HARROUCHE et HOY ont approché la conception de mélange des matrices de béton autoplaçant renforcé de fibres sur une façon plus systématique : ils ont optimisé le squelette granulaire, le contenu et les caractéristiques de la pâte doit être tenu compte pour lier l'ouvrabilité et la composition de mélange. La distribution homogène et l'orientation des fibres sont souvent assumées mais pour BAPF ; l'optimisation de BAPF peut être faite de différents points de vue : par exemple la capacité de remplissage, le comportement de poteau-fissuration, la classe de résistance à la flexion par fendage et les coûts [12].

ROSSI et HARROUCHE (1990) ont proposé une méthode de conception pour optimiser le squelette granulaire du béton de tissu-renforcé qui a été basé sur la méthode de BARON-LESAGE. Ils ont fait deux prétentions : d'abord, le béton le plus réalisable est

obtenu au cas où le squelette granulaire serait optimisé. En second lieu, le premier juge vrai indépendamment de la nature ou du volume de la pâte de ciment. Les caractéristiques du BAP demeure la même pour BAPF [12].

### **III-4 : Les propriétés des BAPF à l'état frais :**

Les bétons autoplaçant fibres ont des propriétés qui ont été mises en évidence par différents essais à l'état frais, par exemple l'essai d'étalement « SLUMP FLOW », l'essai de V-FUNNEL, qui permet d'évaluer notamment le risque de blocage, pour bien déterminer l'effet des fibres, ces essais ont également été effectués avec un béton autoplaçant de référence. GRUNEWALD (2001, 2003, 2004,2005) a réalisé les différents essais d'ouvrabilité sur les différentes compositions des bétons à l'état frais [13].

#### **III-4- A : Essai d'étalement « SLUMP FLOW » :**

L'analyse des résultats montre que l'étalement diminue lorsque la teneur en fibres augmente. Le degré de diminution dépend de la teneur en sable dans composition de référence. On remarque aussi sur la figure (I-7) une ovalisation de la galette pour les compositions renforcées de fibres métalliques ayant une grande surface spécifique (ex : Dramix 80/30 PB), ce qui indique que l'étalement est contrecarré par les fibres dans une ou plusieurs directions. En outre, pour certaines compositions figure (21 b) avec des fibres plus longues (ex : Dramix 80/60 BN), une ségrégation des granulats et des fibres au centre de la galette a été remarquée. La figure (21 c) illustre l'aspect de la galette dans le cas intermédiaire, provoquant ainsi une ovalisation de la galette et une accumulation des particules au milieu (ex : Dramix 65/40 BN) [13].



**Figure III-1 : béton autoplaçant fibrée**

**III-4- B- Essai de V-funnel :**

Le 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 507s.

On note une augmentation du temps d'écoulement en fonction du facteur de fibres. Le comportement à l'écoulement de la viscosité ainsi que de la taille du plus granulat par rapport aux dimensions de l'ouverture de l'entonnoir [13].



Figure III-2 : essai de V-funnel

**III-5- Résistance à l'écoulement :(relation entre la teneur en fibre et la viscosité plastique)**

GRUNEWALD et WALRAVEN (2001) ont constaté que lorsqu'on augmente le dosage en fibres, la porosité interne du squelette granulaire est plus importante et donc la viscosité plastique est plus élevée. C'est une conséquence du frottement dit « solide » qui favorise la résistance à l'écoulement. Jusqu'à une concentration de fibres métalliques de 1%, la viscosité plastique accroit 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 élevé du milieu. De plus, à taux de fibre donné, cette viscosité est plus importante lorsque les fibres sont longues.

Orientation et distribution des fibres affectent les performances et les caractéristiques des BAP fibrés à l'état durci. PETERSSON (1998) a réalisé une étude sur la distribution des fibres métalliques dans la boîte en L qui a consisté 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 [13].

### **III-6- Les fines et leur rôle dans les bétons autoplaçants :**

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

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

Pour les fumées de silice, en présence d'un super plastifiant est utilisé en petite quantité pour des bétons ayant un faible E/C, les fumées de silice peuvent augmenter quelque la quantité d'eau libre le mélange de béton et accroître sensiblement la maniabilité. Du plus ; les fumées de silice augmentent la cohésive du béton et diminuent donc le ressuage et la ségrégation.

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

Cependant, était donné que le risque de retrait plastique est très élevé pour ce type de béton, la cure du béton doit être bien effectué [13].

### **III-7- La rhéologie et stabilisation des suspensions :**

#### **III-7 -1. Introduction :**

La caractéristique mécanique principale des bétons d'avoir un seuil de contrainte : ils ne s'écoulent que si on leur applique une contrainte suffisamment forte. Les « nouveaux bétons » (des bétons Hautes performances (BHP) fluides ou bétons autoplaçant (BAP) ont vu ces trente dernières années leur seuil de contrainte fortement diminuer, facilitant ainsi leur mise en œuvre. Dans le même temps, le caractère thixotrope de ces matériaux s'est fortement accentué : les évolutions de leur viscosité apparente au cours du temps et en fonction de l'histoire de l'écoulement ont désormais des conséquences pratiques parfois spectaculaires et toujours surprenantes.

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

La rhéologie donne les relations entre contraintes et déformation d'un élément de volume, en tenant éventuellement compte de leur histoire et des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps. Ces relations, dites de comportement, font correspondre les déformations, d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées [14].

### **III -7-2. Définition de la rhéologie :**

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps. La rhéologie se décompose en plusieurs sorts d'études :

- Rhéologie expérimental : détermination expérimentale des relations de comportement (entre contraintes et déformation ou vitesse de déformation).
- Rhéologie structurale : explication des comportements à partir de la structure du matériau.
- Rhéologie théorique : fournir des modèles mathématiques en nombre limité des comportements indépendamment de la structure microscopique [14].

### **III -7-3. Paramètre rhéologiques des suspensions :**

#### **III -7-3-1. Seuil de cisaillement :**

Le seuil de cisaillement (cohésion ou rigidité) est la force minimale nécessaire pour mettre en mouvement un fluide soumis à une contrainte de cisaillement. En dessous de ce seuil, le fluide possède les propriétés d'un solide élastique mais une fois ce seuil dépasse, le coulis se comporte comme un fluide newtonien ayant une viscosité plastique SHAUGHNESSY et CLARK (1988).

Les valeurs de seuil de cisaillement des suspensions sont identifiées à l'aide du modèle de Legrand, la figure (7) montre que le seuil de cisaillement est diminué avec le décroissement de la Concentration volumique solide des suspensions. Cela peut être expliqué par la diminution de l'interaction physico-chimique entre les particules nanométriques de silice [14].

#### **III -7-3-2. viscosité plastique :**

La viscosité est définie, pour un fluide newtonien, comme le rapport de la contrainte de cisaillement  $\tau$  sur le gradient de vitesse de cisaillement  $\dot{\epsilon}$ , son unité est le Pas. Elle représente alors la résistance à l'écoulement d'un fluide.

Pour les fluides non newtoniens, il peut être défini une viscosité, comme étant le rapport  $\tau/\dot{\epsilon}$  ; il s'agit alors d'une viscosité apparente. Il est aussi d'usage de définir une viscosité dynamique représentant la résistance à l'écoulement du fluide pour un gradient de vitesse donnée, comme la dérivée en ce point de la courbe  $\tau=f(\dot{\epsilon})$  [14].

**III -7-3-3. Thixotropie :**

La thixotropie est la propriété des fluides à avoir la forme d'un gel quand ils sont au repos et devenir liquides lorsque agités BOMBLED (1967),

Un fluide est thixotropie si, sa viscosité, à vitesse de constante, diminue au cours du temps à condition que ce phénomène soit réversible. Le comportement thixotropie concerne les corps fluidifiants et les corps plastiques. Pour les corps plastiques, on peut avoir au cours de modification de structure, un changement de contrainte seuil ou pas. Lorsque le corps ne retrouve pas intégralement son état initial, on parle de fausse-thixotropie et on obtient des courbes d'écoulement présentant une hystérèse à bouclé ouverte.

Pour caractérisée de manière simple par un indice. Pour mesurer l'indice de thixotropie on se place à gradient de vitesse constant et on mesure la diminution de viscosité entre le temps 0 et le temps T. il s'agit d'une grandeur sans dimension. Plus l'indice est élevé, plus le caractère thixotrope est marqué [14].

Une autre façon d'évaluer la thixotropie est la mesure de l'air comprise entre les courbes d'écoulement montantes et descendantes d'un rhéogramme, mais c'est une mesure très arbitraire. Cette surface dépend en effet non seulement du volume de l'échantillon, de la gamme de gradient de vitesse couverte, mais aussi du temps mis à couvrir cette gamme. Par ailleurs, elle ne donne aucune information sur la reprise de la structure thixotrope (jacques bouton, 1996)[14].

### IV-1-introduction :

La revue de littérature se veut une analyse de l'état actuel des connaissances dans le domaine entourant le projet de recherche. Une première partie est consacrée à la description d'une réparation de béton, et une seconde, au comportement structural d'une réparation.

### IV -2- réparation du béton :

#### IV -2-1 : définition :

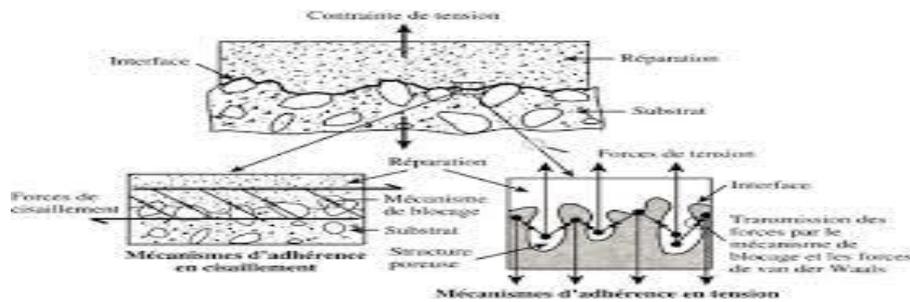
Dans le domaine des réparations, plusieurs termes sont souvent employés en référence à l'action de remettre en bon état une structure déficiente. Par contre, les nuances entre ces différents termes peuvent parfois être subtiles et il est important de connaître leur définition avec précision [17]

**\*Réparation, réhabilitation\_ :** redonné à un ouvrage un état ou une performance structurale proche de son état initial. Selon le MTQ, < la pertinence d'une réparation est jugée en fonction du prolongement de vie utile qu'elle peut entraîner et de son coût. Les activités de réparation doivent corriger les défauts tout en veillant à éliminer ou à contrôler, dans la mesure du possible, les causes des dégradations ou des mauvais comportements >.

**\*Amélioration, renforcement :** redonné à un ouvrage un état ou une performance structurale supérieure à son état initial. En général, les dysfonctions structurales sont composées par un renforcement tandis que les désordres géométriques ou fonctionnels sont corrigés par élargissement.

**\*Reconstruction, refaction d'élément\_ :** démolir et reconstruire partiellement ou totalement un ouvrage (nécessite régulièrement l'usage d'étalements ou de béquilles dans le cas de reconstruction partielle). La démolition partielle devient nécessaire si le béton d'origine est trop détérioré et que les coûts de réparation restent minimales en regard avec une reconstruction totale. Une démolition et reconstruction totale sont envisageables pour des coûts de réparation trop importants ou exorbitants.

Peu importe l'ampleur avec laquelle une structure doit être améliorée, un système réparé comporte deux bétons aux caractéristiques différentes. Ceci est au cœur de la problématique des réparations avec des matériaux cimentaires : un substrat considéré stable et lié à un béton de réparation beaucoup plus jeune et sujet à des changements volumétriques au cours des premiers mois. Qui plus est, il est un peu trop simple de considérer le système en seulement deux phases. En fait, l'interface entre les deux matériaux est une zone faisant partie du système global qui comporte des propriétés différentes des deux bétons qu'il relie. Ainsi, une analyse plus juste de la réparation est basée sur l'interaction entre le béton d'origine, le matériau de réparation et interface qui les unit.



**Figure IV-1** : modèle idéalisé d'un système de réparation

Deux principaux types de réparation peuvent être distingués en fonction de l'importance de l'intervention dans l'élément : réparation de surface ou réparation profonde. Les réparations de surface consistent à retirer une mince couche du béton d'origine détériorée en surface (de l'ordre de 25 à 100 mm) pour en dégager généralement le premier rang d'armature. En fait, ce type d'intervention vise essentiellement à restaurer le béton de recouvrement et affecte généralement peu le comportement structural de l'élément. Dans le cas de réparations profondes, la structure doit parfois être soutenue lors de la réparation car la section restante n'est plus suffisante pour résister à la charge imposée. Dans le manuel d'entretien des structures du MTQ, la réparation sans surépaisseur sont employées pour réparer de petites surfaces tandis que les réparations avec surépaisseur sont utilisées pour tous les éléments d'une structure.

De plus, suivant la nature et l'état de l'ouvrage, chaque réparation doit répondre à des exigences bien précises. En fait, deux grandes classes de réparation peuvent être définies en fonction du rôle qu'elles doivent remplir. La première classe de réhabilitation est une réfection dite structurale car elle implique un transfert des efforts à l'intérieur de la zone réparée ou une reprise du chargement par la réparation. Concernant la seconde classe, la capacité n'est généralement pas de premier intérêt et c'est plutôt les critères de durabilité et d'esthétique qui prévalent. Dans ce cas, il est question plutôt de réparation profonde aura le plus souvent une contribution structurale, en particulier lorsque l'élément d'origine doit être soutenu durant la réhabilitation. A noter qu'une réparation structurale doit également rencontrer les exigences concernant la durabilité. Par exemple, une réparation importante sur la section d'une colonne dans un milieu agressif est à la fois structurale et préventive.



**Figure IV-2** : réparation importante sur la section d'une colonne dans un milieu agressif

Une réparation structurale est requise sur un élément de charpente lorsque celui-ci a perdu une portion importante de matériau et la capacité de l'élément devient critique. Les éléments susceptibles de connaître de telles réparations sont par exemple les colonnes ou les poutres en zones de compression.

Une réparation préventive est plutôt exécutée pour protéger l'armature et le béton au cœur contre les agressions environnementales et prévenir une dégradation excessive menant possiblement à des problèmes structuraux avec le temps. Elles peuvent être réalisées sur des dalles, poutres ou tout élément ne contribuant pas de façon significative au squelette structural du système. Dans le présent travail, les réparations préventives ne sont pas le principal sujet d'analyse, car ce sont les réparations d'ordre structural qui sont étudiées.

#### **IV -2-2 : adhérence entre les deux matériaux :**

Comme il a été mentionné précédemment, le système de réparation est un modèle en trois phases : substrat, interface et réparation. L'adhérence entre les deux matériaux se situe au niveau de la zone de transition, endroit généralement plus poreux et, par conséquent, de résistance mécanique plus faible. Cette augmentation de la porosité au niveau de l'interface est explicable par un double effet, similaire à ce qui est observé à l'échelle du matériau entre la pâte et le granulat. L'effet de paroi (Wall effect) entre le support stable et la réparation fraîche amène la création de vides à l'interface puisque le tassement entre les particules de ciment ne se fait pas aussi bien près de support que dans un espace libre. De plus, l'hydratation est limitée au joint puisque les pores capillaires ne peuvent être comblés dans toutes les directions à cause du substrat (one-sided growth effect) [45], ainsi, voyant l'interface comme une zone de faiblesse, plusieurs recherches ont été réalisées afin de mieux comprendre son influence sur la durabilité d'une réparation [25],[26],[27].

Typiquement, deux types d'adhérence peuvent être différenciés : une adhérence mécanique et une adhérence spécifique. L'adhérence mécanique est liée à l'interpénétration des matériaux l'un dans l'autre ce qui offre un ancrage est en lien avec la rugosité du matériau de réparation sur le substrat. L'importance de cet ancrage est en lien avec la rugosité du matériau de base avant la mise en place du matériau de réparation, la porosité et l'humidité de la surface.

Concernant la rugosité, différentes techniques de réparation (marteau-piqueur, jet de sable, hydro démolition) peuvent également influencer le niveau de rugosité de la surface avant réparation. L'adhérence spécifique par contre est plus complexe [28]. Elle est qualifiée de spécifique car elle dépend de la surface spécifique ou, plus particulièrement, de la surface effective (la somme des contacts individuels) entre les deux matériaux. Ce type d'adhérence regroupe généralement trois volets soit les interactions moléculaires, l'aspect thermodynamique et les liaisons chimiques. Brièvement, l'aspect thermodynamique de l'adhésion traite de l'importance de l'attraction entre deux bétons à l'interface (adhésivité entre deux bétons). Les liaisons intermoléculaires représentent des échanges au niveau

atomique d'électrons (liaisons physiques faibles) contrairement aux liaisons chimiques qui impliquent des réactions avec une énergie de liaison beaucoup plus importante l'étude de l'adhésion entre deux bétons est un phénomène complexe mais une compréhension des phénomènes en jeu est primordiale pour l'étude de la durabilité des réparations de béton.

#### **IV -2-3 : choix du matériau de réparation et principe de compatibilité :**

Une étape cruciale dans le processus de réhabilitation est le choix du matériau de réparation. Toutefois, la montée en flèche du domaine des réparations au cours des dernières décennies a contribué à rendre davantage complexe l'étape de conception, avec un nombre sans cesse croissant de matériaux de réparation souvent mal documentés, laissant les ingénieurs et professionnels devant la difficulté de procéder à une sélection éclairée ainsi, une approche répandue pour la sélection du matériau de réparation était celle du *likewithlike* qui prône l'utilisation d'un matériau de réparation ayant des caractéristiques similaires au matériau de base. Par contre, cette approche se montre un peu trop simpliste, car elle néglige les changements volumétriques importants du matériau de réparation suite à sa mise en œuvre, phénomène qui constitue la problématique majeure du domaine des réparations. Un concept plus rigoureux est ensuite apparu, celui de compatibilité. Par définition, la compatibilité est définie comme une optimisation entre les propriétés déformationnelles, de perméabilités, chimiques et électrochimiques entre le béton existant et le béton de réparation. Cet équilibre doit notamment assurer que les contraintes internes induites par des changements de volumes ou effets chimiques n'excéderont pas les valeurs limites et ce, pour toutes sections du système durant une période spécifique de temps, et sous l'action de plusieurs types de changements environnementaux ou chargements. Finalement, un matériau de réparation et un substrat possèdent une bonne compatibilité mécanique, s'ils peuvent, durant leur durée de vie anticipée, maintenir un état de contrainte interne inférieur à la résistance du système i.e. la résistance du support, de la réparation ou de l'interface entre les deux matériaux.

#### **IV -2-4-Différents type de compatibilité :**

Globalement, quatre type de compatibilité peuvent être distingués : déformationnelle, de perméabilité, chimique et électrochimique. la compatibilité déformationnelle est la composante la plus importante ou critique de toute réparation de béton, parce qu'elle se pose presque inévitablement. Or, la présence d'un béton d'origine très stable liée à un béton de réparation entraîne forcément des contractions qui peuvent ultimement mener à la fissuration et /ou décollement de la réhabilitation. Donc, le matériau de réparation doit être compatible d'un point de vue déformationnelle avec le support et offrir une bonne qualité de l'interface afin de minimiser le risque d'échec du système réparé. Pour une réparation préventive, les propriétés ou phénomènes qui influencent principalement la compatibilité déformationnelle incluent le retrait de séchage et le coefficient de dilatation. Dans le cas d'une réparation structurale, le matériaux réparation est sous contrainte et deux autres

composants importantes s'ajoutent à la compatibilité déformationnelle i.e. Le fluage et le module élastique.

Ainsi, les différentes propriétés de la compatibilité déformationnelle (ou mécanique) conditionnent la réponse mécanique du système réparé aux sollicitations thermiques, hygrométriques et gravitaires. L'objectif est d'obtenir une combinaison de propriétés qui assure une contribution de la zone réparée équivalant aux sollicitations de conception, indépendamment des changements climatiques ou environnementaux.

Un second type de compatibilité est celui des perméabilités (substrat et matériau d'apport). Par perméabilité, il est entendu du béton à laisser traverser soit un liquide ou un gaz. Intuitivement, un matériau de réparation montrant une faible perméabilité semble un critère désirable pour freiner la pénétration d'agents agressifs dans la matrice. Pour les nouvelles structures, cette affirmation se révèle juste, mais dans le cas des réfections, il est nécessaire d'être prudent. Dans le cas des bétons nouveaux, réduire la perméabilité a pour but principalement d'optimiser la durabilité. Par contre, concernant les réparations, durabilité et perméabilité sont moins fortement liées. Une faible perméabilité de la réparation risque d'emprisonner l'eau et les ions se trouvent dans la porosité du support au moment de la réfection et réduit possiblement la durabilité du système global. En fait, c'est l'aspect premier à considérer dans le cas des réparations puisque l'eau ne peut pas sortir du système, risque de générer des pressions hydrauliques à l'interface et provoquer ultimement la fissuration/décollements, de plus, une faible perméabilité de la réhabilitation est souvent obtenue pour des bétons présentant un faible rapport eau/ciment et d'un dosage en ciment important. Ce dosage important en ciment augmente le retrait et puisque le matériau est gêné par la présence du support, la tendance à fissurer devient non négligeable. Selon Emmons et Vaysburd [49], viser une très faible perméabilité de la réparation peut être problématique pour la durabilité du système réparé puisque l'apparition de fissures devient une source de danger pour la durabilité du système réparé. Selon ces auteurs, la perméabilité de la réparation ne semble pas un critère dominant comparativement à la fissuration de la réparation en matière de durabilité. Ainsi, minimiser la fissuration de la réparation plutôt que minimiser la perméabilité est primordial afin de permettre une durabilité satisfaisante du système réparé.

Sévère (réaction alcali-granulat ou attaque sulfate par exemple). Ainsi, advenant la réparation d'une structure gravement atteinte, la composition du matériau de réparation doit être spécifiée avec précaution. Pour une réaction alcali-silice dominante sur un élément, un dosage minimum en alcalins pour la réparation est important tandis qu'un ciment à faible teneur en C3A est un choix judicieux pour une attaque sulfate sévère afin d'éviter l'accélération du phénomène de dégradation sur la structure d'origine [29].

Finalement, comme la plupart des bétons contiennent de l'armature, la compatibilité électrochimique est un élément important à respecter de façon à ralentir ou arrêter la corrosion du béton d'origine. D'abord pour initier la corrosion, la couche passive en surface

des armatures doit être détruite localement. La disparition de cette couche protectrice est favorisée en présence d'une teneur importante en chlorures au niveau des armatures et / ou d'une différence de PH dans le béton (carbonatation du béton sain). Après la dépassement ponctuelle, le phénomène de corrosion peut s'enclencher par la création d'une pile électrochimique i.e. des zones anodiques (dissolution du métal) et cathodique (réaction de l'oxygène) liées par un milieu électrolytique (solution interstitielle du béton). Par la suite, le développement de la corrosion dans le béton est assuré avec la présence continue d'eau et d'oxygène dans la matrice cimentaire [29]

Une pratique courante concernant les réparations d'éléments fortement touchés par la corrosion consiste d'abord à retirer le béton contaminé pour dégager les premiers rangs d'armature corrodés.

Par la suite, les barres sont brossées (jet de sable ou jet d'eau) pour en déloger les produits de corrosion et la réparation est réalisée. D'autres techniques sont également possibles : protection cathodique, inhibiteurs de corrosion et membranes protectrices. Par contre, il n'est pas simple d'assurer la compatibilité électrochimique puisque d'une part, il est difficile d'éliminer les sources de corrosion (ions agressifs, produits de corrosion) au niveau des armatures et d'autre part, plusieurs des techniques protectives ont montré une accélération de la corrosion de l'ouvrage [30]

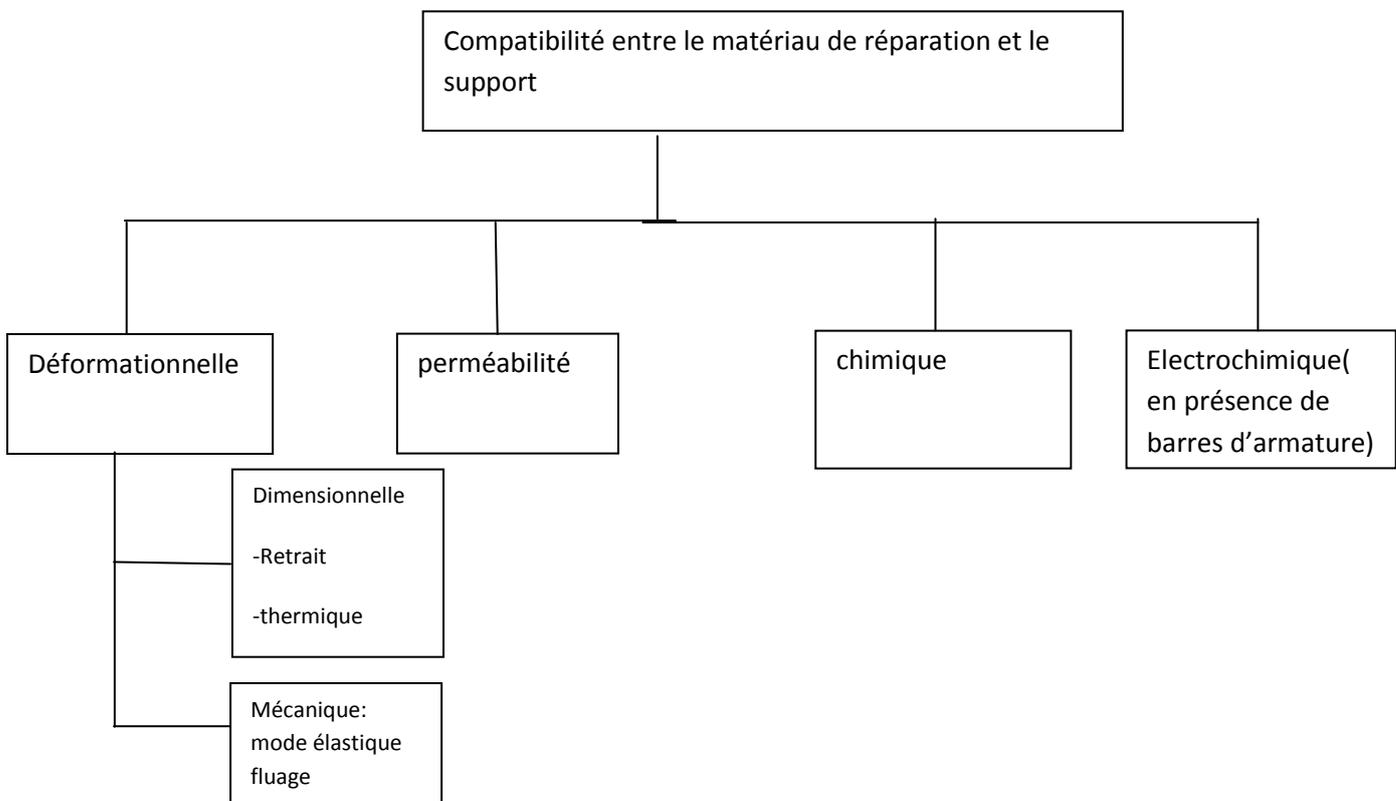


Figure IV-3 : principe de compatibilité entre la réparation et substrat

### **IV-3 :Facteurs d'influence de la compatibilité entre la réparation et substrat :**

Jusqu'ici , il a été question des principaux facteurs internes qui peuvent affecter la durabilité d'une réparation i. e l'adhérence et la compatibilité des propriétés du matériau de réparation avec le support . par contre , le système réparé est soumis à des perturbations externes que ce soit des changements , gel/dégel, mouillage/ séchage) ou des attaques chimiques. Ces différents facteurs peuvent altérer le matériau de réparation ou même l'adhérence entre les deux matériaux cimentaires et nuire à la compatibilité entre les deux matériaux.

Les variations d'humidité liées au séchage du béton se produisent généralement sur une faible profondeur. Ainsi pour un élément massif, le séchage provoque essentiellement sur une fissuration de peau. Toutefois pour des élément peu épais, comme les réparation de surface , cette fissuration peut se prolonger jusqu'à l'interface et en-deçà.

Les changement thermiques affectent directement la compatibilité déformationnelle du matériau composite ou plus spécifiquement la compatibilité thermique. Le béton de masse est souvent plus enclin à la fissuration due à la chleur, cas il présente des gradients thermiques

### **IV-4 :Mise en place et condition de réparation :**

Une dernière étape cruciale dans le processus de réparation est la mise en place du matériau. La technique généralement utilisée en réhabilitation cimentaire est le « patch repair » ou la réparation de surface localisée pour sa facilité d'exécution [31]. Les étapes de la méthode consistent d'abord à retirer le béton endommagé et à dégager les premières barres d'armature dans le cas du béton armé. Ensuite , une préparation de surface est réalisée pour donner au support une bonne rugosité afin d'améliorer l'adhérence avec le matériau de réparation.

Différent équipement sont disponibles pour réaliser un traitement de surface, mais l'important est de donner une bonne rugosité en minimisant la microfissuration de la surface du support.

Un nettoyage est important par la suite afin de retirer toute poussière ou saleté qui diminuerait la résistance de l'adhérence. L'utilisation d'un agent de liaison est possible, quoique déconseillé par nombre de spécialistes, pour améliorer les propriétés mécanique de l'interface. L'emploi d'un agent de liaison est délicat puisque peu de recherches ont été réalisées sur le sujet et qu'en pratique, son application demande beaucoup de plus de connaissance pour assurer la durabilité du système réparé. Finalement , la mise en place dunmatériau de réparation est effectuée , suivie de la période de cure. Diverses mesures préventives , comme les imperméabilisants , les membranes et systèmes de protection cathodique sont disponibles pour accroitre la durée de vie de l'ouvrage lorsque la réparation est soumise à des conditions d'exposition agressives.

L'état du support avant l'application du matériau de réparation est important pour la durabilité de l'ouvrage. Mise à part, le traitement de surface mentionné précédemment, l'état de chargement sur le support influence aussi l'efficacité de la réparation. En fait, certaines études [32],[33] ont montré que la fissuration occasionnée par le retrait de séchage pouvait être diminuée en laissant une portion de la charge morte agir sur la structure durant la réparation. La mouillabilité du support a aussi son influence. Trop d'eau au niveau de l'interface peut diminuer la capacité du joint et l'inverse entraîne un drainage de l'eau de la réparation vers le substrat changeant ainsi les propriétés du matériau de réparation. D'ailleurs, les recherches effectuées par 5. Austin et coll. démontrent qu'un support trop humide (SSM- saturé surface mouillée) ou trop sec (NSSS-non saturé surface sèche) réduit la résistance du joint entre les deux matériaux. Egalement, les expériences de diffraction aux rayons X de F. saucier [44] montrent qu'une saturation partielle de la base favorise la formation de cristaux d'ettringite entre les deux matériaux formant ainsi un ancrage supplémentaire. Par contre, l'état des connaissances concernant le mouillage préalable du support sur l'adhérence de la réparation est très qualitatif. Un effort de recherche approfondi est souhaitable pour mieux quantifier l'influence de ce paramètre.

#### **IV-5 :Comportement structural d'une réparation :**

##### **IV-5-1 :Introduction :**

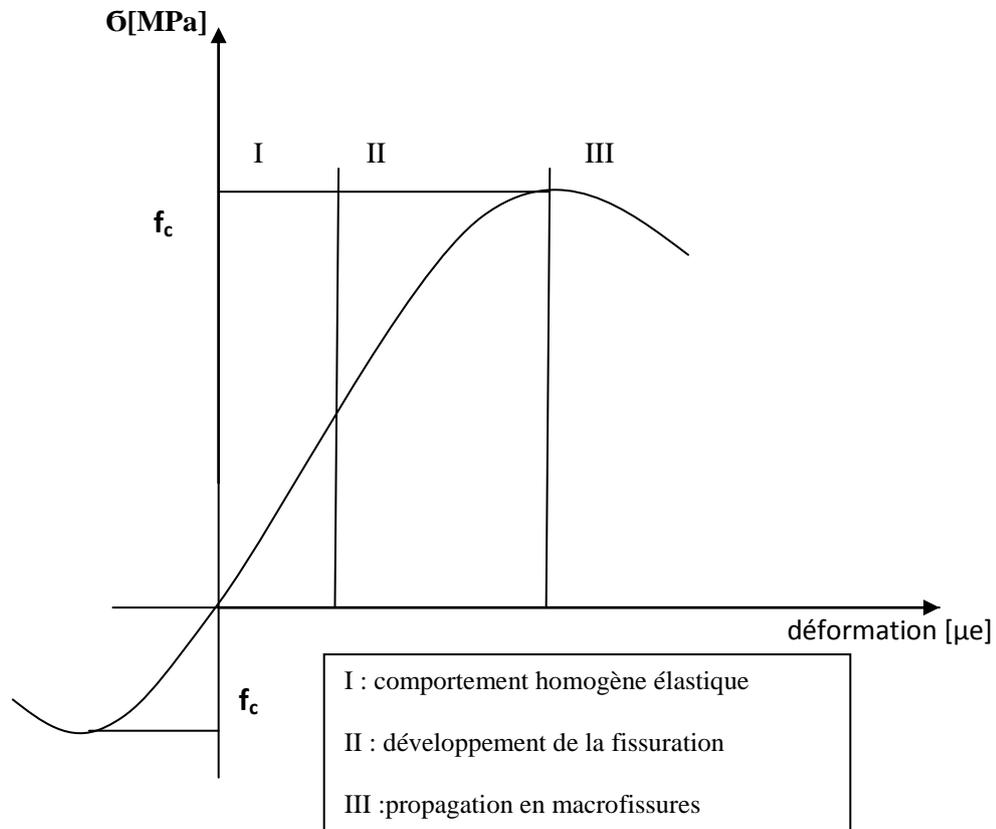
L'analyse structurale d'une réparation nécessite d'abord la compréhension du comportement mécanique des matériaux en cause. Toutefois, l'analyse est complexe puisque les matériaux possèdent des compositions différentes ( ciment, granulats, sable, eau, adjuvant, ...)

Et que leurs caractéristiques ( module élastique, retrait, fluage, hydratation, ...)évoluent dans le temps et sous différentes conditions ( température, humidité, hydratation, ...).

De plus, le béton est un matériau hétérogène, mais pour simplifier l'approche, celui-ci est souvent considéré comme étant homogène et isotrope à l'échelle macroscopique.

L'avantage structural du béton est surtout son comportement en compression puisqu'en général, la résistance en traction simple est dix fois moins importante que la résistance en compression. Donc, sous sollicitation statique simple en compression, la relation charge/déformation du matériau est quasi linéaire pour des niveaux de contrainte faibles à modérés ( entre 50 et 60 % de la limite ultime du matériau ). Lorsque la contrainte est supérieure à 60% de la contrainte de rupture, le matériau réagit de façon « non linéaire » et cette tendance de non proportionnalité est caractérisée par la progression de microfissures qui se rejoignent, formant ainsi des macrofissures menant ultimement à la rupture du matériau ( voir figure 4). La nature quasi- fragile du béton offre peu de ductilité ou de déformation plastique avant la rupture. Par ailleurs, sur une base comparative, les bétons ordinaires (BO) sont généralement plus « ductiles » que les bétons à hautes performances (BHP ou BUHP) [50]. Il est important de ne pas confondre ductilité et rigidité puisque la rigidité

régit la déformation d'un matériau avant la limite d'élasticité ( section I sur la figure 4) et la ductilité décrit plutôt la déformation entre la limite d'élasticité et la rupture.



**Figure IV-4** : courbe contrainte – déformation en compression et traction simple pour un béton usuel

La réponse structurale d'une réparation devient légèrement plus complexe que dans le cas d'un béton seul, puisqu'elle est influencée par la nature composite des matériaux en cause et par les propriétés de l'interface qui les unit. Ainsi, une analyse structurale juste d'une réparation doit idéalement tenir compte de ces trois phases et de leurs propriétés mécaniques respectives.

La prochaine section traite des connaissances actuelles sur le comportement mécanique d'un système réparé (béton de base, béton de réparation et interface).

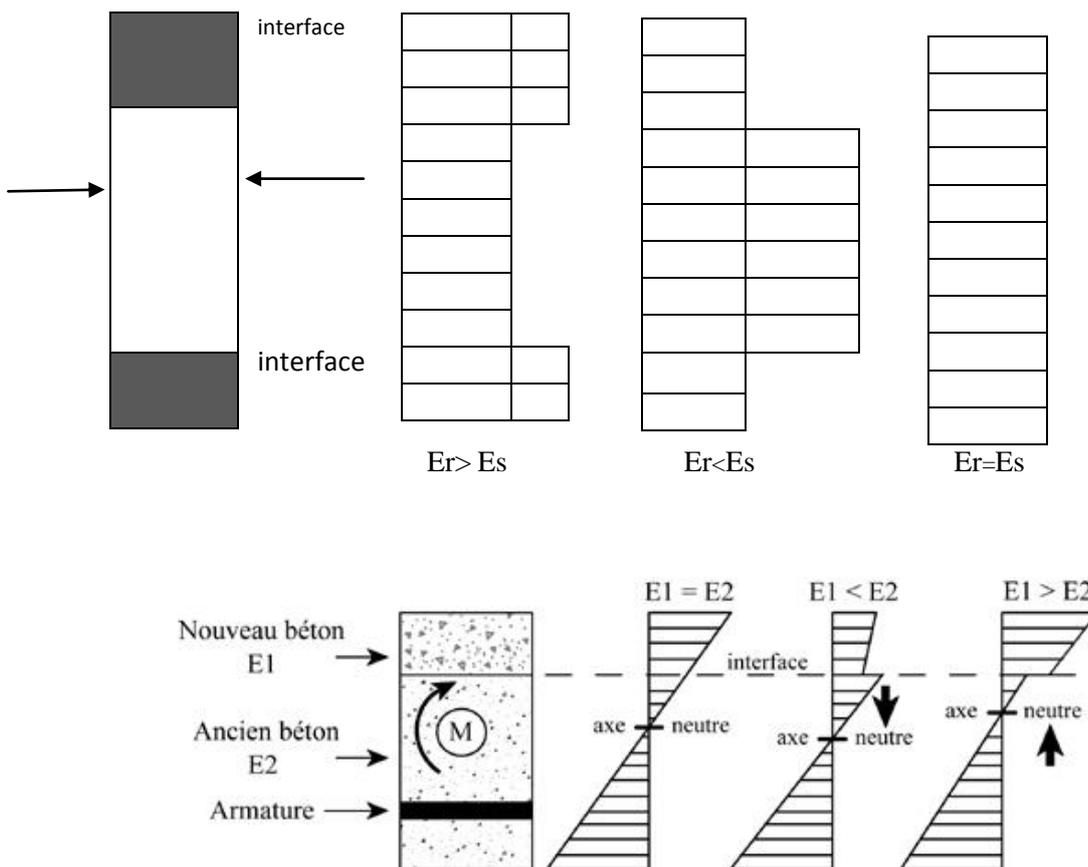
#### **IV-5-2 : Propriétés mécanique du système réparé :**

Principalement, quatre propriétés ou phénomènes doivent être considérés pour une analyse déformationnelle dans le domaine élastique des matériaux composant le système réparé : le module élastique, le fluage, le retrait et le coefficient de dilatation thermique [33]. Au-delà du domaine élastique, l'analyse déformationnelle doit prendre en compte la résistance ultime et la ductilité des matériaux en jeu. La déformation élastique est

liée à la rigidité ( ou le module élastique ) du matériau et constitue la réponse mécanique instantanée tandis que la déformaion de fluage se manifeste progressivement ( caractère visqueux). La déformation de retrait liée à l'abaissement de la teneur en eau du matériau ( auto-dessiccation et séchage ) et à la déformation thermique est les autres composantes pouvant influecer le comportement mécanique du système réparé. Dans le cas de réparation structurales, deux paramètres jouent un role primordail dans comportement mécanique soit le module élastique et le fluage. Le retrait et le coefficient de délatation thermique peuvent exercer une certain influence sur la capacité structural d'une réparation, mais elle est d'ampleur limitée.

La différence de rigidité entre la réparation et le support induit des sauts dans le profil des contraintes sur la section. En considérant un contact parfait entre les deux matériaux , la figure 33 illustre les profils de contrainte théorique sur une section réparée soumise à un chargement axial de compression et flexion , suivant que le module élastique du matériau de réparation est supérieur, égal ou inférieur à celui du béton du support.

chargement en compression



**Figure IV-5** : Etat des contraintes sur des sections réparées soumises à des chargements de compression et flexion pour des matériaux homogènes, isotropes et linéaires (adhérence parfaite)

Une disparité entre les rigidités des deux bétons entraîne une discontinuité dans le profil des contraintes à l'interface. Ce saut de contraintes est une conséquence de la loi de Bernoulli, valable pour de petites déformations, i.e. dans la portion élastique de la courbe de comportement des matériaux présentée précédemment (figure IV-5). Cette hypothèse stipule que les sections planes restent planes et que la déformation d'une fibre longitudinale est proportionnelle à sa distance par rapport à l'axe neutre. Ainsi, comme la rigidité change brusquement de part et d'autre de la zone de transition, la contrainte évolue de façon discontinue dans cette zone pour satisfaire la condition de compatibilité des déformations sur la section. De plus, pour les éléments en flexion, la position de l'axe neutre est influencée à rabaisser la position de l'A.N. tandis que l'inverse se produit pour une réparation avec rigidité élevée. Or en suivant cette idée, une réparation avec une rigidité plus faible que la support amène des contraintes moins importantes dans la réparation au niveau de l'interface et protège ainsi la faiblesse mécanique du joint, ce que démontrent les résultats expérimentaux d'études récentes.

Actuellement dans le domaine des réparations, il n'y a pas de consensus sur le choix à faire concernant la rigidité de la réparation afin d'assurer la durabilité de l'ouvrage. Bien qu'il y ait peu de travaux sur le comportement structural des réparations, certains auteurs (Emberson et Mays) [57] croient qu'un module élastique similaire à celui du béton de base est souhaitable pour éviter une concentration de contraintes à l'interface et ainsi assurer une résistance satisfaisante du joint. Par contre, les travaux réalisés par Mangat et O'Flaherty [34], [35] penchent plutôt pour l'utilisation d'un module élastique plus élevé que celui du support. En fait, selon eux, une forte rigidité de la réparation est importante pour deux raisons principales :

- Augmenter la contribution structurale de la réparation de façon à soulager le support.

- diminuer la fissuration de retrait dans la réparation pour une meilleure durabilité à long terme de l'ouvrage. Selon eux, une forte rigidité est souvent accompagnée par une bonne résistance à la traction du matériau pour résister aux contraintes de tension occasionnées par le retrait. La résistance à la traction élevée est d'ailleurs souhaitable dans le cas d'une réparation de façon à réduire la fissuration causée par le retrait de séchage du matériau de réparation et augmenter la résistance du joint.

Plum [36] ; [37] ; [38] a travaillé au développement d'équations pour le domaine des réparations cimentaires dépendamment de la fonction que celle-ci doit remplir, i.e. une fonction de réparation qui dépend d'une déformation maximale dans le cas d'une réparation préventive et plutôt d'une force maximale dans le cas d'une réparation structurale. Concernant, la fonction de réparation structurale, l'équation est basée sur le ratio entre la force supportée par la réparation ( $F_r$ ) et la force circulant dans l'ensemble du système réparé ( $F = F_c + F_r$ )

La valeur de la fonction de réparation structurale se situe entre 0 et 1. En fait, la fonction donne un indicatif de la portion de la charge supportée par la réparation versus celle de l'ensemble du système réparé. Par exemple, une valeur de la fonction de 0,6 indique une réparation structurale qui supporte 60% de la charge totale effective sur l'élément.

L'équation met également en relation les principaux facteurs tels que le module élastique de la réparation ( $E_r$ ) et le coefficient de fluage ( $\alpha_r$ ) sur l'efficacité de la réparation structurale. Selon plum, un module élevé et un fluage faible représentent une combinaison gagnante pour une réparation structurale efficace et le contraire est plutôt à prescrire pour une réparation préventive.

En somme, concernant la rigidité de la réparation, un module élastique de modéré à fort est souhaitable pour les réparation structurales. Le choix d'un module élevé pour la réparation a pour but de soulager le support et transmettre les efforts vers la réparation. Par contre, il est nécessaire d'être prudent, car une rigidité élevée de la réparation peut générer des contraintes importantes à l'interface entre les deux matériaux et comme le joint est généralement une zone de faiblesse mécaniquement, la durabilité de l'ouvrage peut être compromise.

Le fluage est un autre paramètre important du comportement mécanique du système réparé. En général, pour une structure en béton soumise à une charge permanente importante, un fluage faible est préférable pour éviter des déplacements importants (flèche excessive, chute d'appuis, désalignement). Dans le cas des réparations, le fluage peut devenir un paramètre avantageux ou désavantageux selon qu'il s'agisse d'une réparation structurale ou non. En fait, dans les réparation préventives, l'utilisation d'un matériau à fluage élevé se révèle intéressant afin de soulager les contraintes volumétrique causées par le retrait ou la température. Dans le cas d'une réparation structurale, le fluage est défavorable, car il tend à réduire la contribution de la réparation et à isoler une part importante des efforts dans le béton d'origine.

## Méthodologie de travail

Le but de notre travail basé sur deux éléments clé :

1-consiste à étudier un BAP renforcé par trois types de fibres

a-fibre métallique normalisé (sous forme de crochet)

b-fibre de verre (type E)

c-fibre métalliques de récupération (déchet des câbles de frein du vélo)

2- nous avons réparer un BAP fissuré par l'incorporation des fibres métalliques (normalisée et récupérer), pour cela, nous avons préparés quatre éprouvettes (14x14x56 ) comme témoins, et 18 éprouvettes (14x14x56) avec trois types différentes ,dans chaque type trois pourcentages différents de fibre .

L'incorporation des fibres s'effectue par –apport à la masse total de constituants de béton.

Les mélanges de BAP ont été effectués selon les normes et les essais sur les béton autoplaçantsa l'état frais et durcis, suivant le protocole de la méthode japonaise.

Pour cela, le plan de travail que nous avons adapté est subdivisé en quatre parties :

-Partie I : caractéristiques des constituant.

-Partie II : études rhéologiques sur la pâte de ciment.

-Partie III : la formulation de BAP et BAPF.

- Partie IV : réparation d'un béton fissuré.

## ***V-Partie I : (caractéristiques des constituants)***

Dans cette partie, on va travailler sur la caractérisation des différents constituants entrant dans la composition de notre béton , et la caractérisation de chaque constituant.

### **V-1-Caractéristiques des constituants :**

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

#### **V- 1.1-Le Ciment :**

Le type de ciment choisi est un « CEM II - 42.5 » de MAFTAH de nom commercial GICA et dont les caractéristiques sont les suivantes :

##### **V- 1.1.A- Composition chimique :**

Eléments	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaOlibre	Ins	PAF
%	61,72	18,22	4,97	3,07	2,33	0,22	0,67	1,14	0,523	0,41	7,220

**Tableau V-1:**Composition chimique du ciment.

##### **V-1.1.B- Composition minéralogique :**

Eléments	C3S	C2S	C3A	C4AF	CaO <sub>L</sub>	Gypse	Calcaire
%	57	17	08	11	01	06	15

**Tableau V-2 :** Composition minéralogique du ciment.

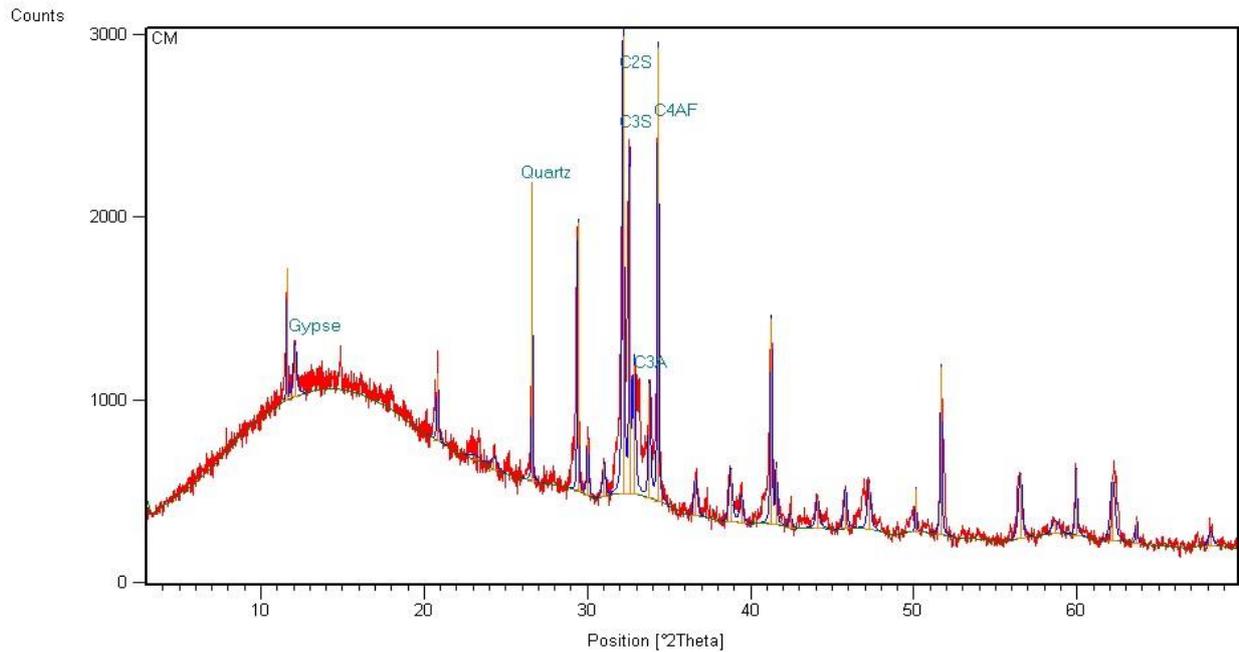


Figure V-1: Diffractogramme des RX de ciment

**V-1.1.C- Caractéristiques physiques :**

Caractéristiques	Les résultats		Unités	Norme
consistance normale	H <sub>2</sub> O	27,0	%	NF EN 196-3
Temps de prise	Début	200	min	NF EN 196-3
	Fin	290	min	NF EN 196-3
Masse spécifique	/	2.99	g/cm <sup>3</sup>	NF EN 196-5
La SSB	SSB	4227	cm <sup>2</sup> /g	NF EN 196-6
Stabilité volumique	/	0.5	mm	NF EN 196-3
Densité	/	2.92	g/cm <sup>3</sup>	NF EN 196-5

Tableau V-3: Caractéristiques physiques du ciment.

**V-1.1.D-Caractéristiques mécaniques :**

Echéance de jours	Flexion (MPa)	Compression (MPa)
2	4,1	17,5
7	6,3	38,1
28	7,7	52,1

**Tableau V-4:** Caractéristiques mécaniques du ciment.**V-1.2 - Le Gravier :****V-1.2.1-gravier (3/8) :****\*\_propriétés physiques :**

Le gravier (3/8) : le gravier utilisé dans notre travail provient de la carrière de sétif

Caractéristiques	Résultats	Unités
La densité	2.68	g/cm <sup>3</sup>
L'absorption d'eau	0.5	%
La masse volumique réelle	2.67	g/cm <sup>3</sup>
La masse volumique Imbibée	2.68	g/cm <sup>3</sup>
La teneur en eau	1.01	%
Micro Deval	14.4	%
Los Angles	25.52	%
La porosité	1.33	%

**Tableau V-5 :** Caractéristiques physiques de gravier (3/8) de SETIF.

**\*analyse granulométrique :**

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

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

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

**Tableau V-6 : Analyse granulométrique du gravier (3/8) de SETIF.**



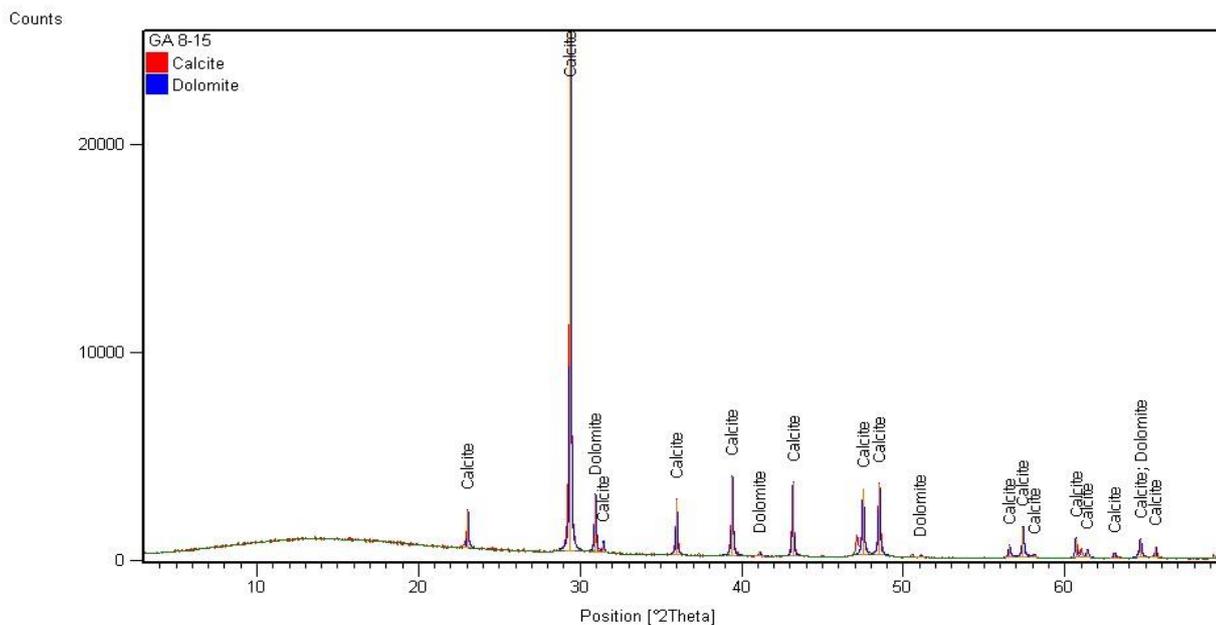
**\*analyse granulométrique :**

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

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

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

**Tableau V-8 :** Analyse granulométrique du gravier 8/15.

**\*Composition minéralogique :**

**Figure V-3:** Diffractogramme des RX de gravier (8/15).

**V-1.3-Le Sable :**

Les sables utilisés sont : sable grossier (S<sub>1</sub>) de BAGHLIA, et sable fin (S<sub>2</sub>) de BOUSAADA.

Après le traitement des deux sables, on a obtenu les résultats des essais physiques et l'analyse granulométrique suivants :

**V-1.3.1-Sable fin (S<sub>2</sub>):****\*\_propriétés physiques :**

<b>Caractéristiques</b>	<b>Résultats</b>	<b>Unités</b>
La masse spécifique	2.63	g/cm <sup>3</sup>
Equivalent de sable	28.8	%
Bleu de méthylène	2.2	%
L'absorption d'eau	0.72	%
La masse volumique Imbibé	2.63	g/cm <sup>3</sup>
La masse volumique réelle	2.61	g/cm <sup>3</sup>
La teneur en eau	1.57	%

**Tableau V-9:** Caractéristiques physiques de sable fin

\*analyse granulométrique :

Tamis Ouverture (mm)	Masse des refus cumulés Ri (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamis cumulés (%)	Modul e de finesse
6,3	/	0,0	100,0	<b>Mf=1.10</b>
5	/	0,0	100,0	
4	/	0,0	100,0	
3,15	0	0,0	100,0	
2,5	1	0,1	99,9	
2	1	0,1	99,9	
1,25	1	0,1	99,9	
1	1	0,1	99,9	
0,63	3	0,3	99,7	
0,5	8	0,7	99,3	
0,315	85	7,8	92,2	
0,25	207	19,1	80,9	
0,125	969	89,5	10,5	
0,08	1044	96,4	3,6	
0,063	1053	97,2	2,8	
<b>Fond de tamis</b>	1055	97,4	2,6	

**Tableau V-10:** Analyse granulométrique par tamisage (NF EN 933-1) .

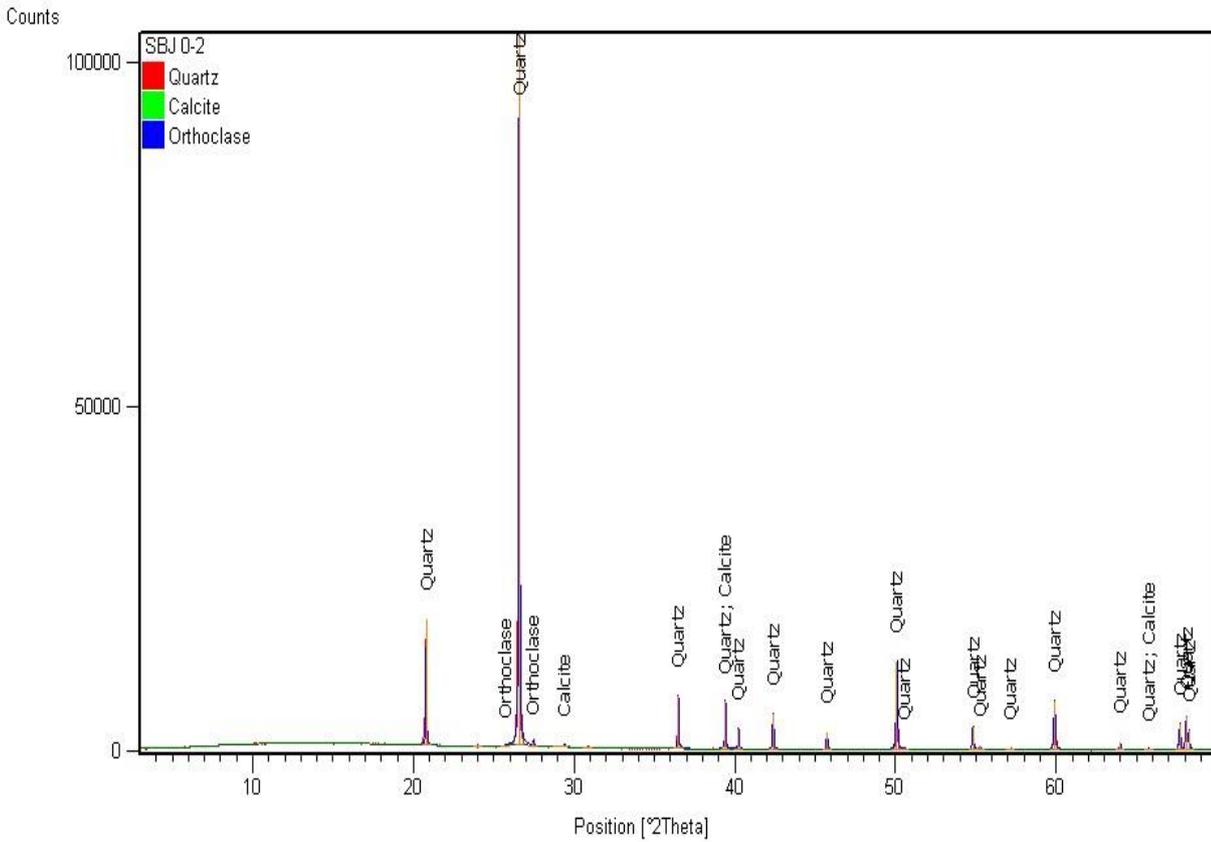
L'analyse de granulométrie montre que le module de finesse du sable gros (S1) est  $Mf_1=3.73$ , qui nécessite une correction à cause de sa grosseur. Pour la correction on utilise le sable fin (S2) avec un  $Mf_2 = 1.10$

\*Composition chimique :

Eléments	PAF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
%	3.96	42.17	10.44	4.34	32.58	3.71	1.44	0.80	0.05	0.35	0.16

**Tableau V-11:**Composition chimique de sable fin.

**\*Composition minéralogique :**



**Figure V-4:** Diffractogramme des RX de sable fin.

**V-1.3.2-Sable grossier (S<sub>1</sub>):**

**\* propriétés physiques :**

Caractéristiques	Résultats	Unités
La masse spécifique	2.71	g /cm <sup>3</sup>
Equivalent de sable	63	%
Bleu de méthylène	1.7	%
L'absorption d'eau	1.1	%
La masse volumique réelle	2.56	g/cm <sup>3</sup>
La masse volumique Imbibé	2.59	g/cm <sup>3</sup>
La teneur en eau	4.75	%

**Tableau V-12:** Caractéristiques physiques de sable de BAGHLIA

\*analyse granulométrique :

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés Ri (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisats cumulés (%)	Module de finesse
10	0	/	/	Mf= 3.73
8	77	/	/	
6,3	165	11,5	88,5	
5	231	16,1	83,9	
4	333	23,3	76,7	
3,15	396	27,7	72,3	
2,5	485	33,9	66,1	
2	555	38,8	61,2	
1,25	747	52,2	47,8	
1	806	56,3	43,7	
0,63	1000	69,8	30,2	
0,5	1066	74,4	25,6	
0,315	1201	83,9	16,1	
0,25	1246	87,0	13,0	
0,125	1340	93,6	6,4	
0,08	1363	95,2	4,8	
0,063	1367	95,5	4,5	
<b>Fond de tamis</b>	1367	95,5	4,5	

Tableau V-13 : Analyse granulométrique du sable grossier.

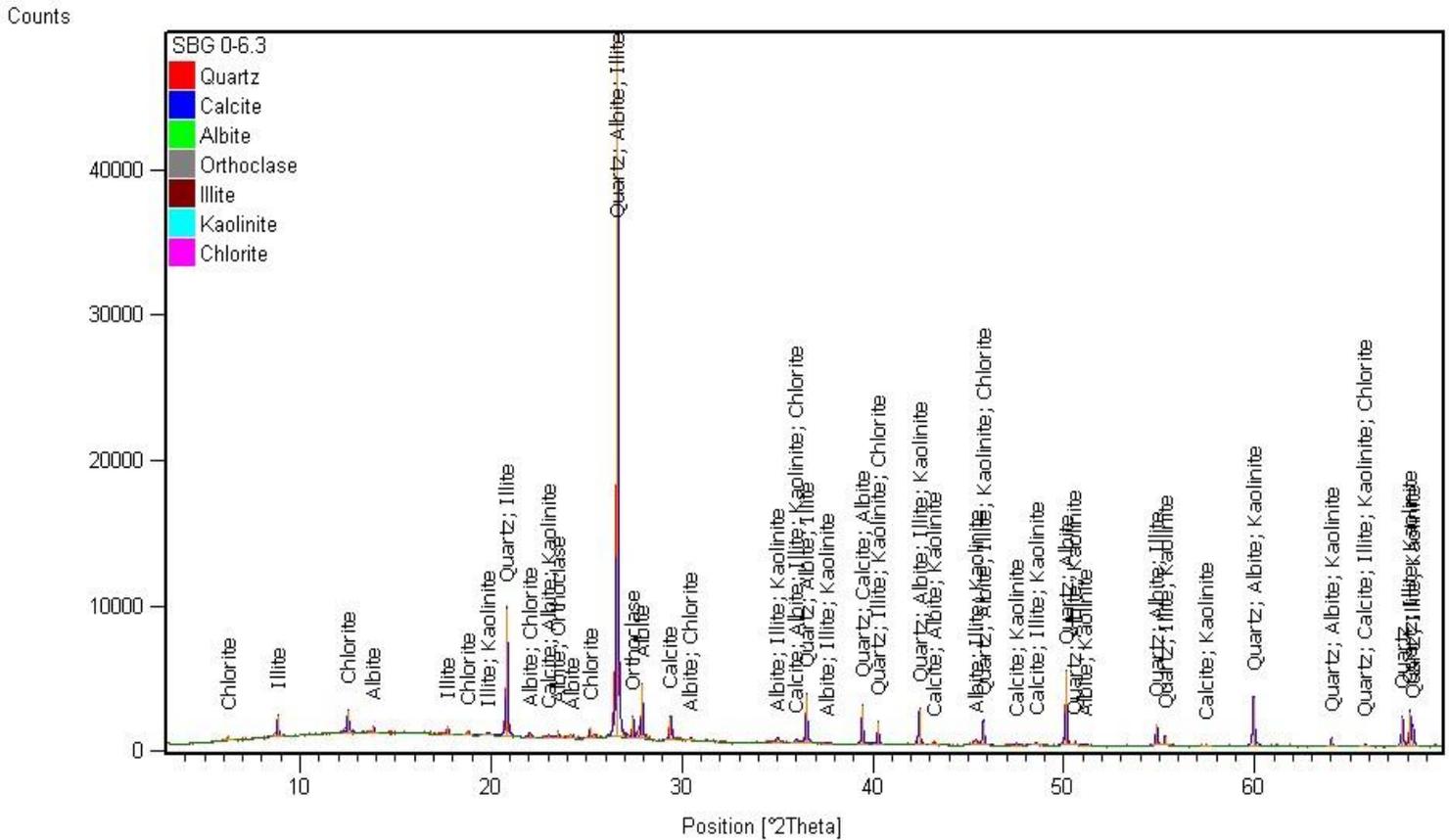
\*Composition chimique :

Eléments	PAF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
%	4.48	74.10	9.43	3.83	3.77	0.48	1.92	1.25	0.18	0.49	0.07

Tableau V-14:Composition chimique de sable gros.

**\*Composition minéralogique :**

V



**Figure V-5:** Diffractogramme des RX de sable gros.

**V-1.3.3-La correction du sable selon ABRAMS :**

La correction du sable 0/63 s’effectue par le sable de dune (BOUSSAADA) qui a un module de finesse très petit 1.10. Pour cela, la correction est faite selon la méthode d'ABRAMS.

Module de finesse désiré : **2,5**

$$S_1 = \frac{Mf_x - Mf_2}{Mf_1 - Mf_2} \times 100 \rightarrow S_1 = \frac{2,5 - 1.10}{3,73 - 1.10} = 53.2\%$$

$$S_2 = \frac{Mf_1 - Mf_x}{Mf_1 - Mf_2} \times 100 \rightarrow S_2 = \frac{3,73 - 2,50}{3,73 - 1.10} = 46.8 \%$$

% S1 = 53.2      sable gros

% S2= 46.8      sable fin

➤ **Analyse granulométrique du sable corrigé :**

<b>Tamis ouverture (mm)</b>	<b>Tamisat</b>
0,063	3,701
0,08	4,236
0,125	8,327
0,16	44,913
0,25	51,867
0,315	60,239
0,5	62,865
0,63	70,114
1	72,334
1,25	79,436
2	82,033
2,5	85,319
3,15	87,651
4	91,467
5	93,905
6,3	97,138
8	100

**Tableau V-15** :Analyse granulométrique du sable correcteur.**\*interprétation :**

D'après les résultats obtenus sur le sable corrigé par l'analyse granulométrique, on peut dire qu'il répond aux exigences de la norme pour qu'il soit utilisé dans notre formulation.

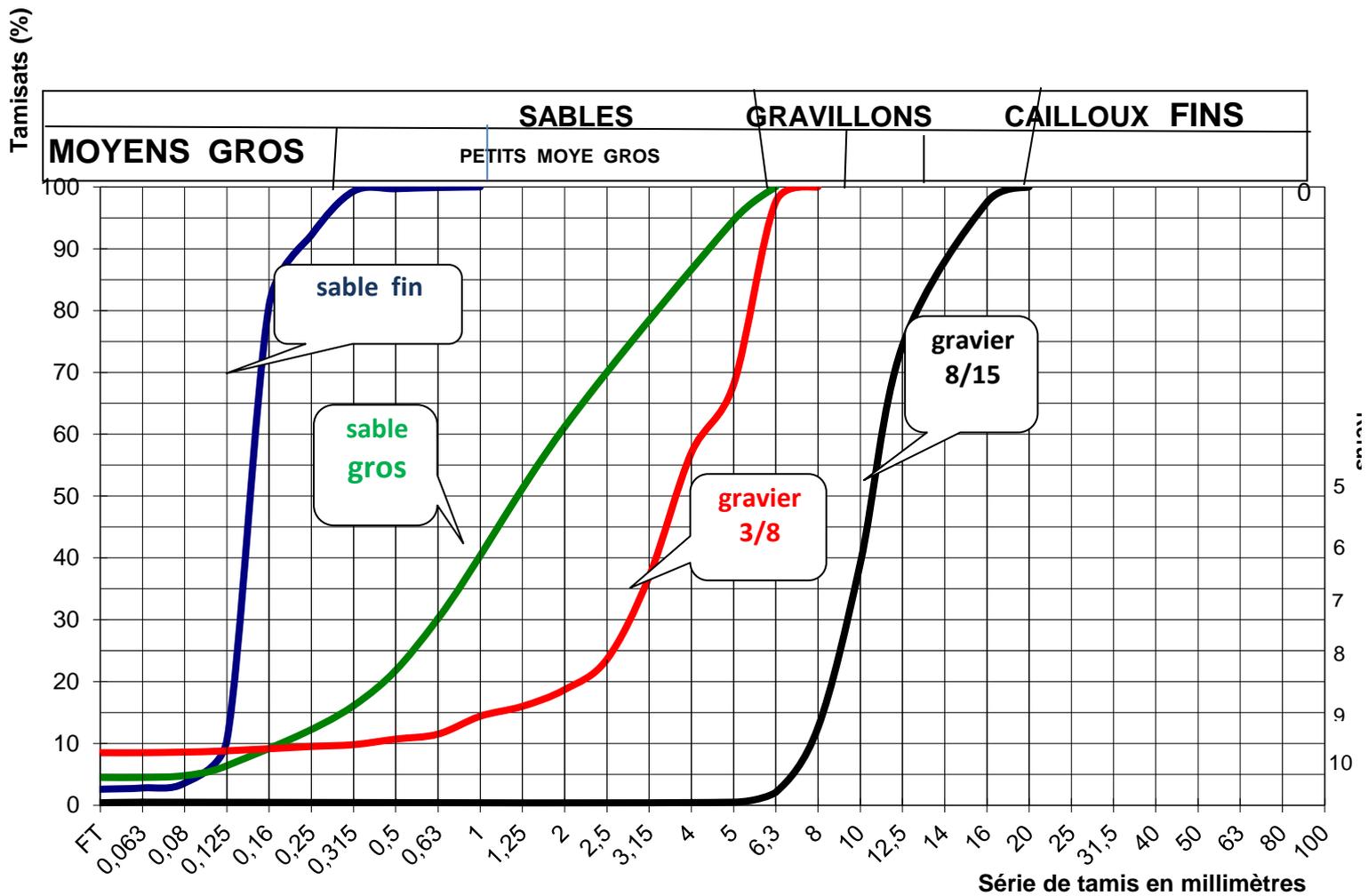


Figure V-6: Graphe de l'analyse granulométrique des granulats.

#### V-1.4-L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour le gâchage de béton est un eau potable (de robinet), CETIM Boumerdes.

#### V-1.5-L'Adjuvant (tempo 12):

Tempo12 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

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

##### a) Description :

SIKA VISCOCRETE Tempo 12 : Superplastifiant haut réducteur d'eau conforme à la norme NF EN 934-2 (d'après SIKA EL-DJAZAIR, c'est un adjuvant à base de copolymère acrylique).

SIKA VISCOCRETE Tempo 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau de nouvelle génération non chloré. Il est conçu à base de copolymère acrylique qui améliore considérablement les propriétés des bétons. Le SIKA VISCOCRETE Tempo 12 permet

d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant.

**b) Caractéristiques :**

- Forme ..... Liquide
- Couleur ..... Brun clair
- pH .....  $6,0 \pm 1$
- Densité .....  $1,06 \pm 0,01$
- Teneur en  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{éq}}$  .....  $\leq 1\%$
- Extrait sec.....  $30,2 \pm 1,3$

**c) Propriétés et effets :**

Les superplastifiants **SIKA VISCOCRETE Tempo 12** permet:

**Sur béton frais :**

- L'obtention d'un E/C très faible ;
- l'amélioration considérable de la fluidité ;
- une très bonne maniabilité ;
- un long maintien de l'ouvrabilité (>2h);
- d'éviter la ségrégation ;
- de faciliter la mise en œuvre du béton ;
- améliore la stabilité du béton.

**Sur béton durci :**

- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme ;
- de diminuer la porosité ;
- d'augmenter la durabilité ;
- de diminuer le retrait et le risque de fissuration ;
- d'obtenir un meilleur parement.

**d) Domaines d'application :**

- Bétons à hautes performances ;
- Bétons autoplaçants ;
- Bétons pompés ;
- Bétons précontraints ;
- Bétons architecturaux.

**e) Dosage :**

- Plage de dosage recommandée : 0,2 à 3,0 % du poids de ciment.
- Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction de type du béton et des effets recherchés.

**f) Mode d'emploi :**

SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est introduit dans l'eau de gâchage. Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

**1.6-les ajouts :**

on a utilisé la fumée de silice comme ajout cimentaire dans notre travaille.

**\*caractéristiques physiques :**

Caractéristiques	Résultats
Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> )	2.20
Surface spécifique (cm <sup>2</sup> /g)	2780

**Tableau V-16:** Caractéristiques physiques de fumée silice.

**\*Composition chimique:**

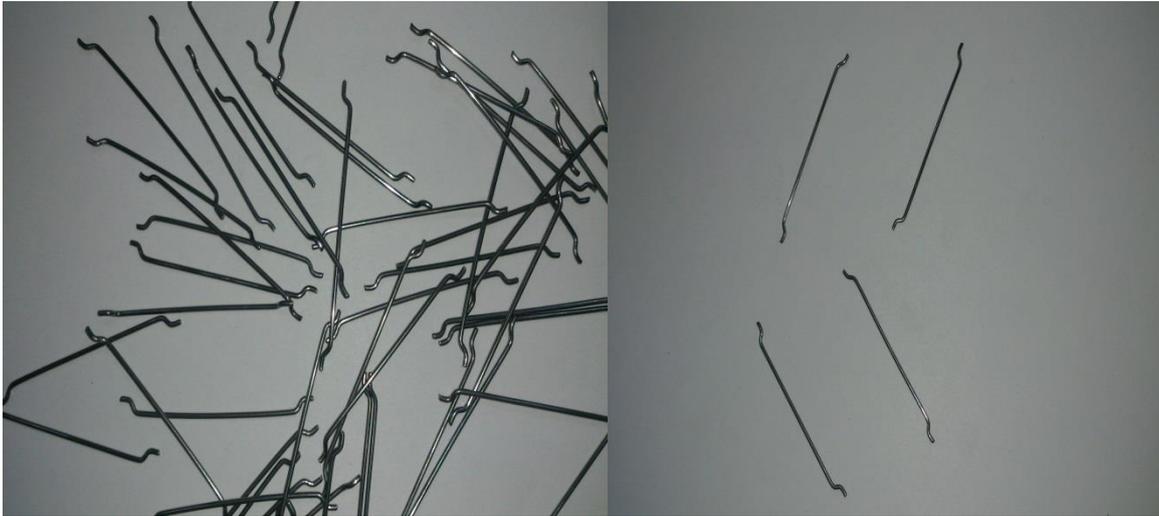
Eléments	PAF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
%	2,3	93,27	0,52	0,92	1,29	0,51	1,31	0,76	0,08

**Tableau V-17:** Composition chimique de fumée silice

**V-1.7-les fibres :****V-1.7.1 :les fibres métalliques a crochet :**

La fibre à crochet est présente sur le marché depuis plus de 25 ans. Elle est probablement la fibre la plus populaire dans l'histoire du béton renforcé de fibres. Ce succès est du au fait que la plupart des producteurs de fibres propose cette forme dans sa gamme de produit.

La forme à crochets garantit une excellente ouvrabilité jusqu'à un élanement de 60. Au-delà et jusqu'à un élanement de 80, l'ouvrabilité reste toujours satisfaisante.



**FigureV-7:** les fibres métalliques crochet

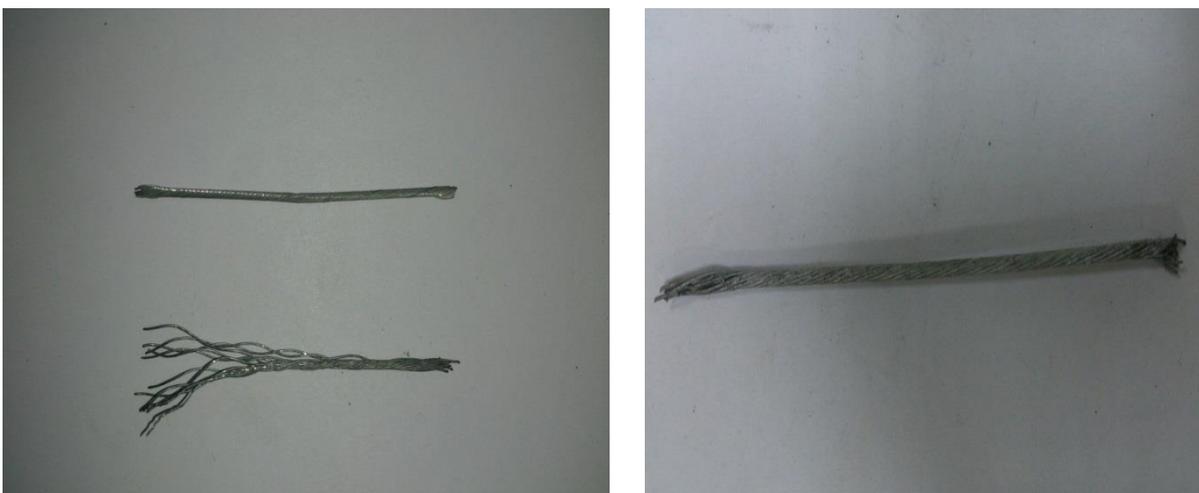
En résumé ses caractéristiques géométriques et physiques dans le tableau suivant :

Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Masse (g)	R.traction (MPa)
35 a 60	0,55 a 1,00	0,3	1100 à 1900

**TableauV-18 :** caractéristiques des fibres métalliques (crochet)

### **1.7.2 :les fibres de récupération :**

Les fibres utilisée sont locale et proviennent de la récupération, elles sont issue de déchet des câbles de freinage, accélérateurs des vélos et de motocycliste elles ont une forme géométrique droit, un câble constituée de plusieurs câbles fins ondulée.



**Figure V-8 :** les fibres métalliques de récupération

En résumé ses caractéristiques géométriques et physiques dans le tableau suivant :

Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Masse (g)	R.traction (MPa)
45 à 50	1 à 2	0,40 à 0.50	11000

**Tableau V-19:** caractéristiques des fibres de récupération

### **V-1.7.3 :les fibres de verre :**

La fibre de verre trouve des applications en renforcement, isolation et optique. La première application est de loin la plus importante : la fibre de verre est alors utilisée pour renforcer les bétons.



**Figure V-9 :** les fibres de verre

En résumé ses caractéristiques géométriques et physiques dans le tableau suivant :

Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Masse (g)	R.traction (MPa)
45 à 55	≤1	(Négligeable pour une fibre)	2000-4000

**Tableau V-20 :** caractéristiques des fibres de verre

## **V-Partie II : (études rhéologiques sur la pâte de ciment)**

Cette partie est consacrée à l'étude de point de saturation de pâte cimentaire en super plastifiant, et voir l'influence des polycarboxylates sur le comportement rhéologique.

Pour comprendre les propriétés rhéologiques des pâtes cimentaires. Les essais de rhéologie ont été réalisés au laboratoire URMPE à l'aide d'un viscosimètre (VT550).

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

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

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

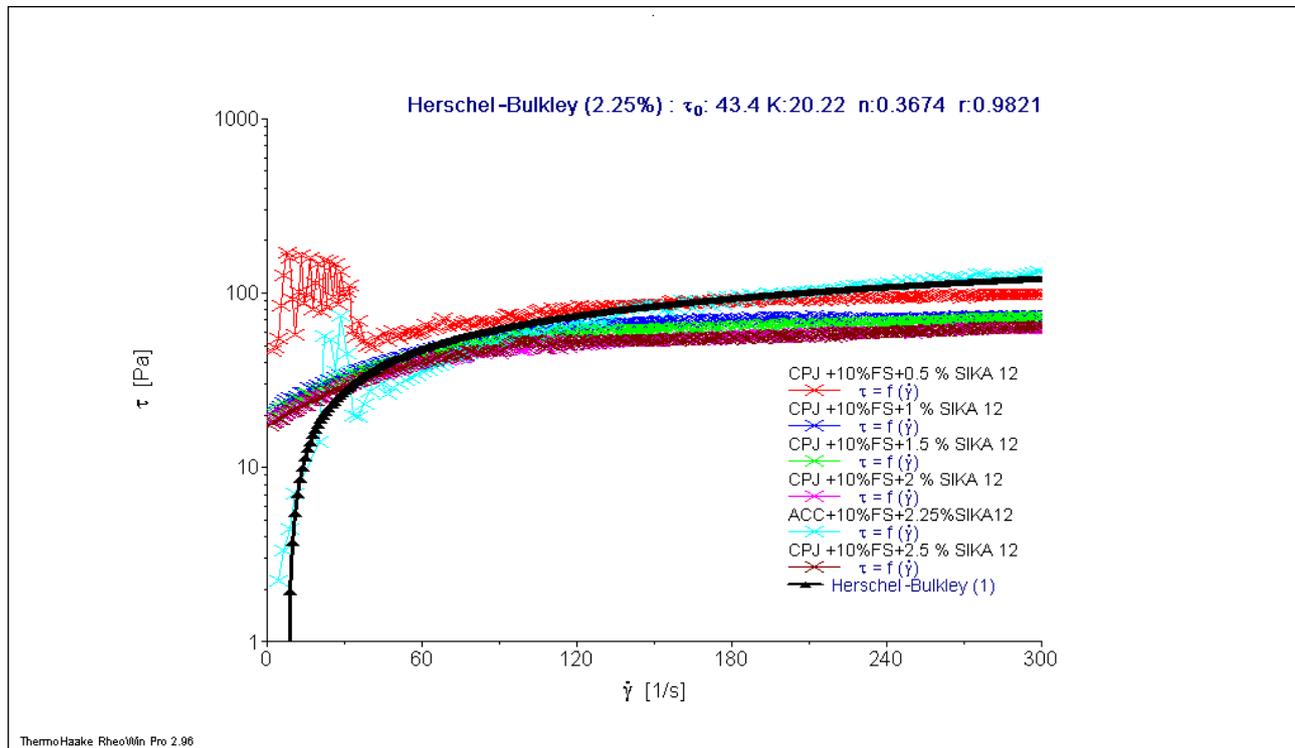
### **V-II .1 : La composition des pâtes utilisées :**

On a choisi le rapport :  $E/C+F=0.38$ .

Constituent de la Pâte :

- Ciment (90g).
- Fumée silice (10g).
- Eau (38ml)  $E/C+F=0.38$ .
- Tempo 12 de 0.5 jusqu'au point de saturation.

## V-II .1.A : L'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement des pâtes cimentaires :

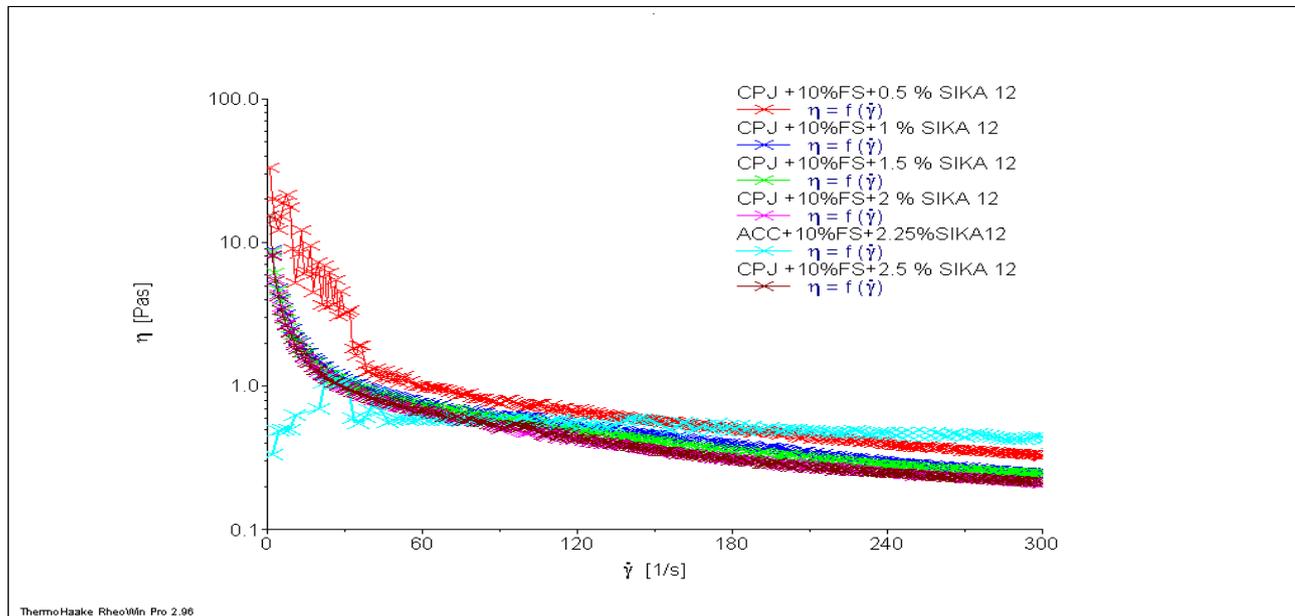


**Figure V-10:**Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (CPJ+10% fumée silice + Tempo 12).

### -Interprétation :

La figure(V-10) représente l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement, on remarque que la contrainte de cisaillement diminue avec l'augmentation de dosage en superplastifiant, ce qui veut dire que la suspension devient plus fluide et plus coulable et l'écoulement se rapproche de l'écoulement newtonien ceci est dû à l'effet dispersant du superplastifiant qui s'adsorbe sur la surface des grains du ciment et par la suite neutralise les différentes charges de particules et donnent la même charge électrostatique à chaque grain du ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules. Il en résulte une dispersion des grains du ciment libère l'eau qui est disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la fluidité de la pâte du ciment.

## V-II .1.B : L'évolution de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement des pâtes cimentaires :



**Figure V-11:**Évolution de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement (CPJ+10% fumée silice + Tempo 12).

### -Interprétation :

La figure V-11 représente l'évolution de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement, où on peut remarquer que le superplastifiant influence sensiblement sur la viscosité des pâtes cimentaires, et que plus le pourcentage en superplastifiant augmente plus la viscosité de la pâte diminue, le superplastifiant réduit ou élimine carrément l'adhésion entre les particules voisines (agglomération).

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

- Le point de saturation de CPJ et tempo 12 est de 2%

## **V-Partie III : (la formulation de BAP et BAPF)**

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

**\*La formulation du BAP par la méthode japonaise :**

### **V-III.1-La méthode de calcul :**

#### **a- Des données :**

Les intervalles pour chaque constituant donnés par cette méthode sont :

- Volume de gravillons est limité en fonction de  $G/S=0.9$  (proche de 1)
- Volume de la pâte est : 330 à 430  $\text{kg/m}^3$ .
- La masse de ciment :  $M_c = 350$  à 450  $\text{kg/m}^3$
- La masse de fine  $M=10\%$  de la masse de ciment.
- Le dosage de superplastifiant est proche de son dosage de saturation : 2% du poids de ciment
- On choisit le rapport  $G/S=0.9$  ;
- On fixe  $E/C+F=0.38$ . Le dosage en superplastifiant est donné selon l'essai de la rhéologie (point de saturation), (en vise l'étalement 650 à 750 mm ).

#### **b- Optimisation de la composition du BAP :**

- Volume de la pâte pour 1 $\text{m}^3$  du BAP : 343,85 $\text{l/m}^3$ .
- 430  $\text{kg/m}^3$  du ciment.
- 43  $\text{kg/m}^3$  d'ajout (fumée silice)
- $E/(C+F)=0.38$ .
- $G/S=0.9$ .
- $S.p = (1,5 \text{ à } 2)\%$

#### **c- Détermination de la masse de chaque constituant :**

- $C=430\text{kg/m}^3$ .

- $F=43 \text{ kg/m}^3$ .

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

Donc :  $E=0.38*(430+43) \longrightarrow E=179,74 \text{ l/m}^3$ .

- $S.p = (2\% \times 430) / 100 = 8,6 \text{ kg/m}^3$

- Volume de la pâte =:  $343,85 \text{ l/m}^3$ .

- Volume de granulats secs =  $656 \text{ l/m}^3$

- $G/S=0.9 \longrightarrow G=656-S$

$$G+S=656 \text{ l/m}^3 \longrightarrow G=656-S$$

$$S=656 / (1+ 0,9) \longrightarrow S=660(0,9+1)=8$$

$$G=656-345,26 \text{ l/m}^3 \longrightarrow G=310,74 \text{ l/m}^3$$

$\% S_1= 53,2$  sable gros

$\% S_2 = 46,8$  sable fin

Le dosage en superplastifiant est de 2% de la masse de liant (C+F) pour (fumée silice)

**d- Les masses des constituants pour 1 m<sup>3</sup> :**

- Eau =  $173,12 \text{ l/m}^3$

- Ciment =  $430 \text{ Kg/m}^3$

- Fines =  $43 \text{ Kg/m}^3$

- **Gravier :**

Volume= $310.74 \text{ l/m}^3$

Masse = $842.10 \text{ Kg/m}^3$

$$G3/8 = 2/3 = 561.4 \text{ Kg/m}^3$$

$$G8/15 = 1/3 = 280.7 \text{ Kg/m}^3$$

- **Sable:**

Volume= $345.26 \text{ l/m}^3$

Masse= $939.72 \text{ Kg/m}^3$

$\% S1 = 53.2$  sable gros= $499.93$

$\% S2 = 46.8$  sable fin= $439.78$

- Superplastifiant=4.5 kg/m<sup>3</sup>

### V-III.2 : Composition d'un mètre cube du BAP par la méthode japonaise

Constituants	Quantité	Unité
Ciment	430	Kg/m <sup>3</sup>
Fine (fumée silice)	43	Kg/m <sup>3</sup>
Sable F	439.78	Kg/m <sup>3</sup>
Sable G	499.93	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 3/8	561.4	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 8/15	280.7	Kg/m <sup>3</sup>
Eau	173,12	Kg/m <sup>3</sup>
Superplastifiant	9,46	Kg/m <sup>3</sup>

**Tableau V-21** :Composition d'un mètre cube du BAP témoin par la méthode japonaise

### V-III.2 \*:caractérisation du BAP témoin a l'état frais et l'état durci :

#### A- à l'état frais :

Gâchage 1	Boit en L (%)	Stabilité au tamis (%)	Etalement (mm)	E/L
BAP témoin	94	11,12(6)	750	0,38

**Tableau V-22** : caractéristique rhéologique du BAP témoin.

#### **-Interprétation :**

D'après les résultats des essais sur le béton frais, on a confirmé que les bétons autoplacants formulés par la méthode japonaise ont des meilleures caractéristiques a l'état frais et une bonne mise en place du béton sans vibration et sans ségrégation.



Pour une éprouvette de 11L

$$36.56 \text{ Kg/m}^3 \longrightarrow 1000\text{L}$$

$$X \text{ kg/m}^3 \longrightarrow 11\text{L} \quad X = 0,402 \text{ kg/m}^3$$

→ pour 2%:

$$2437.39 \text{ Kg/m}^3 \longrightarrow 100 \%$$

$$48.74 \text{ Kg/m}^3 \longrightarrow 2\%$$

Pour une éprouvette de 11L

$$48.74 \text{ Kg/m}^3 \longrightarrow 1000\text{L}$$

$$X \text{ kg/m}^3 \longrightarrow 11\text{L} \quad X = 0,536 \text{ kg/m}^3$$

### **V-III.3-2 : composition d'un BAP renforcé avec 1% de fibre métallique (crochet) et (déchet métallique)**

Constituent		Masse Kg / m <sup>3</sup>
Ciment		430
Eau		173,12
Fumée de silice		43
Superplastifiant		9,46
Sable	Fin	134,67
	Gros	736,13
graviers	3 /8	540 ,33
	8/15	277,5
Fibre	M	2,25
	R	2,25

**Tableau V-24** : composition d'un 1m<sup>3</sup> BAPF (1%)

**A- à l'état frais :**

Gâchages 2 & 3	Boite en L (%)	Stabilité au tamis (%)	Etalement (mm)	E /L
BAPF (métallique crochet)	90	9,16(5,,)	748	0,38
BAPF (récupéré)	93	9,04(5,)	741	0,38

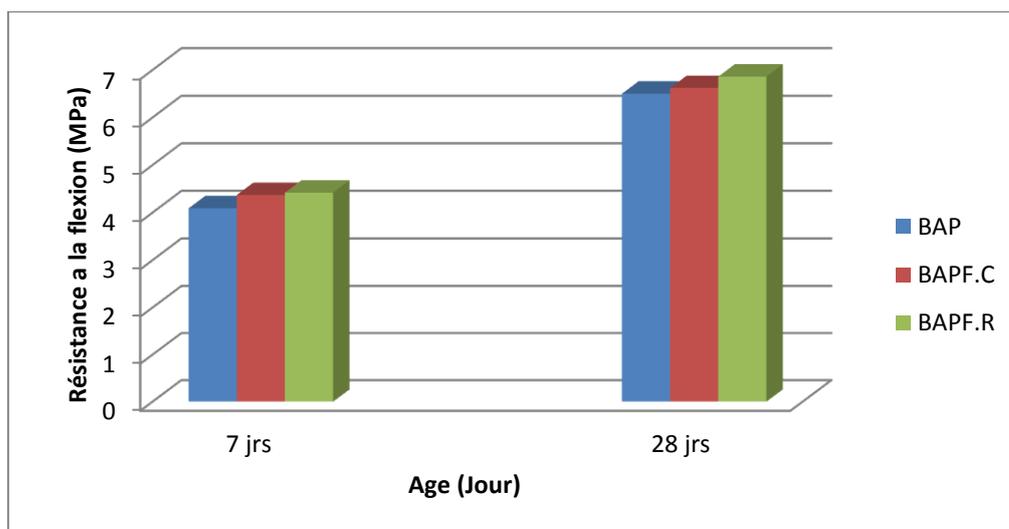
**Tableau V-25** : caractéristiques rhéologique du BAPF (1%)**\*Interprétation :**

D'après les résultats des essais sur le béton frais, en remarque une légère diminution des caractéristiques rhéologiques du béton fibré (1%) par rapport au béton témoin mais ces résultats de ce BAPF reste toujours conformes aux exigences de l'AFGC (association française de génie civil).

Il est noté aussi que les caractéristiques a l'état frais de BAPF (métallique) nettement faible par rapport aux BAPF (récupéré) celui qui explique l'influence de ces types de fibres sur le comportement rhéologique de béton autoplaçant.

**B-à l'état durci :**

Gâchages2&3	Résistance à la flexion (MPa)	
	7j	28j
BAPF (métallique)	4,37	6,62
BAPF (récupéré)	4,42	6,86

**Tableau V-26** : caractéristique mécanique de BAPF (1%)**Figure V-12** : représentation des résultats à l'état durci pour BAP et BAPF (crochet et récupéré) a 1%

**\*Interprétation :**

D'après les résultats ci-dessus nous remarquons à 7 jours que les BAPF(crochet et récupéré) ont presque la même résistance qui est supérieure à celle de BAP témoin, et à 28 jours le BAPF récupéré a la plus grande valeur (6,86 MPa) après le BAPF(crochet) qui égale (6,62 MPa), et (6,5 MPa) pour la BAP témoin.

Donc il y a une augmentation de la résistance à la flexion pour les BAPF par rapport au BAP témoin à cause de l'incorporation des fibres

**V-III-4-1 :composition d'un BAP renforcé avec 1,5% de fibre métallique (crochet) et (déchet métallique) :**

Constituent		Masse (Kg)
Ciment		430
Eau		173,12
Fumée de silice		43
Superplastifiant		9,46
Sable	F	134,67
	G	736,13
graviers	3 /8	540 ,33
	8 /15	277,5
Fibres	M	4,5
	R	4,5

**Tableau V-27** :\_composition d'un BAP renforcé avec 1,5% de fibre métallique (crochet) et (déchet métallique)\_

**A- à l'état frais :**

Gâchages 4&5	Boite en L (%)	Stabilité au tamis (%)	Etalement (mm)	E /C
BAPF (métallique vrocket)	88	7,7(5 ,)	735	0,38
BAPF (récupéré)	88	8(5,)	731	0,38

**Tableau V-28** : caractéristiques rhéologique BAPF a (1,5%)

**\*Interprétation :**

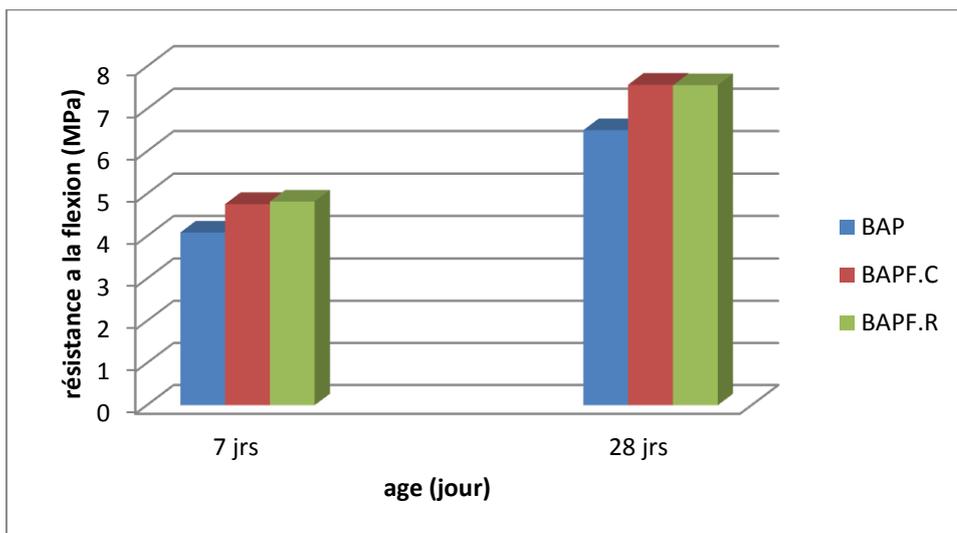
On remarque une diminution des caractéristiques rhéologiques du béton fibré (1,5%) par rapport au béton témoin, mais ces résultats de ces deux types de BAPF restent toujours conformes aux exigences de l'AFGC (association française de génie civil).

Il est noté aussi que les caractéristiques à l'état frais de BAPF (récupéré) donne.....résultat que les BAPF(métallique), ça explique l'influence de ces types de fibres sur le comportement rhéologique des bétons autoplaçants.

**B-à l'état durci :**

Gâchages 4&5	Résistance à la flexion (MPa)	
	7j	28j
BAPF (métallique)	4,76	7,57
BAPF (récupéré)	4,82	7,56

**Tableau V-29:** caractéristique mécanique de BAPF (1,5%)



**Figure V-13 :** représentation des résultats à l'état durci pour BAP et BAPF (crochet et récupéré) à 1,5%

**Interprétation :**

On remarque les résistances de flexion augmentent proportionnellement avec le dosage en fibres, les essais effectués avec les fibres de récupération donnent des bon résistances (7,56 MPa), pour 1,5% de fibres, les BAP avec fibres métallique normalisé (sous forme de crochet) atteignent (7,57 MPa), ce dernier montre que le dosage de fibre influent positivement sur la résistance mécanique à la traction par flexion.

**V-III.4-2 : composition d'un BAP renforcé avec 2 % de fibre métallique (crochet) et (déchet métallique) :**

Constituents		Masse Kg / m <sup>3</sup>
Ciment		430
Eau		173,12
Fumée de silice		43
Superplastifiant		9,46
Fibre		6,75
Sable	F	134,67
	G	736,13
graviers	3/8	540,33
	8/15	277,5

**Tableau V-30** : composition de 1m3 de BAPF 2%

**A- à l'état frais :**

Gâchages 6&7	Boite en L (%)	Stabilité au tamis (%)	Etalement (mm)	E /L
BAPF (métallique crochet)	bloqué	4,5(5,)	655	0,38
BAPF (récupéré)	bloqué	4,70(5,)	648	0,38

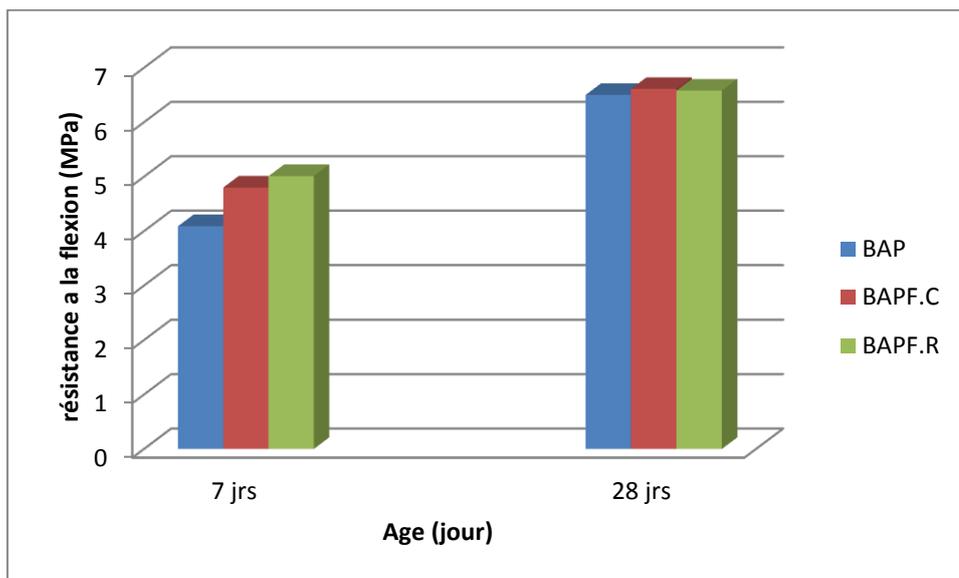
**Tableau V-31** : caractéristique rhéologique BAPF (2%)

**\*Interprétation :**

D'après le tableau ci-dessus, il y a une diminution remarquable sur les caractéristiques rhéologiques de BAPF (2%) qui donne un blocage de la boite en L, ce béton présente une mauvaise caractéristique rhéologique dû à la consommation de la pates par les fibres .

**B- à l'état durci :**

Gâchages6&7	Résistance à la flexion (MPa)	
	7j	28j
BAPF (métallique)	4,8	6,61
BAPF (récupéré)	5,01	6,58

**Tableau V-32** : caractéristique mécanique de BAPF (2%)**Figure V-14** : représentation des résultats à l'état durci pour BAP et BAPF (crochet et récupéré) a 2%**\*Interprétation**

Cette fois ci pour une teneur de 2% de fibres , nous avons remarquer que la résistance des BAPF est presque égale à celle de BAP témoin a l'Age de 28 jours, nous expliquons ca par :

- une mauvaise adhérence pate-fibres
- une rupture de l'adhérence agrégat pate.

**V-III.5- composition d'un BAP renforcé avec des fibres de verre :**

Constituent		Masse (Kg)
Ciment		430
Eau		173,12
Fumée de silice		43
Superplastifiant		9,46
fibres		4,5
Sable	F	439.78
	G	499.93
graviers	3 /8	561.4
	8 /15	280.7

**Tableau V-33** : composition d'un BAP renforcé avec des fibres de verre :**A- à l'état frais :**

Gâchages 8,9&10	Boite en L (%)	Stabilité au tamis (%)	Etallement (mm)	E /L
BAPF (verre) (pour 0,225% et 0,125%)	bloqué	/	/	0,38

**Tableau V-34** : caractéristique rhéologique BAPF de verre (0,225 et 0,125 %)**Interprétation :**

Pendant ces trois gâchages nous avons remarqué une perte total des propriétés rhéologique de béton.



Figure V-15 : béton obtenue 1



Figure V-15 : béton obtenue 2

**B- à l'état durci :**

Gâchages 8,9&10	BAPF verre		
	0,225%	0,125%	0,125%(h)
Résistance a la flexion (MPa) 28 jours	5,51	6,88	7,11

Tableau V-35 : caractéristique mécanique de BAPF verre

**\*La masse volumique :**

La masse volumique des bétons frais a été déterminée par la formule suivante :

$$Mv = M / V$$

(M : est la masse de l'éprouvette et V : son volume)

BAP témoin	BAPF. métallique (crochet)			BAPF. métallique (récupéré)		
	1%	1,5%	2%	1%	1,5%	2%
2,29	2,35	2,404	2,6	2,47	2,48	2,63

**Tableau V-36** : variation de la masse volumique des bétons a l'état frais

**-Interprétation :**

On constate une légère augmentation de la masse volumique des BAPF par rapport au BAPtémoin, cela est dû à l'incorporation des fibres métalliques. Les bétons contenant des fibres de récupération Représentent la masse volumique la plus grande.

**V-III .6 :Etude de déplacement de la flèche pendant la flexion :**

Dans cette partie, on a analysé l'influence de chaque type de fibre sur le déplacement de la flèche en fonction de forces exercées.

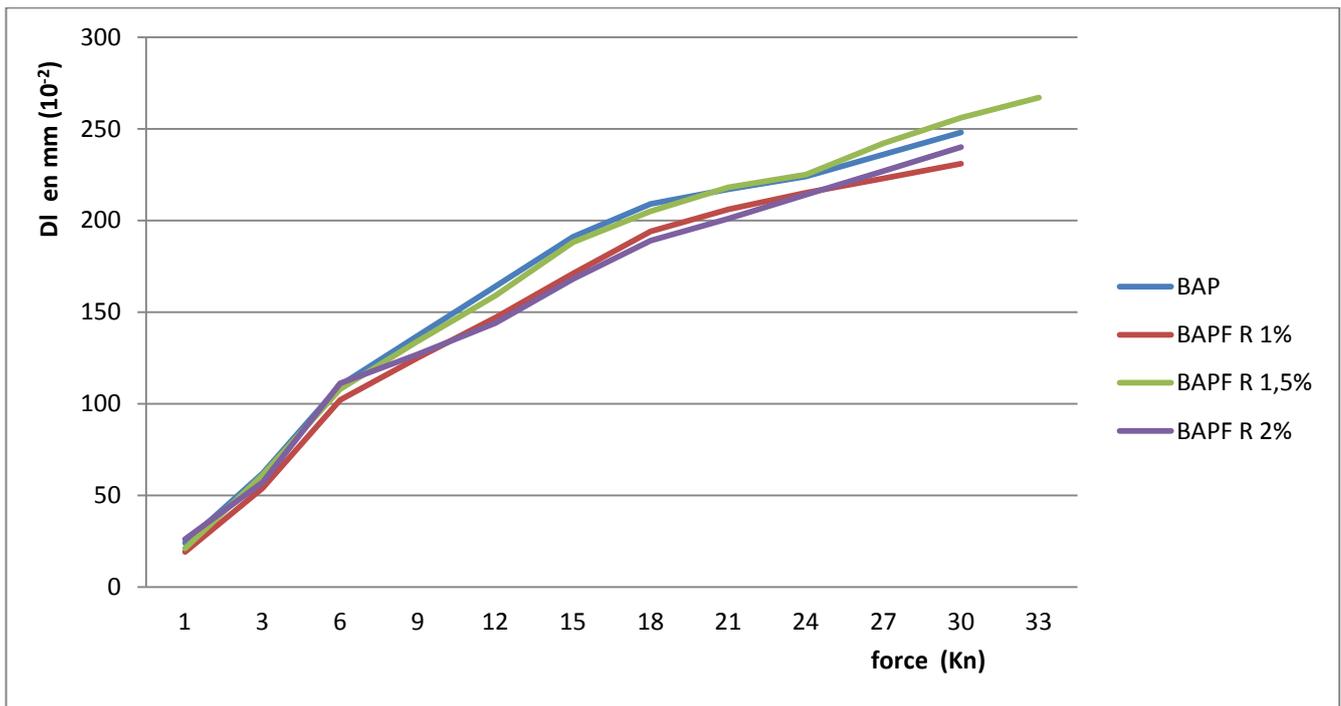


**Figure V-16:** le comparateur(mm 10<sup>-2</sup>)

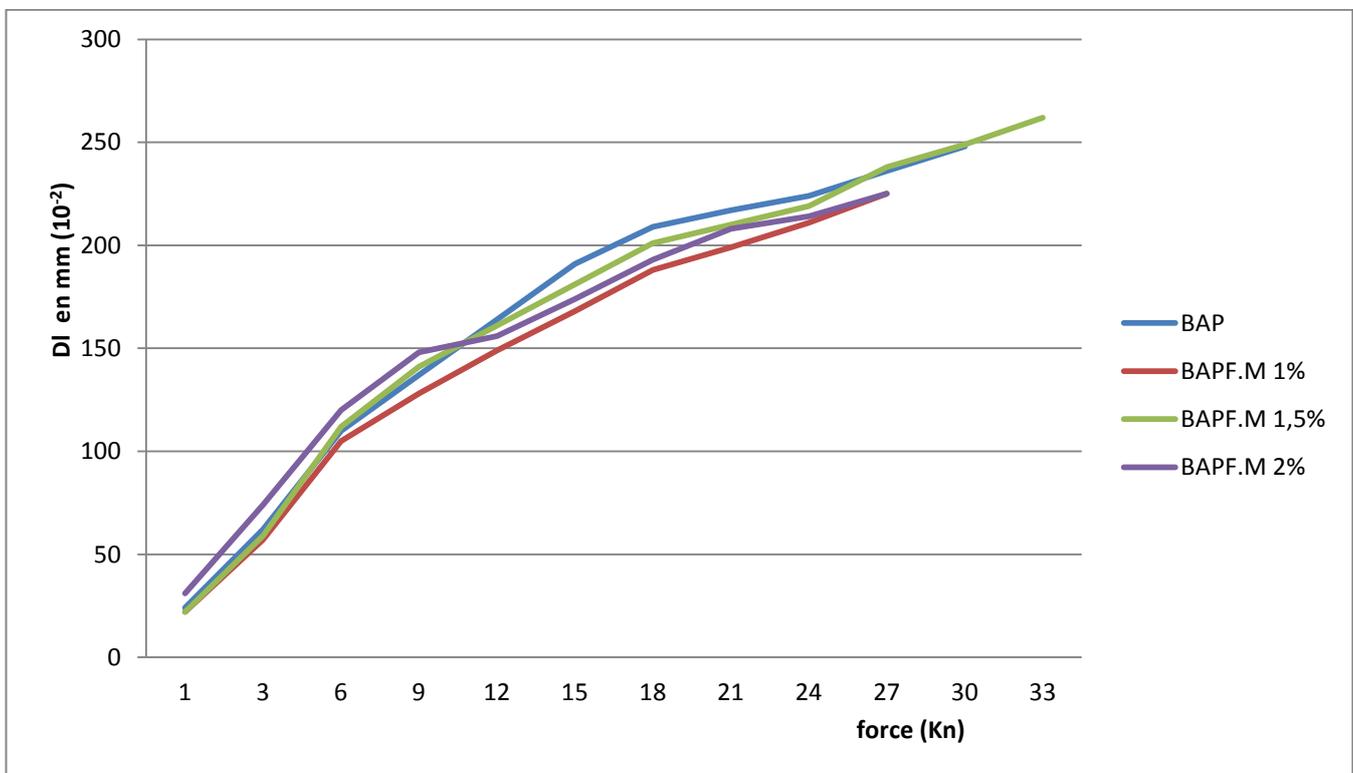
Force (Kn)	BAP témoin	BAPF.M (crochet)			BAPF.R(récupéré)		
		1%	1,5%	2%	1%	1,5%	2%
1	24	22	22	31	19	21	26
3	62	57	59	74	54	61	57
6	110	105	112	120	102	108	111
9	137	128	141	148	125	134	127
12	164	149	161	156	147	159	144
15	191	168	181	174	171	188	168
18	209	188	201	193	194	205	189
21	217	199	210	208	206	218	201
24	224	211	219	214	215	225	214
27	236	225	238	225	223	242	227
30	248	-	249	-	231	256	240
33	-	-	262	-	-	267	-

**Tableau V-37** : variation de déplacement de la flèche a l'âge de ( $10^{-2}$  mm)

**V-III .7 : la variation de déplacement en fonction de la teneur en fibre (a 28 jrs) :**

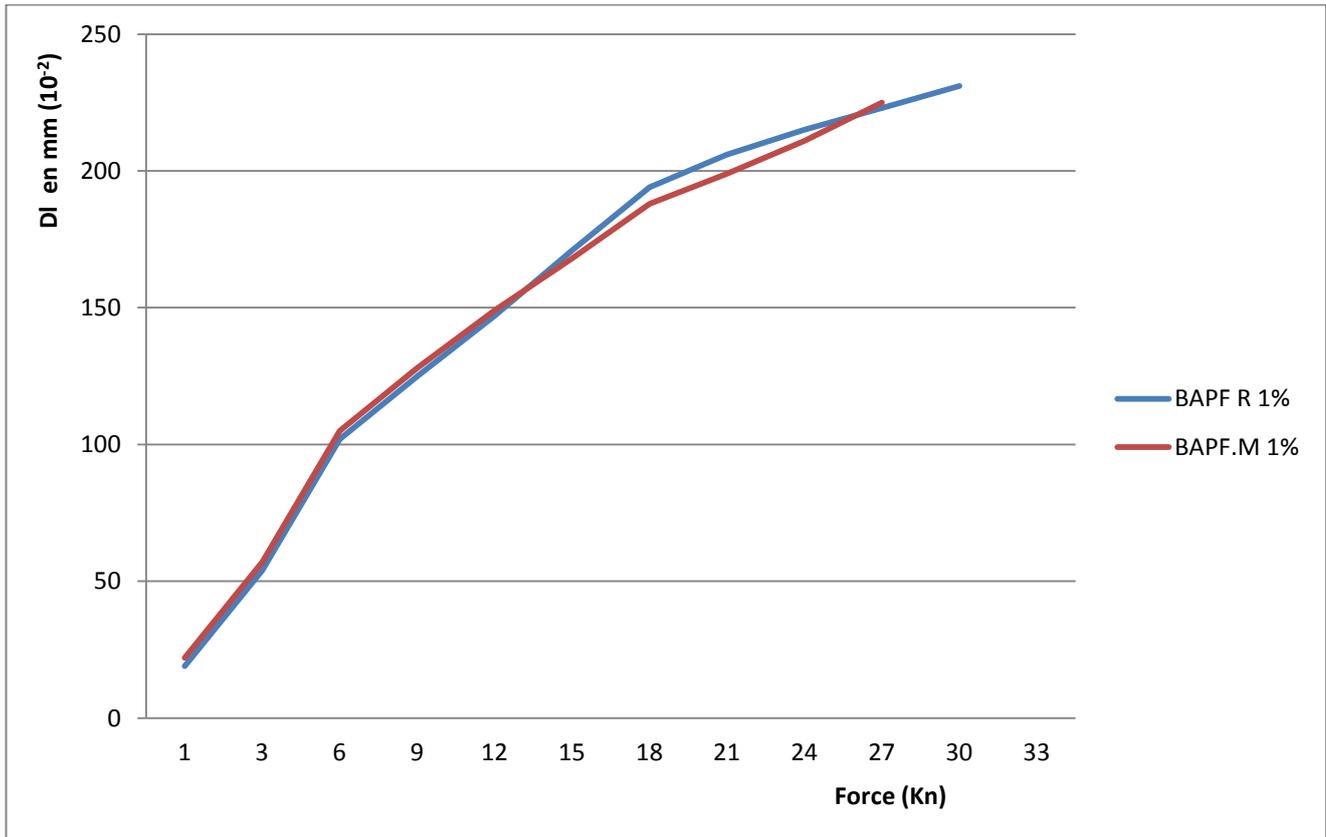


**Figure V-17** : variation de déplacement de la flèche a l'âge de 28 jours pour les fibres métalliques récupéré

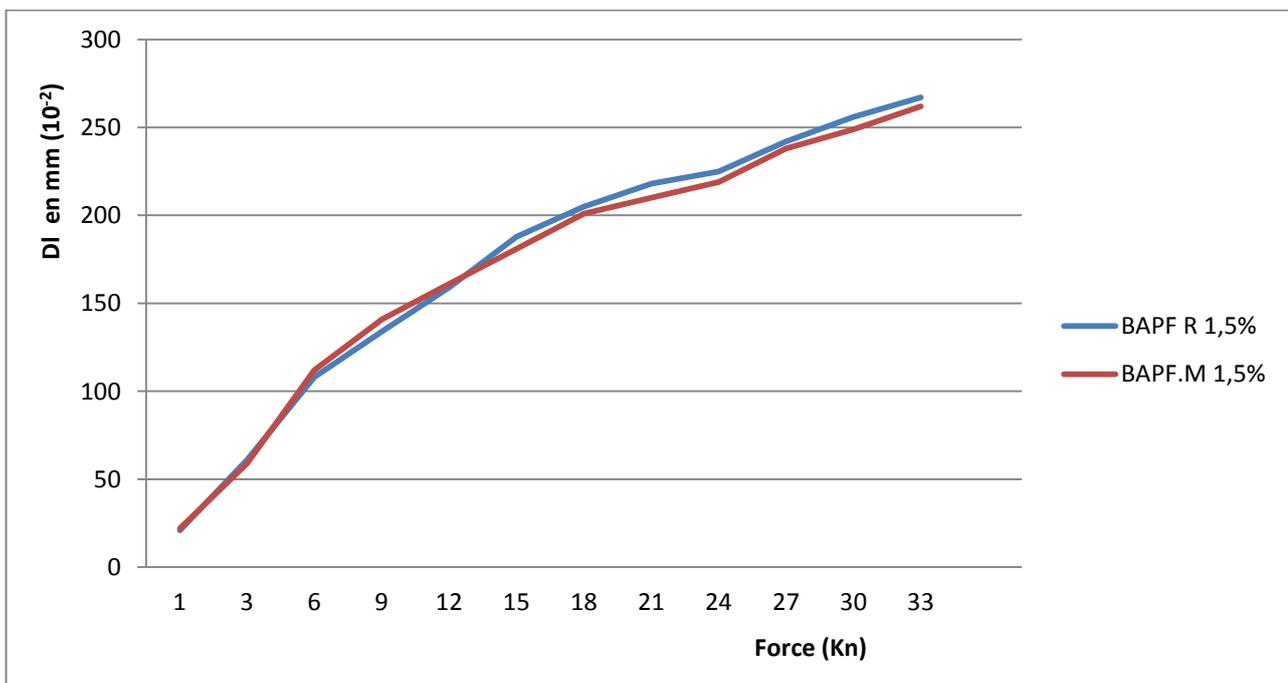


**Figure V-18** : variation de déplacement de la flèche a l'âge de 28 jours pour les fibres métalliques crochet)

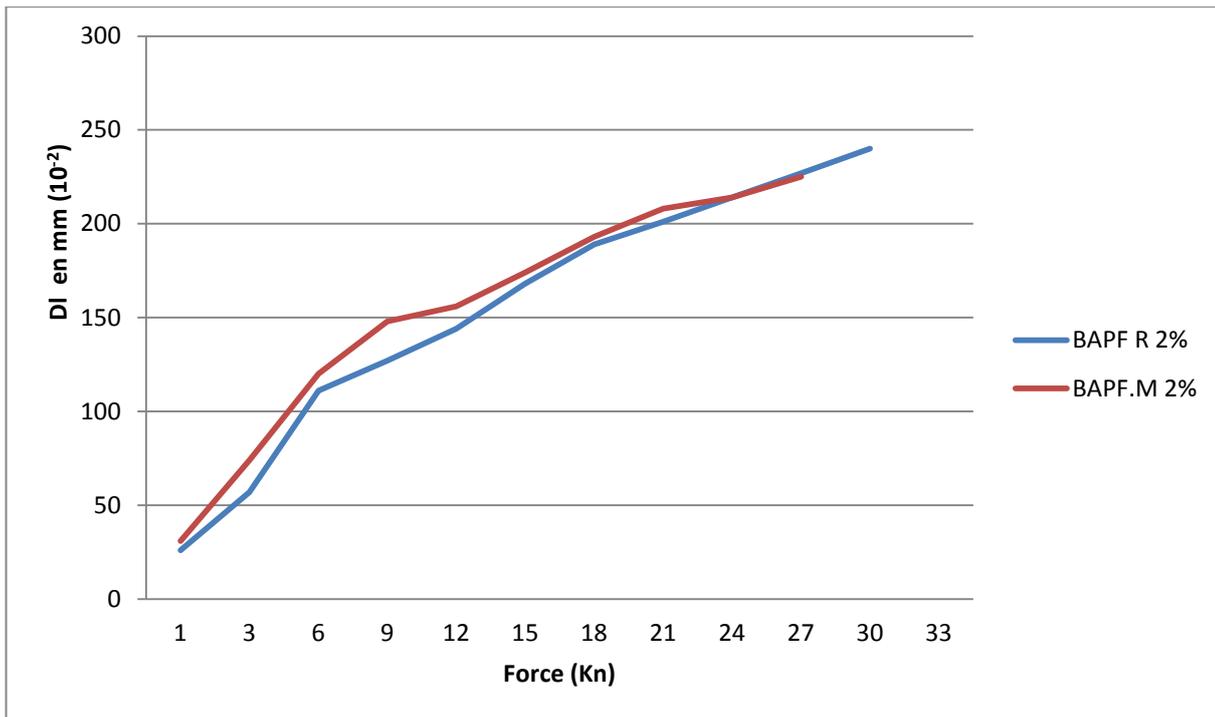
**V-III .8 :la variation de déplacement pour chaque pourcentage des deux fibres :**



**Figure V-19:**déplacement de la flèche pour 1% BAPF (crochet et récupéré)



**Figure V-20 :**déplacement de la flèche pour 1,5% BAPF (crochet et récupéré)



**Figure V-21:**déplacement de la flèche pour 2% BAPF (crochet et récupéré)

**\*Interprétation des résultats :**

Les résultats obtenus sont analysés de point de vue de type de fibres :

Les fibres de déchet métallique donne un bon déplacement par rapport aux fibres métalliques normalisé ce la explique les caractéristiques de chaque type

Ils présentent une grande adhérence très intéressante ceci du a la nature et la forme de ces fibre

### **V-Partie IV : (réparation d'un béton fissuré)**

Dans cette partie, nous avons réparé un béton autoplaçant par un BAP renforcé par des fibres de récupération.

On a choisit le pourcentage de 1,5% pour le dosage des fibres dans notre béton (c'est le pourcentage qui a donnée des bons résultats soit à l'état frais ou à l'état durci)



**Figure V-22** : les fibres recyclées

#### **IV -1- les étapes suivies pour la réparation :**

1- nous avons carotter une éprouvette (14 x 14 x 56 ) cm



**FigureV-23**: l'éprouvette carotter (BAP témoin)

2- nous avons éliminé 6 à 7 cm de l'éprouvette carotter



**Figure V-24:** la préparation de l'éprouvette à réparé



**Figure V-25:** l'éprouvette nettoyée

3- après l'avoir nettoyé de la poussière nous avons préparé la colle MEDAPOXY

\*La colle (MEDAPOXY)

Classification selon la norme AFNOR NFT30 006

Colle époxydique souple sans solvant

**-DESCRIPTION :**

Le MEDAPOXY COLLE SOUPLE est une colle époxy souple sans solvant livrée sous forme de kit pré dosé à 2 composants :

Elément A : Résine

Elément B : durcisseur



Figure V-26 : Le MEDAPOXY COLLE SOUPLE

#### **-PROPRIETES**

-Excellente adhérence sur béton, mortier , plastique, acier ...

-sans retrait

-Ne se cristallise pas

-reste souple après séchage

#### **-DOMAINES D'APPLICATION**

Le MEDAPOXY COLLE SOUPLE convient à des collages variés. Nous consulter pour les cas spécifiques.

#### **-CARACTERISTIQUES**

- Rapport du mélange :

Elément A : 1 Kg    Elément B : 1.30kg

- Densité ( ISO758) : 1.18
- Viscosité ( NF T76-102) : 800 MPa.S à 25C°

- Adhérence sur béton (NFP18 858) : > 3MPa
- Résistance à la compression (NA427) : > 55MPa
- Résistance à la flexion (NA 234) : > 30MPa
- Résistance à l'abrasion ( DIN 53 754) : 80mg
- Module d'élasticité ( DIN 1048) 9580MPa
- Dureté shore D(NF T 51109) 30
- Dureté au pendule de PERSOZ(NF T300-16) 250s

-Condition d'utilisation :

la température d'utilisation doit être comprise entre 15C° et 35C°. l'humidité relative de l'air doit être inférieure à 80%

**-Préparation du support :**

Les supports doivent être secs, propres et débarrassés des parties non adhérentes.

Toutes traces d'huiles, graisse , peintures , laitance ou autres souillures doivent être éliminées. Nettoyer soigneusement et dépeussier.

Les bétons ou mortier doivent être décapés par sablage, grenailage.

**-Mélange**

-procéder au mélange des deux composants une fois que la préparation des supports soit terminée.

-préparer que la quantité de mélange pouvant être utilisée durant ce temps.

Il est très important de bien remuer les deux éléments constituant le MEDAPOXY COLLE SOUPLE afin d'obtenir un mélange homogène et de respecter le rapport du mélange .

Verser l'élément B dans l'élément A en veillant à respecter le rapport de mélange .

Remuer pendant 3 minutes avec un agitateur électrique à faible vitesse de rotation. Raclez plusieurs fois les parois du récipient afin d'assurer une dispersion totale.

**-Application :**

-application avec un pinceau , rouleau ou une spatule.

-le collage doit se faire pendant que la colle est encore poisseuse.

**-CONSOMMATION**

300g/m<sup>2</sup> à 400g/m<sup>2</sup> selon la porosité du support

**-CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE**

Livré en kits de 23Kg ou de 6.2Kg

Elément A : 10Kg ou 2.7Kg

Elément B : 13Kg ou 3.5Kg

4- nous avons mis une couche de la colle MEDAPOXY



**Figure V-27** :application de la colle MEDAPOXY sur l'éprouvette

5- nous avons mis l'éprouvette dans un moule (comme coffrage)



**Figure V-28:** coffrage de l'éprouvette de réparation

6-Nous avons remplis l'éprouvette par notre BAP fibré (fibres de récupération)



**Figure V-29 :** l'éprouvette réparée à l'état frais



Figure V-30 : éprouvette réparée



Figure V-31 : éprouvette réparée



**Figure V-32 : épreuve réparée**

#### **IV - 2-Essais non destructif sur les bétons durcis ( l'essai de l'ultrason) :**

##### **IV - 2-a- Définition :**

L'essai de l'ultrason permet de déterminer la vitesse de propagation des ondes longitudinales à travers un élément en béton. Pour déterminer la vitesse longitudinale, l'appareil(TICO) muni de deux palpeurs de fréquence 54 KHz destinés pour le contrôle du béton. Cet appareil nous indique le temps (T) de propagation des ondes à travers l'éprouvette de longueur (L) et donne la vitesse de propagation (V) selon l'équation suivant :

$$V = S / (T \cdot 10^6)$$

V : vitesse de propagation.

S : distance entre les têtes en mètre.

T : temps en microseconde.

Cette méthode consiste à presser les deux têtes sur les faces de l'éprouvette nettoyées, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transition du son.



Figure V-33 : Essai d'ultrason

#### IV - 2-b-Les intervalles de la vitesse de propagation :

Qualité de béton	Vitesse de propagation de son (m/s)
Excellente	Supérieure à 4575
Bonne	3660 à 4575
Douteuse	3050 à 3660
Mauvaise	2135 à 3660
Très mauvaise	Inférieure à 2135

Tableau V-38. : Les intervalles de la vitesse de propagation

Les résultats obtenus en testant pour une éprouvette réparée à l'ultrason est donnée dans le tableau suivant :

/	Eprouvette témoin	Eprouvette réparée
<b>Temps (<math>\mu\text{s}</math>)</b>	84	35,3
<b>Vitesse moyenne de propagation</b> <b><math>V=L/T</math> (m/s)</b>	3810	3970

**Tableau V-39** : résultat d'ultrasons

**-interprétation :**

Le tableau donne les résultats de mesures de la vitesse de propagation du son a travers des éprouvettes des bétons étudiés a 28 jrs nous remarquons que la vitesse du son est comprise entre 3500 et 4500 m/S , d'après nos résultats, ces valeurs de vitesse sont acceptable qui correspond a des bétons de compacités élevées , ce pendant par rapport au béton témoin les béton autoplacants élaborés a base des fibres de récupération ont des valeur de vitesse plus élevées que celles obtenues par BAP témoin.

**IV - 3-caractéristique de l'éprouvette réparé a l'état durci :**

Gachage	Résistance à la flexion a 28 jours (MPa)
<b>BAP témoin</b>	6,5
<b>BAPF récupéré</b>	7,56
<b>BAP réparation</b>	5,96

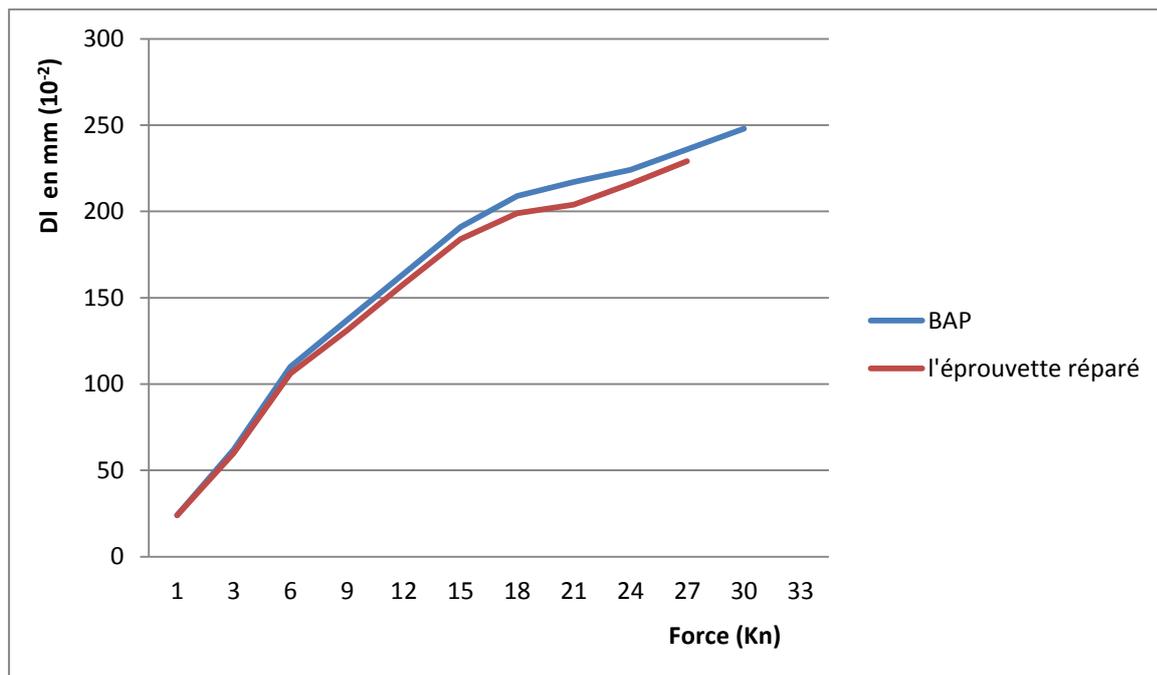
**Tableau V-40** : résistance à la flexion a 28 jours

**Interprétation :**

D'après les résultats du tableau ci-dessus le béton réparer avec un BAPF de récupération a donné une bonne résistance a la traction par flexion, nous avons aussi remarqué une petite différence entre les résultat qui n'est pas grande ce qui prouve que la réparation nous a

**IV - 4 - mesure de déplacement (l'éprouvette réparé):**

Fx (Kn)	DI de l'éprouvette réparé en mm( $10^{-2}$ )
1	24
3	60
6	106
9	131
12	158
15	184
18	199
21	204
24	216
27	229
30	-
33	-

**Tableau V-41** : mesure de déplacement**Figure V-34** : variation de déplacement de la flèche de BAP témoin et l'éprouvette réparé avec un BAPF (des fibres de récupération )**Interprétation :**

Le déplacement de BAP réparé est presque le même BAP témoin, sur tout dans l'intervalle de  $F=[1-16]$  Kn

Donc il ya une bonne compatibilité entre le BAP fissurer et le BAP de réparation.

### **conclusion générale :**

D'après cette étude ,les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- ❖ après la réalisation de ce travail, on peut dire que la méthode japonaise est exploitable et donne des meilleurs résultats pour la formulation des BAP et BAPF, l'emploi d'un adjuvant (tempo 12) haut réducteur d'eau de type polycarboxylate améliore la maniabilité et la fluidité au béton et ça nous donne un bon béton avec des meilleures caractéristiques rhéologiques et physico-mécanique
- ❖ le comportement rhéologique du BAP est différent de celui de BAPF a cause des fibres incorporés, leurs dosages, leurs formes ainsi que leur propriété.
- ❖ d'après les résultats obtenus est le choix de pourcentage des fibres retenue, les propriétés de béton a l'états frais sont conforme a la norme (AFGC).
- ❖ les fibres améliorent les propriétés du BAP et donne des bons résultats sans détérioration des propriétés rhéologiques mais a un dosage limité( a 2% les problèmes commencent).
- ❖ les fibres de récupération donnent les meilleurs résultats par rapport aux fibres métalliques.
- ❖ dans l'ensemble des observations,nous constatons que l'ajout de 2% des fibres influe négativement sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP.
- ❖ \*et à la fin, et d'après les résultats tirés de nos essais expérimentaux montrent que la réparation d'une structure de BAP fissurée est possible tout en assurant une certain économie en matériaux et en énergie.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIE

- (1) : thèse doctorat « effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des BAP » présentée par Mohammed Rissel Khelifa génie civil sentence le 20 juin 2009.
- (2) : MEF, formulation et caractérisation rhéologique d'un BAP, action des déférents supers plastifiants sur les propriétés rhéologique. université de boumerdes 2006/2007.
- (3) : DREUXG. « Nouveaux guide de béton », Ed Exrolles, paris (1998).
- (4) : thèse doctorat soudaine BEHMONT (mécanisme de ségrégation dans les BAP. Ecole national de ponts chaussés.
- (5) : thèse de doctorat Sandrine BETHMOT (mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants de l'Ecole nationale des ponts et chaussées).
- (6) : thèse de doctorat de Philippe Turcry de l'université de Nantes (retrait et fissuration des bétons autoplaçants influence de la formulation).
- (7) : documents de LAFARGE France.
- (8) : turcry, retrait et fissuration des bétons autoplaçants-influence de la formulation, thèse de doctorat de L'Ecole central de Nantes.
- (9) : GUILAUME CAMPS Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton thèse doctorat de l'université de Toulouse soutenue le 10 Septembre 2008.
- (10) : Rossi P les bétons de fibres métalliques, ponts et chaussées, paris, 309p. (1998)
- (11) : BENKECHKACHE Ghofrane Etude DE comportement diffère des bétons autoplaçants influence des paramètres de composition et de chargement thèse de magister novembre 2007 université mentouri Constantine.
- (12) : Chan Villard G. (1993) analyse expérimental et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées, ancrées dans une matrice cimentaire. et recherches des LPC, série ouvrages d'art, OA12.
- (13) : BENTALHA née Malou Malika influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice caractérisation – comportement monotone – microstructure cimentaire thèse de doctorat d'état université mentouri-Constantine 30 OCTOBRE 2007.
- (14) : DE LARRARD F. et LYROY R « relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances » matériaux et construction 25, pp.464-475 ,1992.
- (15) : BEKAERT, ISO 9001, Dramix « béton renforcé d'acier ».
- (16) : THEMER OLL « fibre polypropylène pour mortier, plâtre et béton ».
- (17) : GERARD. PONS « thèse doctorat de l'université de toulouse ».

- (18) : Youcef FRITIH Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'élément en béton autoplaçants armé thèse de doctorat de l'université de Toulouse 08 juillet 2009.
- (19) : Rossi P. (1991) formulation et comportement mécanique des bétons de fibres métalliques, annales de L'ITBTP, N° 492, série 279, 1991, pp.90-107.
- (20) : Rachid berbaoui (indentification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaires a base polymère) thèse de doctorat de l'université du Maine Soutenue le 21 janvier 2010.
- (21) : Bernard O. 2000 « comportement à long terme des éléments de structure formés de bétons d'âges différents. » « thèse de doctorat, EPFL, lausanne suisse
- (22) LOfgren I. (2005) « fiber-reinforced concrete for industrial analysis », PhD-thesis, department of civil and environmental engineering structural engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Goteborg, Sweden.
- (23) : Di benedetto H. ashayer soltani M.A, 1995. "Etude de la fatigue des mélanges bitumineux. » 2ème réunion du réseau de laboratoires Géomatériaux, environnement, ouvrage, Aussois France, pp 1-3.
- (24) : Ait Medjane Rabah, DABBAKHI Said « influence de la teneur en fibre métalliques sur les propriétés d'un béton autoplaçant renforcé de fibres ». Sthèse d'ingénieur de l'université de boumerdes juin 2009.
- (25) : Grunewald S, (2004) « performance –based desing of self-compacting fibre reinforced concrete ”, Diplom –Ingenieur delft university of technology

Grunewald S, walraven J.C, ( 2001)'' parametier-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh propertier of self-compacting concrete'', cement and concrete Research vol.31,PP.1793-1798

Grunewald S, walraven J. C.(2001)'' maximum content of steel fibres in self-compacting concrete'', proceeding of the second international symposium on self – compacting concrete.

Grunewald S. ,Walraven J.C, (2003) '' rheological measurements on self – compacting fibre reinforced concrete'' , 3 rd international symposium on self compacting concrete, 17-20 August 2003, Reykjavik , Iceland.

Grunewald S, walraven J.C , (2001) '' rheological study on the workability of fiber reinforced mortar'', proceedings of the second international symposium on self compacting concrete , K Ozawa and M. ouchi, eds, university of Tokyo,japan, 2001 ,pp 127-136.

Grunewald S, walraven J,C (2003)'' optimization of the mixture compositionof self compacting fibre reinforced concrete ”, 4 th international symposium on self-compacting concrete , 17-20 august 2005, chicago' USA.

- (26) :Grunewald S , walraven J,C, (2001)'' parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete '' , cement and concrete Research vol 31, pp1793-1798
- (27) : groth P ,(2000) '' steel fibre reinforced SCC, final report of task 6'' , brite Euram project (BE 96-3801)- rational production and improved working environment through using SCC, doc. No : RT6-v1.doc.
- (28)- : petersson, O (1998) preliminary mix Design , Final Report of Task 1 , brite Euram project (BE 96-3801)-rational production and improved working environment through using SCC, Document RT1\_V2.doc
- (29)- :Groth P, Nemegeer D, (1999) The use of steel fibres in self – compacting concrete , First Int , symposium on SCC , Stockholm, edited by skarendahl and petersson , RILEM publications PRO 7, Cachan pp.497-508
- (30)- :R.N.swamy ET p.S Mangat ; Inuence of \_bre-aggregate interaction on some properties of steel bre reinforced concrete. Materials and Structures, 7(41);307(301 ,1974.
- (31)- :grunewald: Performance- based design of self- compacting \_bre reinforced concrete These de doctorates , Delft University of Technology, Pays-Bas, 2004.
- (32)- :A,G, kooiman: Modelling steel \_ber reinforced concrete for structural desing. These de doctorates , Delft University of Tschnology, pays – bas, 2000
- (33)- :I.Markovic: High- performance hybrid-\_bre concrete : development and utilization , These de doctorates , Delft University of Technology, Pays-Bas, 2006
- (34) :V. K. Bui,M.R.Geiker et S.R Shah:reology of\_ der – reinforced cementitious materials. Michigan ; 2003. 4<sup>th</sup> conference on High performance fiber reinforced cement compsites (HPFRCC4), RILEM publications.
- (35) :B.P.Hughes et N.I.fattuhi: The workability of steel-der reinforced concrete. Magazine of concrete Research, 28(9):157(161,1976.
- (36) :C,D,Johnston : proportioning, mixing and placement of \_ber-reinforced cements and concretes. In D.J.Cleland(Eds) in P.J.M. bartos, D.L.Marrs,\_editeur: production methods and Workability of Concrete , pages 155(179.RILEM Symposium, Eand FN Spon, London,1996
- (37) :R Narayana et A S Kareem-palanjin : Factors inuencing the workability of Steel-bre reinforced concrete –parti . concrete, (45-48) 1982
- (38) :Narayanan et A S Kareem – palanjian ; Factors inuencing the workability of Steel-bre reinforced concrete – partii. Concrete , (42-44),1983

- (39) : M Z Bayasi et P. sorouchian : Effect of steel\_fiber reinforcement of fresh mix properties of concrete. ACI Material Journal,89(4):369(374,1992.Spon, London, 1996
- (40) : Fukuyama, K,Y,Higashibata , et al .(2000).Studies on repair and strengthening methods of damaged reinforced concrete columns. Cement and concrete Composites, v 22 (issue 1), p, 81 -88
- (41): Bélanger, L-M (2007). Manuel d'entretien des structures. Québec transports Québec.
- (42): Emmons, P.H. and A. M. Vaysburd (1996). System concept in design and construction of durable concrete repairs . Construction and building materials, v.10 (issue"1), p.69-75
- (43): Bélair, N.J. (2005).contribution à la mise au point d'une procedure de caractérisation quantitative des surfaces en béton en vue de travaux de réfection, Québec, université Laval, master, 199p.
- (44) : saucier, F. (1990). La durabilité de l'adhérence des réparations en bétons. Québec université Laval, 145p.
- (45) : Garboczi , E , J , (1993) . Computational materials science of cement-based materials. Materials and structures ,v .26,p. 191-195.
- (46): Courard ,L. (1999). Contribution à l'analyse des parameters influençant la creation de l'interface entre un béton et un système de reparation , liege , Université de liège , 198p.
- (47) : Emmons, P,H . And A. M. Vaysburd (1994). Factors affecting the durability of concrete repair : the contractor's viewpoint . construction and building materials ,v.8(issue"1),p.5-16.
- (48): bissonnette ,B.(1996) . le fluage en traction : un aspect important de la problématique des reparations minces en béton ,Québec ,université Laval ,307p.
- (49) : Emmons , P.H , A.M. Vaysburd , et al.( 1994 ) concrete repair in the futur turn of the century –any problems ? concrete international ,v .16(issue"3),p.42-49.
- (50): Neville ,A.M. (2000). Proprieties des bétons .paris , Eyrolles.
- (51) : Naderi,M, (2008). Adhesion of concrete repair systems exposed to different environnement . The Journal of Adhesion , v 84(issue "1).p.78-104.
- (52):ICRI,ACI, et al (2006). Vision 2020- Avison for the concrete repair , protection and strengthening industry. 29 p.
- (53): Mangat , P,S, and F.j. o'Flaherty (1999)Serviceability characteristics of flowing repairs to propped and unpropped bridge structures Materails and structures, v 32, p,663-672.
- (54): Canisius, T,D,G and W, N (2004).Concrete patch rapairs under propped and unpropped implementation , structures & Buildings, v, 157(issue"2), p, 149-156

(55): Austin, S, P Robins, et al, (1995) Tensile bond testing of concrete repairs. *Materials and Structures*, n,28,p,249-259

(56): Guindon, M-A (2003). Etude du comportement des resurfaçages adhérents-mécanismes d'endommagement et influence des paramètres de conception, Québec. Université de Sherbrooke, Maîtrise , 134p

(57) : Emberson, N K and G C Mays (1990). Significance of property mismatch in the patch repair of structures concrete

Part2 : Axially loaded reinforced concrete members. *Magazine of Concrete Research*,v 42(issue"152), p 161-170

(58):Mangat P S and M C Limbachiya (1997)Repair material properties for effective structural application. *Cement and Concrete Research*, v,27(issue"4), p,601-617

(59):Plum , D R (1987). Epoxy resins repair materials in the laboratory and insitu. *Proceedings of the international conference on structural faults and repair* 87, p, 334-341

(60):Plum, D R (1990). The behavior of polymer materials in concrete repaired and factors influencing selection. *The Structural Engineer*, v, 68(issue"17), p, 337-345

(61): Plum, D R (1991) Materials – what to specify. *Construction maintenance & repair*,v, 5(issue"4),P 3-7

(62): Durelli, A, j, E, A, Phillips, et al (1958) Introduction to the Theoretical and Experimental Analysis of Stress and Strain. United States of America, McGraw-Hill Book Company,inc.