

4.1/ INTRODUCTION

Notre recherche bibliographique a mis en évidence les besoins d'expérimentation sur le matériau de réparation, l'effet du séchage et du retrait restreint sur la durabilité des réparations minces. Ce terme "réparation mince" fait référence à des réparations d'une épaisseur inférieure à 100 mm. On a découvert que l'une des sources principales de fissuration de la couche de réparation provient des contraintes de traction engendrées par le retrait empêché. Donc un matériau de réparation ayant une bonne capacité déformationnelle sera un matériau qui soumit à peu de déformations empêchées. L'analyse bibliographique nous a montré aussi qu'on peut avoir avec les bétons de sable des caractéristiques spécifiques : excellente maniabilité, la cohésion et la bonne adaptation au milieu fortement ferrillé. Nous avons extrapolé que les bétons de sables ont un caractère non fissurant avec un faible module d'élasticité et qui présente une grande déformabilité, et donc de moindre fissuration. C'est ce qui nous a encouragé à le choisir dans notre étude expérimentale.

La formulation du matériau de réparation demeure l'un des paramètres clés gouvernant la durabilité d'une réparation. Les matériaux retenus couvrent une gamme non pas exhaustive de ce qui est utilisé en pratique, mais qui permettra de mieux comprendre les mécanismes qui régissent la durabilité d'une réparation tout en se voulant représentative des bétons de chantier. La recherche du matériau développant la meilleure compatibilité et meilleur adhérence au support était notre objectif d'étude.

Notre principal objectif est d'étudier et de développer le matériau béton de sable, afin de le destinée et de l'utilisé comme produit de réparation. Au caractère non fissurant du BS était basé notre choix.

D'une façon générale, le programme expérimental de ce mémoire est divisé en 03 parties:

1. Formulation du béton de sable ordinaire ;
2. Introduction d'additions à la formulation de base du béton de sable ;
3. Réparation des éléments en béton.

Dans ce chapitre, nous présenterons et nous analyserons les résultats obtenus avec des séries de bétons de sable exposées à des essais de caractérisation mécaniques et hygrométriques.

Les essais de caractérisation sont faits en deux parties :

- 1) Formuler un béton de sable avec du sable concassé et de filler calcaire. Axera notre travaille sur l'optimisation de la compacité du béton tout en se basant sur le critère de la résistance à la compression. Dans cette étape on a confectionné 3 séries pour :

- Déterminer la quantité d'ajout (filler calcaire) ;
 - Déterminer le dosage en superplastifiant ;
 - Réduire la quantité d'eau et déterminer le rapport E/C.
- 2) Introduire des additions comme composants a la formulation performante sélectionnée des séries de la 1^{ère} étape, et qui sera notre béton de référence. Dans cette seconde étape nous étudions l'effet de chaque addition sur les propriétés mécaniques (compression, traction, élasticité), sur le retrait et la perte de masse et sur la capacité d'absorption d'eau. De ce fait on a formulé :
- Un béton de sable avec fumée de silice.
 - Un béton de sable avec fibre polypropylène.
 - Un béton de sable avec latex.
 - Un béton de sable avec combinaison de (latex + fibres polypropylène).

Comme dernière étape et après formulation et caractérisation du matériau béton de sable, nous avons voulu tester notre matériau résultant pour y réparer des éléments en béton. Dans le but d'étudier le comportement hygrométrique des réparations, on a mis les éléments réparés aux conditions climatiques extérieures (séchage seul). Après une certaine durée, on appliquera une contrainte de compression aux éléments réparés, et voir leur taux d'adhérence au support.

4.2/ FORMULATION DU BETON DE SABLE

Dans notre étude expérimentale on a essayé de formuler un béton de sable, en s'appuyant sur la méthode expérimentale [24] [27] [30] et en se basant sur l'optimisation de la compacité du matériau. Dans les bétons traditionnels, compte tenu du diamètre maximal D_{max} des grains (0/16 et 0/25), le dosage 290 et 400 Kg/m^3 en ciment est suffisant pour assurer au béton une compacité maximale. Ce dosage est donné par la règle K/D [37] correspondant aux valeurs du tableau (1.1) du 1^{er} chapitre [24], (K étant égale à 500 ou 700 suivant la compacité souhaitée).

Donc, dans la gamme des sables ($D_{max} \leq 6mm$) on est amené à envisager des dosages en ciment compris entre 450 à 700 Kg/m^3 , mais les problèmes liés à l'utilisation d'un fort dosage en ciment sont: coût élevé, excès de rigidité, retrait important. Pour éviter ces derniers phénomènes, on a fixé un dosage en ciment à 350 Kg/m^3 [30] [31]. Il nous restait à déterminer la quantité du sable (sable concassé) et le dosage en eau nécessaire au mélange. Le dosage en sable a été déterminé, en supposant un coefficient de compacité du mélange égal a

0.75 (valeur tirée du tableau (10.13) [37]) qui correspond à un mélange avec $D_{max} = 5\text{mm}$ et un consistance ferme. Aussi nous avons fixé notre dosage en sable à 1660 Kg/m^3 [30] [31].

En ce qui concerne le dosage en eau, on a essayé de mouiller notre mélange avec la quantité d'eau nécessaire qui nous donnera une pâte qui sera suffisante pour l'hydratation des grains de ciment. On a commencer notre formulation par un rapport $E/C = 0.75$ et on a obtenu un béton de sable ferme. (Voir notre formulation de base mentionnée au chapitre 3, (Tableau 3.6)).

Avec cette formulation on a obtenu un béton de sable ferme avec les caractéristiques mécaniques suivantes, (Tableau 4-1) :

Tableau 4-1 : Caractéristiques mécaniques du B.S à l'âge de 28jours

Rc (MPa)	Rt (MPa)	E (MPa)
22	3.7	22700

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques et pour avoir un béton plus compacte et moins poreux, on a introduit des fillers calcaires à la formulation, afin de voir leurs effets sur ces caractéristiques.

4.2.1/ Effet d'ajout de filler calcaire

Nous avons fait introduire des fillers calcaires à la formulation, du BS témoin afin d'assurer deux fonctions principales :

- ❖ Le remplissage des vides pour améliorer la compacité ;
- ❖ L'ordre physico-chimique qui devait améliorer l'enchevêtrement cristallin et la cohésion du mélange.

Pour ce faire, on a fait varier les dosages. On substitue et on remplace chaque fois une quantité de sable par le filler calcaire tout en corrigeant les dépenses en sable et en filler de manière à garder le dosage en ciment fixe (350 Kg/m^3) [12] [13], et avec le même rapport $E/C = 0,75$.

D'après G.Chanvillard [29], on peut varier le rapport (Filler/ciment) pour agir sur la résistance sans effet majeur sur l'ouvrabilité.

4.2.1.1/ Résistance mécanique à la compression

La figure (4.1) présentée ci-dessous, montre qu'il y a une évolution de la résistance à la compression en fonction du temps. Pour les cinq (05) mélanges du BS, on constate une remarquable évolution à l'âge de 28 jours jusqu'à 90 jours, pour les mélanges (BS1, BS2) aux dosages successifs de filler (160-180) Kg/m³. Mais au delà du dosage **180 Kg/m³**, on remarque une évolution moins importante pour les mélanges (BS2, BS4, BS5) aux dosages (200-220-240) Kg/m³.

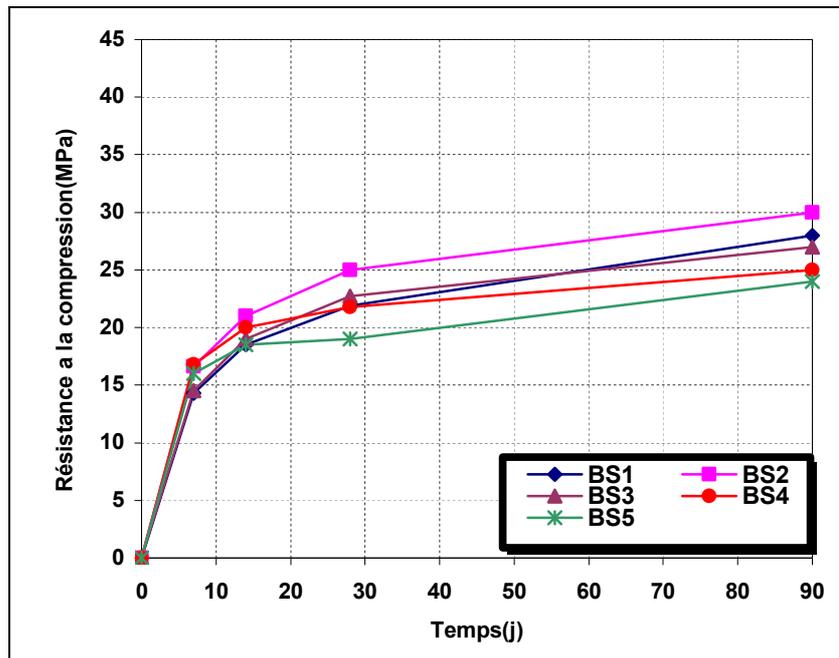


Figure 4.1 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du dosage en FC

On peut remarquer aussi pour les courbes des figures (4.2) et (4.3) qu'il y a une tendance vers une valeur maximale de la résistance à la compression qui égale à 25 MPa à 28 jours et de 30 MPa à 90 jours pour le même dosage en filler calcaire : 180 Kg/m³. Mais au-delà de ce dosage l'augmentation de la résistance devient faible. Le dépassement de ce dosage cause une chute ou on peut enregistrer le point critique de la compacité et signaler la présence de pores, du au surdosage de filler.

On trouve que la compacité de notre BS était atteinte par un dosage de 180 Kg/m³. En comparant ces résultats à ceux de Z.Boudaoud et K.Gadri [30][31], on trouve que leur optimisation de compacité a été atteinte au dosage de 200 Kg/m³. On peut l'expliquer par la différence du type de sable utilisé (sable concassé). D'après l'analyse granulométrique : notre

sable contient un pourcentage important de filler et microfiller (15%) produit par broyage. Aussi on n'a pas utilisé le même filler, du fait que les caractéristiques physiques jouent un grand rôle pour la compacité, comme on l'a vu au chapitre 2 (paragraphe 2.5.2) [24].

On peut dire aussi que la nature et la finesse d'ajout ont un effet important sur la compacité et par conséquent sur la résistance à la compression.

Alors, on adopte pour notre BS le dosage de filler calcaire à **180 Kg/m³**, soit la formulation **BS2**. On a constaté aussi, d'après G.Chanvillard [29] que le rapport F/C n'influe pas de façon majeure sur la maniabilité, et nous pouvons, alors, dire que le ciment et le filler jouent sensiblement le même rôle dans l'empilement

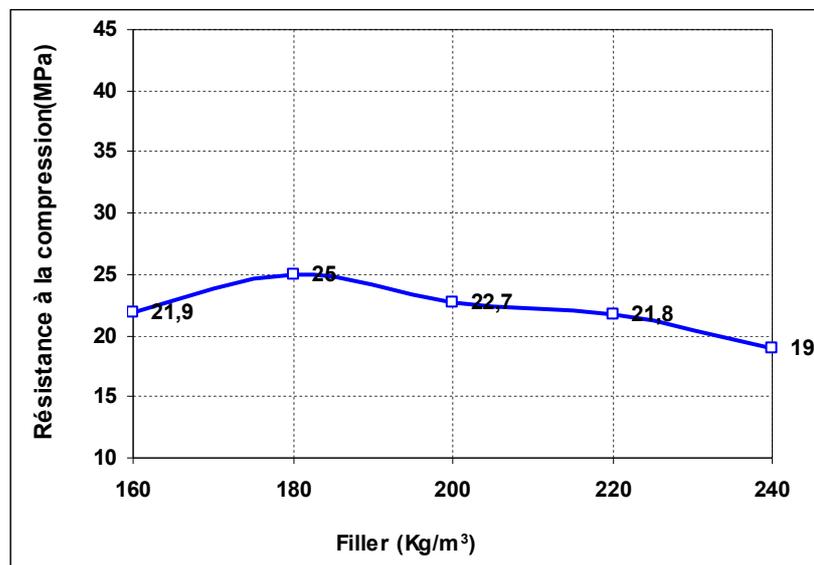


Figure 4.2 : Effet du dosage de FC sur la résistance mécanique à la compression à 28 jours

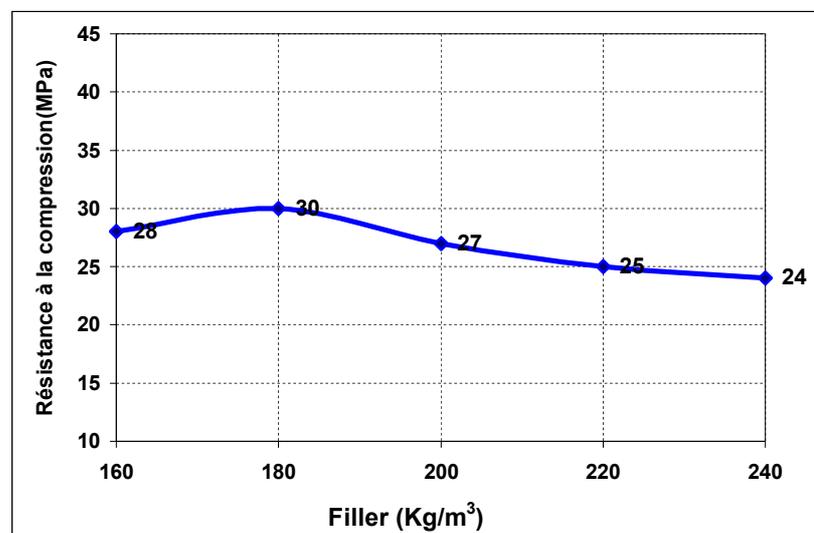


Figure 4.3 : Effet du dosage FC sur la résistance mécanique à la compression à 90 jours

4.2.1.2/ Résistance mécanique à la traction

Pour les résultats obtenus de la résistance à la traction, ils sont présentés aux courbes de la figure (4.4). On a remarqué une évolution de la résistance de chaque mélange en fonction du temps. A 28 jours nous avons eu une résistance à la traction maximale pour le béton BS1 au dosage de 160 Kg/m³ de 6 MPa, comme on a obtenu une résistance de 5.8 MPa pour BS2 à un dosage de 180 Kg/m³. A signalé une différence de 3.33%, qui n'est pas importante comme différence. Ces résultats restent acceptables comparant les à celles obtenues par (Z.Boudaoud), avec du béton de sable a base de sable fin de Bousaada [30]. On constate l'effet remarquable du sable concassé sur la résistance à la traction.

A cause du nombre limité d'éprouvettes (le résultat est la moyenne de 03 éprouvettes), on ne peut pas assurer ces résultats. Il reste à confirmer par d'autres essais et avec plus d'éprouvettes.

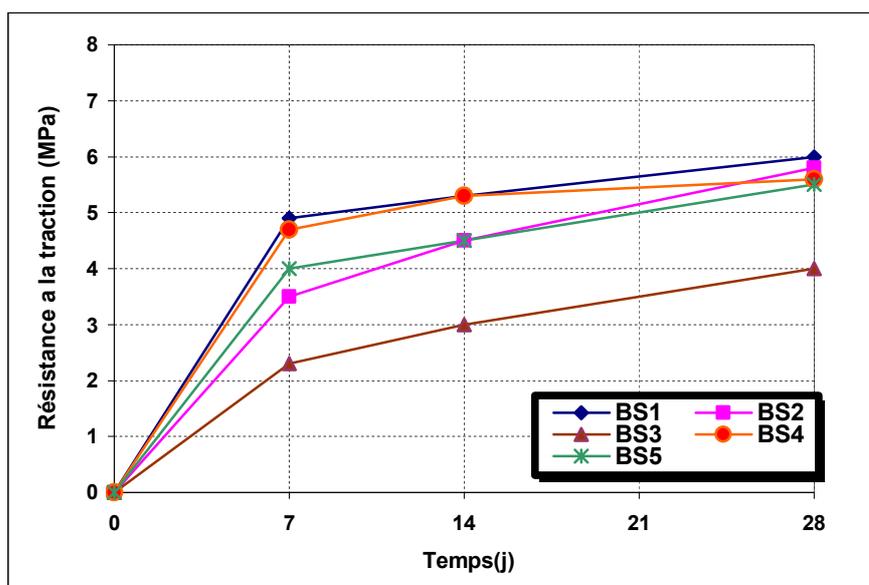


Figure 4.4: L'évolution de la résistance à la traction en fonction du temps et du dosage en FC

4.2.2/ Effet d'ajout du superplastifiant

Après avoir sélectionné la formulation performante qui nous a donné l'optimum de résistance à la compression (Tableau 4.2) par cette composition, on a obtenu un béton ferme avec un affaissement (F= 3cm). Afin d'avoir des gains de résistance appréciables et pour améliorer la maniabilité de la formulation BS2, on a fait introduire un superplastifiant avec différents dosages : 0.5% - 1%- 1.5% - 2%- 2.5 %.(par rapport au poids de ciment).

Tableau 4.2 : Composition du béton de sable BS2

Sable (Kg/m ³)	Ciment (Kg/m ³)	Filler (Kg/m ³)	E/C
1480	350	180	0.75

4.2.2.1/ Maniabilité

D'après la figure (4.5) on remarque une évolution de l'affaissement en fonction du dosage du superplastifiant tout en gardant le rapport E/C constant. Avec un dosage de 0.5% on a un affaissement de 3cm, qui n'a donné aucun effet. Mais avec l'augmentation du pourcentage, on enregistre un effet d'évolution d'affaissement jusqu'à dépasser 20cm pour un pourcentage de 2.5%. On assiste alors à une amélioration de la maniabilité soit 6 à 7 fois par rapport à l'initiale. Ceci est dû à l'action dispersante du superplastifiant. La dispersion des grains de ciment libère l'eau qui est disponible à la lubrification du mélange. D'où l'augmentation de la maniabilité du béton qui donnera une meilleure distribution des grains de ciment et conséquemment, leur meilleure hydratation.

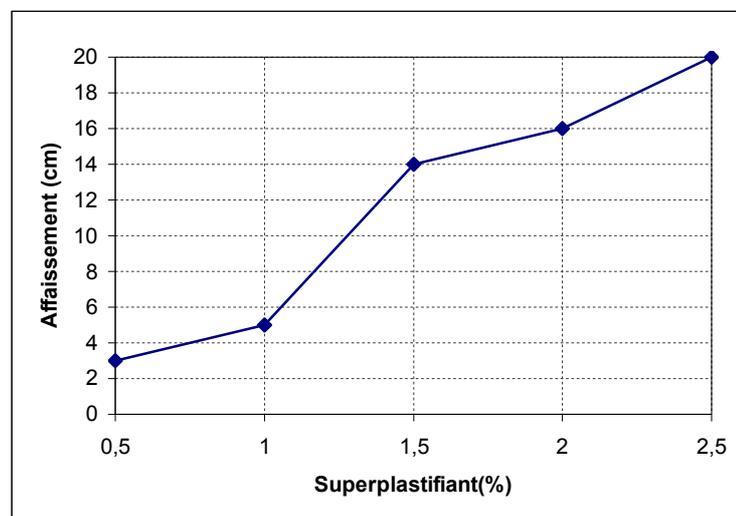


Figure 4.5 : Effet du superplastifiant sur l'affaissement

Alors on a 05 formulations avec différentes consistances : du béton ferme à un béton mou. On a remarqué aussi, lors de sa confection, le phénomène de ressuage du a l'excès d'eau. On n'a pas pu avoir un béton plastique avec un affaissement ($5 \leq F \leq 9$), par le même rapport E/C égale à 0,75.

Pour choisir la formule de béton convenable, on doit trier celles qui sont dans l'intervalle d'affaissement [5 et 16 cm], avec les dosage 1% et 1.5%. Le même problème demeure car on n'a pas pu obtenir un béton plastique mais plutôt un béton ferme ou fluide avec ces variantes, d'où on a des difficultés à contrôler la maniabilité. Alors, on a essayé, avant tout, de voir l'effet de ces pourcentages sur la résistance mécanique à la compression et à la traction pour les 05 formulations.

4.2.2.2/ Résistance à la compression

Pour la sélection de la meilleure formulation, on s'est toujours basé sur la résistance à la compression comme critère de choix. La figure (4.6) représente l'effet du superplastifiant sur la résistance mécanique à la compression pour différents pourcentages. On constate une évolution de la résistance à la compression des 05 formulation en fonction du temps qui passe de 29 MPa à 28 jours à 37 MPa à 90 jours pour la formulation BS-SP4. En comparant ce résultat à celui de la formulation de base sans adjuvant BS2, on marque une amélioration significative de 19 %. Cela peut être expliqué par l'effet principal des superplastifiants, dotés d'une meilleure distribution des grains de ciment, et par conséquent d'une meilleure hydratation. Cela pourrait expliquer aussi, pourquoi dans certains cas, les superplastifiants augmentent la résistance du béton à un rapport E/C constant.[19]

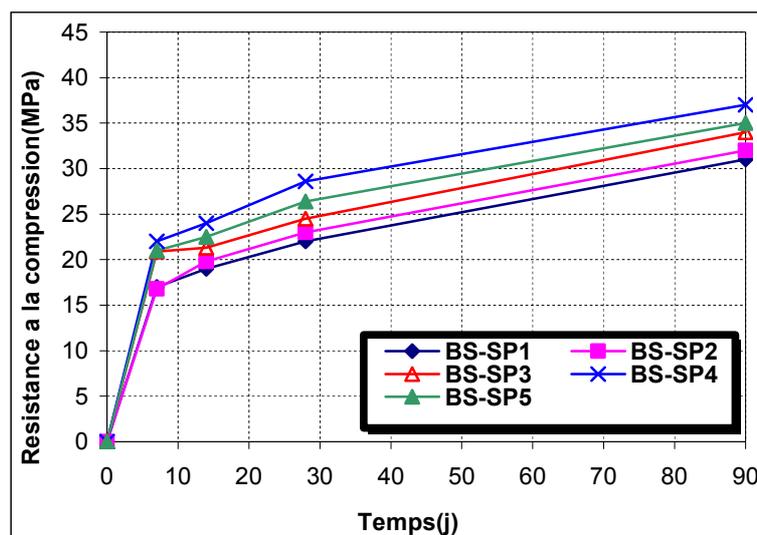


Figure 4.6 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du SP

Nous pouvons ainsi voir d'après les figures (4.7) et (4.8) une augmentation de résistance à la compression en fonction du superplastifiant jusqu'au pourcentage de 2%, où on enregistre l'optimum de la résistance et du dosage du superplastifiant. Au delà de cette valeur on remarque une chute de résistance qui se caractérise par un surdosage du superplastifiant. On constate que le point de saturation est à 2% de superplastifiant.

On adopte ce pourcentage dans notre composition pour toutes nos formulations qui suivent, tout en réduisant le rapport E/C.

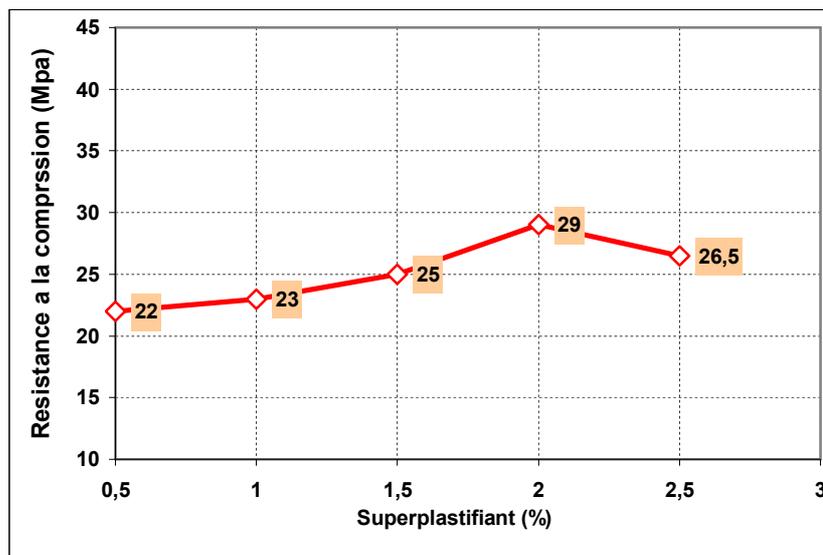


Figure 4.7 : Effet du superplastifiant sur la résistance à la compression à 28 jours

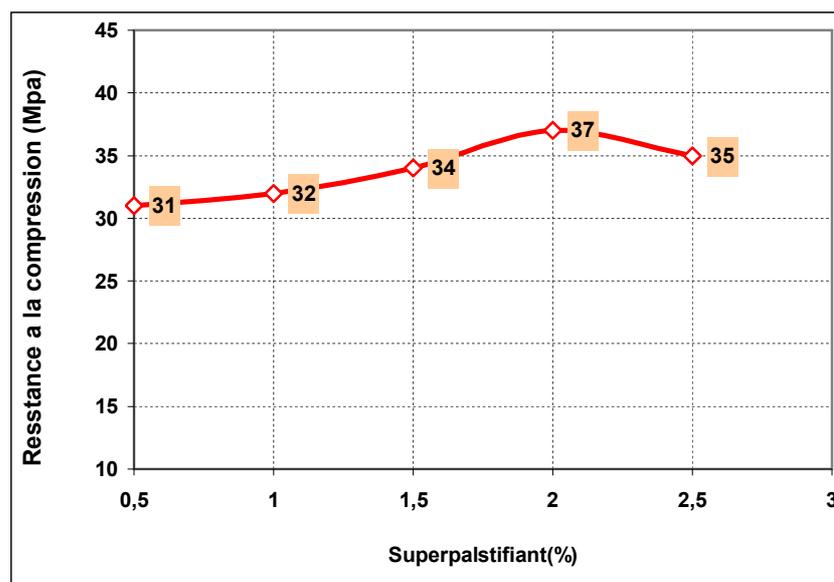


Figure 4.8: Effet du superplastifiant sur la résistance à la compression à 90 jours

4.2.2.3/ Résistance à la traction

Pour l'effet du superplastifiant sur la résistance à la traction, on remarque d'après les courbes présentées à la figure (4.9), qu'il y a une amélioration avec le béton BS-SP2 de 7MPa pour un dosage 1%. En comparant ce résultat à celui du béton sans superplastifiant BS2, on trouve que cette augmentation est modérée de 10%. Pour le béton BS-SP4, on a la valeur de 6.5 MPa avec un faible écart type. On constate la même remarque pour les autres formulations. Il n'y a pas de différence importante. Mais on enregistre une amélioration modérée de la résistance à la traction avec l'ajout du superplastifiant. Ces résultats modérés peuvent être expliqués tout simplement par l'excès de la quantité d'eau qui reste sans aucun doute le principal paramètre influençant la fluidité du béton. En fait, l'addition de l'eau peut diminuer les contraintes de cisaillement dues à la cohésion et au frottement interne dans le béton ; ce qui rend par conséquent sa viscosité plus faible et engendre de faibles résistances.

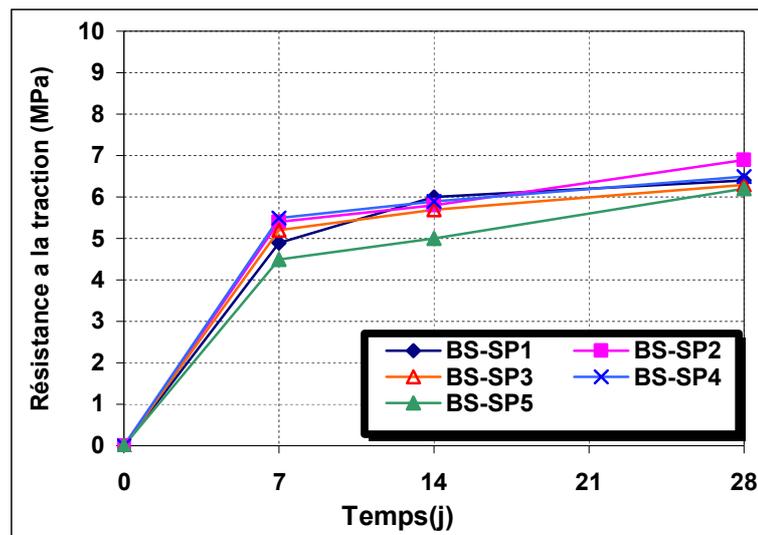


Figure 4.9: L'évolution de la résistance à la traction en fonction du temps et du SP

4.2.3/ Influence de la réduction du rapport E/C

Après sélection de la formule la plus performante de la deuxième série, on a fixé le dosage du superplastifiant à 2%, on doit réduire le rapport E/C afin d'avoir un béton plastique et plus performant. Cette fois en se basant sur les trois critères : la maniabilité, la résistance à la compression et la résistance à la traction.

La formule de base utilisée ci-dessus est : BS-SP4, d'après la composition présentée au tableau (4.3)

Tableau 4.3 : Composition du béton de sable BS-SP4

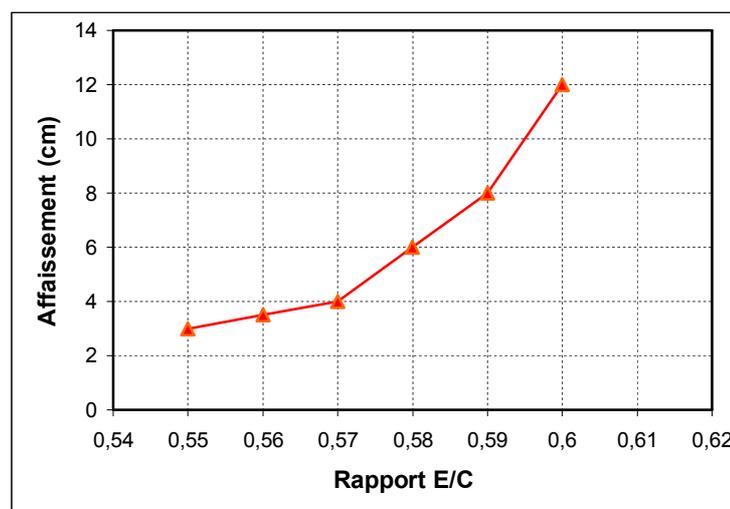
Sable (Kg/m ³)	Ciment (Kg/m ³)	Filler (Kg/m ³)	Superplastifiant (%)	E/C
1480	350	180	2	0.75

On a supposé un intervalle de variation du rapport E/C entre [0.5 - 0.7] avec plusieurs gâchés. En testant la maniabilité, on a pu minimiser cet intervalle de variation du rapport E/C entre [0.55 - 0.6] et on a commencé à chercher la phase plastique pour notre béton.

Pour cette phase d'essais on a trouvé des difficultés à contrôler la maniabilité de notre béton, probablement reliée à l'effet du superplastifiant qui accélère la prise et donne une fausse prise. Ainsi qu'à la température élevée, pendant les mois d'été (mai, juin).on aurait du introduire un retardateur de prise a notre mélange, mais c'est hors programme.

4.2.3.1/ Maniabilité

On a commencé notre confection, en contrôlant la maniabilité avec le cône d'Abrams où on a remarqué, d'après la courbe présentée sur la figure (4.10), la phase plastique est dans l'intervalle du rapport E/C [0.57 - 0.60], aussi on a limité le nombre de formulations à quatre (04), c-à-d, 04 points à prendre en considération pour varier le rapport E/C pour 04 types de béton à tester dans cette série au lieu de 06.(gagner du temps et du matériau).

**Figure 4.10:** Effet du rapport E/C sur l'affaissement

4.2.3.2/ Résistance à la compression

Les résultats d'essais de compression présentés aux courbes de la figure (4.11) montrent le développement de la résistance en fonction du temps de l'ordre de 30 à 35 MPa à l'âge de 28 jours et de 39 à 45 MPa à l'âge de 90 jours. Ce qui marque une évolution importante par rapport à celui du béton de référence BS-SP4 avec $E/C = 0.75$. Et c'est logique à cause de la diminution du dosage d'eau et l'effet du superplastifiant qui contribuent à l'amélioration des résistances à la compression. On constate un faible écart de différence entre les 04 mélanges pour cette série, toute en notant que la meilleure résistance est donnée par la formulation BS-SPE2 avec $E/C = 0.59$

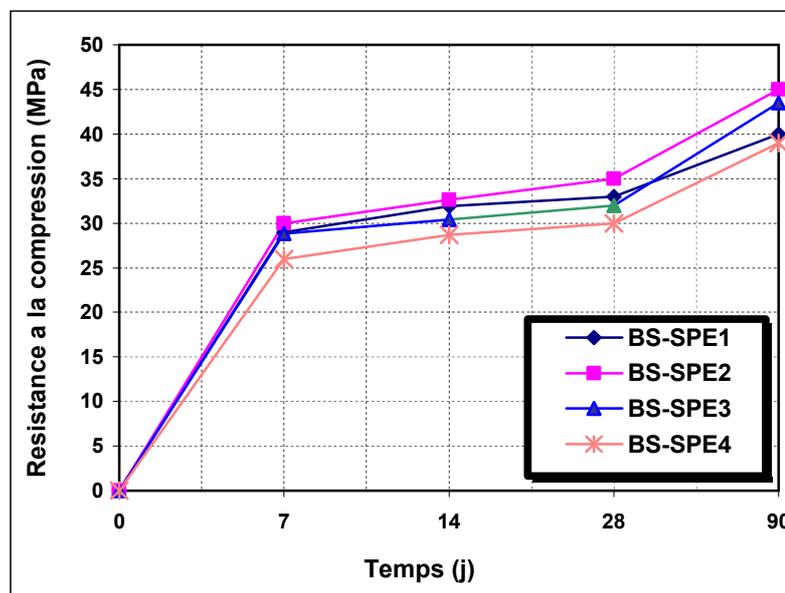


Figure 4.11: L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du E/C

On observe bien les résultats montrés par les courbes présentées aux figures (4.12) et (4.13). On enregistre la résistance optimale à la compression en fonction du rapport E/C par la formulation BS-SPE2 avec $E/C = 0.59$ pour les deux âges 28 et 90 jours, ce qui distingue le rapport E/C avec 0.59 ainsi que la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation. Mais au delà de ce rapport, l'excès d'eau reste sans aucun doute, le principal paramètre influençant la fluidité du béton qui a fait chuter la résistance. En fait, l'addition de l'eau peut diminuer les contraintes de cisaillement dues à la cohésion et au frottement interne dans le béton et rend, par conséquent, sa viscosité plus faible. On peut observer, aussi qu'avec $E/C < 0.59$ on a des résistances moins faibles, d'où on a constaté une légère différence entre les valeurs qui est de

(8 à 14%). On peut avoir des gains de résistances avec ces rapports, mais en variant le dosage du superplastifiant.

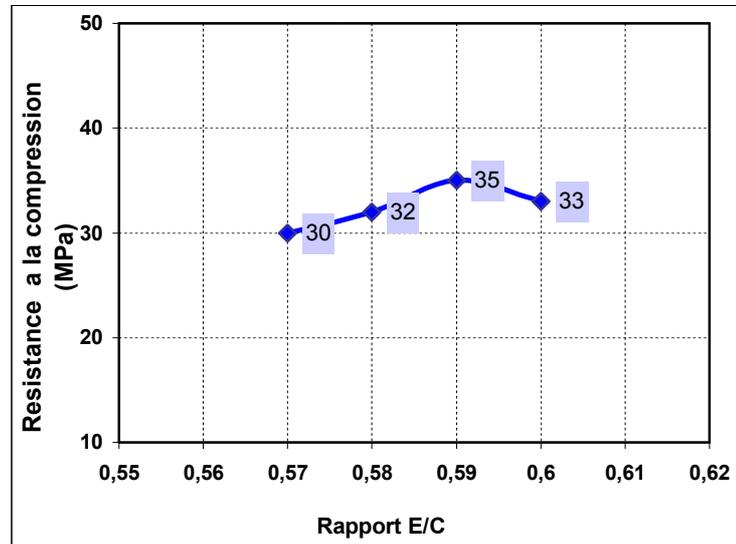


Figure 4.12: Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression à 28 jours

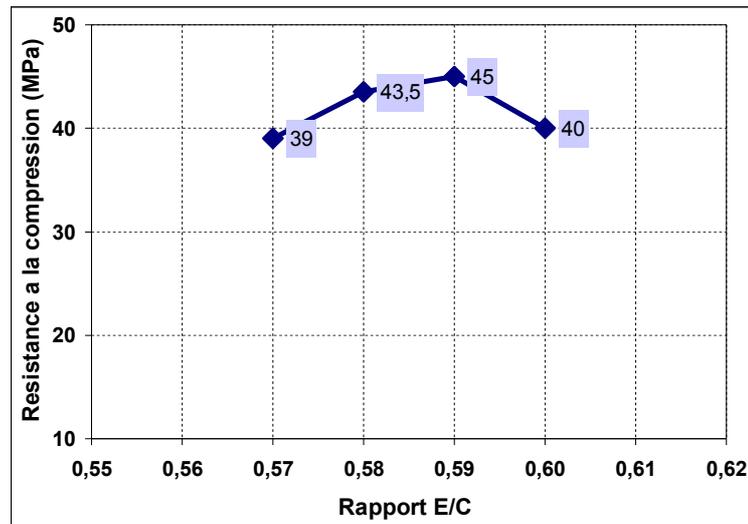


Figure 4.13: Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression à 90 jours

4.2.3.3/ Résistance à la traction

Les résultats d'essais de traction présentés par la courbe de la figure (4.14), illustre la valeur optimale de la résistance en traction en fonction du rapport E/C marqué par la valeur de 6.95 MPa à 28 jours. On remarque qu'il n'y a pas une amélioration significative de la résistance à la traction comparativement au béton BS-SP4 avec E/C = 0.75 de la 2^{ème} série.

Mais on enregistre que la valeur optimale de la résistance à la traction, a été donnée par BS-SPE2 avec $E/C = 0.59$, comme il est mentionné à la figure (4.15).

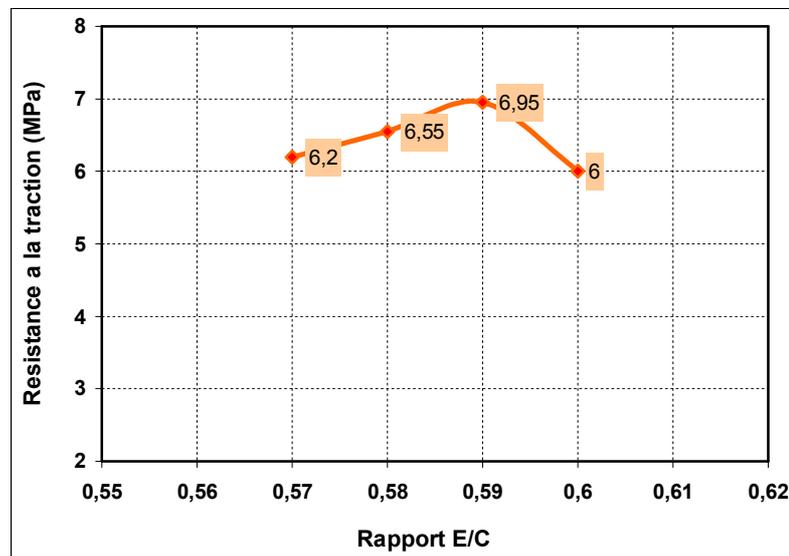


Figure 4.14: Effet du rapport E/C sur la résistance à la traction à 28j

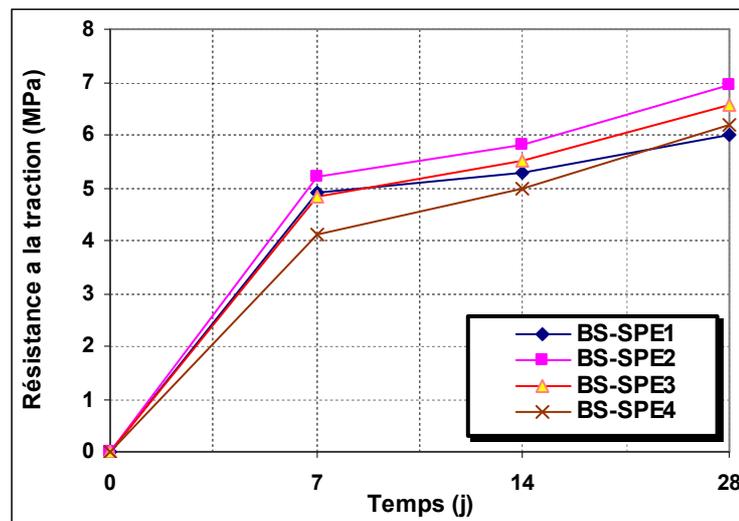


Figure 4.15: L'évolution de la résistance à la traction en fonction du temps et du E/C

4.2.3.4/ Retrait du béton de sable (BS-SPE2)

Les résultats de retrait du béton de sable de notre étude expérimentale, sont des mesures de retrait total (retrait endogène+ retrait de séchage). En effet au manque des moyens, on s'est limité à mesurer le retrait total. On a sélectionné la formulation BS-SPE2 pour mesurer le retrait, qui sera prise comme référence aux étapes qui suivent. Les déformations de retrait du matériau béton de sable BS-SPE2 présentées par la courbe donnée

par le graphe (4.16), ont montré une amplitude de retrait importante de $426\mu\text{m/m}$ à 28 jours, ce qui est tolérable, sachant bien que les bétons de sable ont une tendance de retrait élevé. Pour sa part, A.Benaïssa a remarqué une amplitude de $592\mu\text{m/m}$ à l'âge de six mois. Par contre, Z.Boudaoud a enregistré un retrait de $678\mu\text{m/m}$ à l'âge de 30 jours, qui reste une amplitude moyenne pour notre béton. Les résultats donnés par le graphe (4.17), montrent les pertes de masse du BS-SPE2 enregistrées durant les 28 jours. On enregistre une perte importante, qui atteint 4%. Comme A.Benaïssa l'a constaté, que le séchage du béton de sable se manifeste très rapidement et ce, dès les 1^{ères} heures [32], qui retourne à l'uniformité de séchage des BS. On peut dire aussi qu'il y a un développement de retrait très rapide pendant les 7 premiers jours, d'où on a remarqué après, les déformations de retrait se stabilisent rapidement. A.Benaïssa a confirmé ces résultats [28] [32] d'après son étude comparative au béton ordinaire.

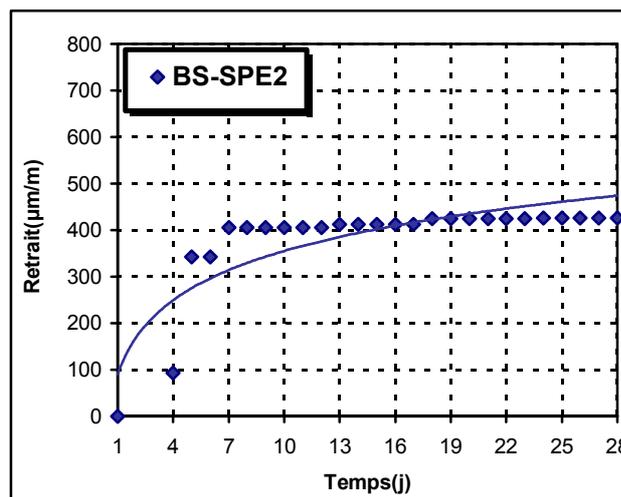


Figure 4.16: Déformation du retrait du béton de sable BS-SPE2

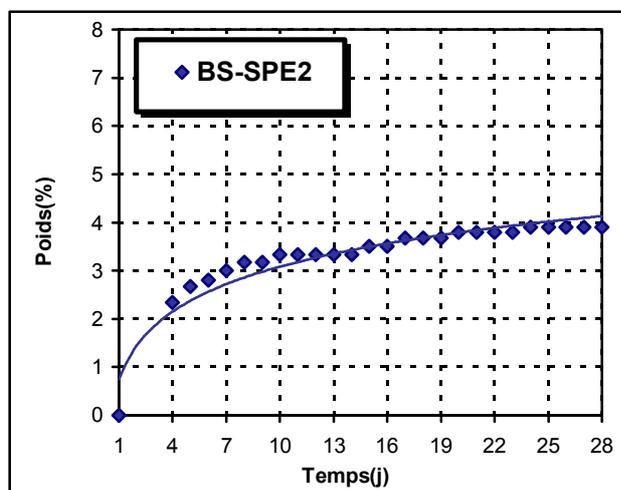


Figure 4.17: Pertes de masse du béton de sable BS-SPE2

RESULTATS /

Dans cette 1^{ère} partie expérimentale, on a essayé de formuler notre béton de sable en se basant sur le critère d'optimisation des caractéristiques mécaniques. En 1^{er} lieu la résistance à la compression tout en visant la compacité. On a formulé 03 séries :

- Dans la 1^{ère} série (BS), nous avons préparé au total 05 mélanges avec différents dosages en filler calcaire et nous avons sélectionné la formulation la plus performante (BS2) avec un dosage 180 Kg/m³, on a enregistré le meilleur résultat de résistance à la compression qui est de 25 MPa à 28 jours.
- Dans la 2^{ème} série (BS-SP) à partir de la formulation performante BS2 de la 1^{ère} série, on a aussi préparé 05 mélanges, tout en introduisant le superplastifiant MEDAFLOW 30 à des pourcentage différents. Après ces séries d'essais, on a sélectionné le béton BS-SP4 à 2% en dosage du superplastifiant avec une résistance à la compression de 29MPa à 28 jours. On a enregistré une évolution de 16 %.
- Pour la 3^{ème} série (BS-SPE), nous avons préparé 04 mélanges à partir de la formulation BS-SP4, en a fixé le dosage en superplastifiant à 2%, nous avons aussi varié le rapport E/C pour diminuer la quantité d'eau afin d'obtenir un béton plastique avec une meilleure compacité. Duquel on a sélectionné le béton SB-SPE2 avec un rapport E/C=0.59, un affaissement (F=8cm), une résistance à la compression de 35 MPa à 28 jours, et une résistance à la traction de 6.95 MPa. Le retrait total est de 426µm/m avec une perte de masse de 4% à l'âge d'un mois.

Après toutes ces séries d'essais et de gâchés, on a pu trouver la composition SB-SPE2 qui reste la seule performante, qui sera destinée à la réparation. Le béton choisit sera celui de référence dans la 2^{ème} partie expérimentale qui est caractérisé par les valeurs présentées au tableau 4.4 ci-dessous.

Tableau 4.4 : Caractéristiques du béton de sable témoin BS-SPE2

Affaissement	Rc28 (MPa)	Rc90 (MPa)	Rt28 (MPa)
8 cm	35	45	6.95

4.3/FORMULATION DU BETON DE SABLE DESTINEE A LA REPARATION

Dans cette étape on prépare des bétons de réparation avec la formulation BS-SPE2 qui sera par la suite une référence. On a introduit ensuite différents ajouts pour voir leurs effets sur les propriétés mécaniques et hygrométriques.

La composition de base pour notre béton de référence est présentée au tableau 4.5 :

Tableau 4.5 : Composition du béton de sable témoin BS-SPE2

Sable (Kg/m ³)	Ciment (Kg/m ³)	Filler (Kg/m ³)	Superplastifiant %	E/C
1480	350	180	2	0.59

4.3.1/ Addition du fumée de silice

Par sa surface spécifique et sa grande finesse, la fumée de silice avec un dosage inférieur a (8 à10 %) du poids de ciment, permet d'obtenir des bétons plus denses avec une porosité très fine, plus imperméables et donc plus durables. A cet effet, et afin d'améliorer les performances de notre béton de sable (**BS-SPE2**), résultant de la formulation de la 1^{ère} série, on a pensé introduire la fumée de silice comme ajout, ou elle joue le rôle de filler. On substitue donc une quantité de filler calcaire et on la remplace par un pourcentage de fumée de silice. Pour cette série on a pris deux variantes de F.S (5 et 8) %, afin de voir leurs effets sur les caractéristiques mécaniques et hygrométriques du B.S. la composition de cette série figure au chapitre 3 (Tableau 3.9).

4.3.1.1/ Effet de fumée de silice sur le béton frais

Pour les deux bétons de sable avec fumée de silice confectionnés on a obtenu un béton plastique avec deux valeurs d'affaissements différentes (Tableau 4.6)

Tableau 4.6 : Affaissement du béton de sable témoin avec F.S

Béton	Fumée de silice (%)	Affaissement (cm)
BS-FS1	8	12
BS-FS2	5	7

On a obtenu un mélange à une cohésion très forte avec très peu de ressuage pour les deux dosages de F.S, du a la finesse de celle-ci. Car le diamètre des grains est 100 fois plus petit que celui des petits grains de ciment, diminuant ainsi le ressuage, du fait qu' aucune eau de ressuage n'est piégée sous les gros granulats [19] [26].

4.3.1.2/ Effet de fumée de silice sur la résistance à la compression

D'après les courbes présentées à la figure (4.18), on constate une évolution de la résistance à la compression en fonction du temps, passant de 49 MPa à l'âge de 28 jours, à 55 MPa à 90 jours pour le béton (BS-FS2). Une amélioration importante, environ 40% de la résistance en compression, apparaît par rapport au béton (BS-SPE2). On enregistre, aussi une vitesse de développement importante de la résistance à jeune âge. Des valeurs de 37 et 38 MPa ont été données par les deux bétons avec F.S à 7 jours. Ce qui n'est pas le cas pour le béton témoin à 28 jours, ou on a enregistré 35 MPa seulement. La seule explication à donner, est l'effet pouzzolanique entre la silice amorphe de la FS et l'hydroxyde de calcium produit par l'hydratation du ciment Portland, qui a contribué au développement de l'hydratation du matériau restant. Cette contribution provient de l'extrême finesse des grains de F.S. Ainsi a eu lieu le développement de la résistance à court terme [19].

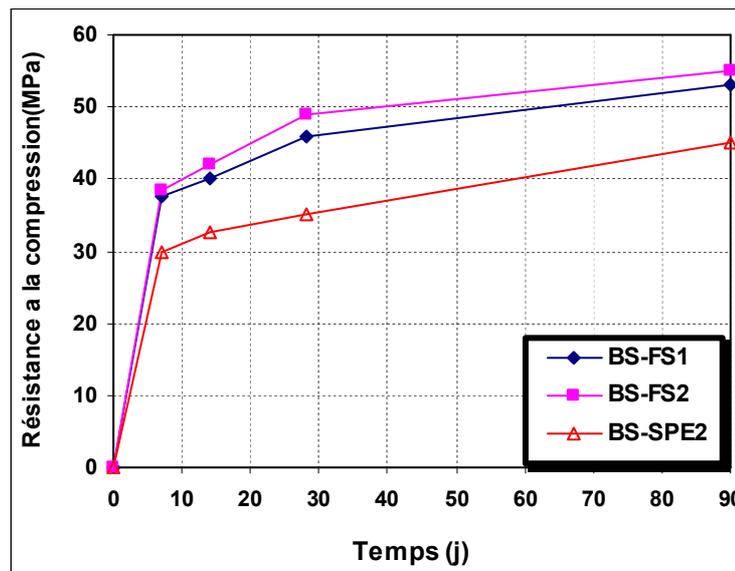


Figure 4.18: Effet du Fumée de silice sur la résistance à la compression en fonction du temps

4.3.1.3/ Effet de fumée de silice sur la résistance à la traction

La figure (4.19), montre l'évolution de la résistance à la traction des trois bétons en fonction du temps. On remarque une augmentation de 15% des deux bétons avec F.S, comparativement avec le BT (BS-SPE2). On enregistre aussi une faible différence entre les deux matériaux avec F.S. Mais la meilleure résistance est donnée par le BS-FS2 d'une valeur de 8.2 MPa à un pourcentage de 5% de F.S. Ceci reste conforme à l'hypothèse d'une cinétique d'hydratation qui est plus grande pour les bétons contenant de la F.S par l'effet filler

et par la formation de la phase liante. La fumée de silice contribue au renforcement des propriétés mécaniques du matériau durci. D'après Baroghel et Bouny (1994), les caractéristiques des interfaces pâte-granulat en sont grandement améliorées : absence de cristaux de grandes dimensions et orientés, absence de concentration de fissures, meilleure cohésion et meilleure adhérence pâte granulat [5]. L'augmentation de la qualité des interfaces a un impact direct sur la microfissuration initiale et le processus de fissuration, et c'est ce qui nous intéresse pour les réparations superficielles.

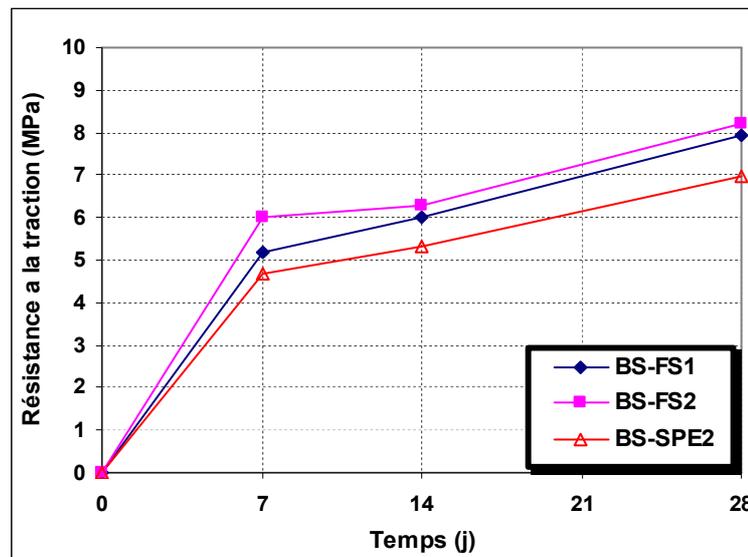


Figure 4.19: Effet du Fumée de silice sur la résistance à la traction en fonction du temps

4.3.1.4/ Effet de fumée de silice sur le retrait et la perte de masse

Les déformations de retrait des matériaux de réparation avec fumée de silice sont présentées par la figure (4.20). Chaque point sur ses courbes représente, à nouveau, la moyenne des mesures réalisées sur 2 éprouvettes identiques. Les mesures ont débuté 3 jours après la fabrication du matériau. Parallèlement au suivi des déformations de retrait, les pertes de masse des éprouvettes ont été suivies. Ces pertes sont exprimées en pourcentages de la masse initiale totale de l'échantillon $(m-m_0)/m$.

Le comportement hydrique des matériaux avec et sans F.S est très différent aussi bien en terme de retrait que de perte en masse. Les 2 bétons avec F.S, qui affichent des comportements similaires, ont développé des déformations nettement plus faibles que celles mesurées sur le béton sans F.S. Ces valeurs de retrait ne dépassent pas $100\mu\text{m/m}$ à l'âge de 28 jours. C'est encourageant comme résultat. Mais pour le béton de référence, on enregistre

une différence de déformation 04 fois plus, avec une amplitude de $426\mu\text{m}/\text{m}$. C'est importante comme déformation de retrait. En comparant ce résultat à d'autre matériau destiné a la réparation dans le marché, on le trouve acceptable. Car on a aperçu que des matériaux manifestent des déformations de retrait jusqu'au $900\mu\text{m}/\text{m}$ à l'âge de 28 jours. On peut expliquer le faible retrait de notre béton avec FS, malgré le volume de la pâte plus important que celui du béton ordinaire, et un rapport E/C ordinaire, par la présence de fumée de silice qui a permis de raffiner la porosité capillaire et de rendre, ainsi, le matériau moins sensible au séchage et diminuer son retrait. C'est le cas des bétons hautes performances [14].

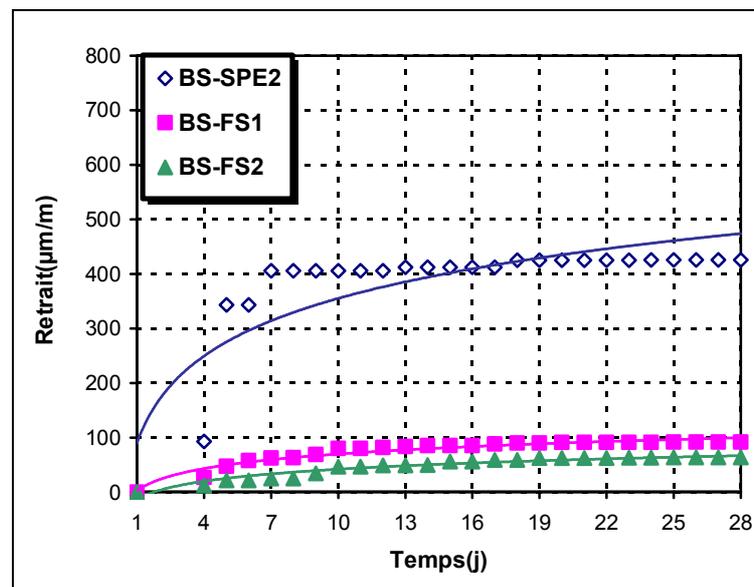


Figure 4.20: Effet du Fumée de silice sur la déformation du retrait

Pour la perte de masse on enregistre une perte importante de 4% pour le béton de référence, et au-delà de cette valeur, on remarque que les deux bétons avec FS, tel que mentionné aux courbes superposées, ont la même tendance sur la figure (4.21). En comparant les pertes de masse et les déformations du retrait de ces matériaux, on s'aperçoit d'un phénomène irréversible. En effet le matériau qui a marqué une amplitude importante de retrait a perdu moins de masse le cas du BS-SPE2. C'est tout à fait le contraire pour les Bétons avec FS. On peut donner une explication à cet état pour dire que le mécanisme de retrait par le changement de volume d'un béton au cours du séchage n'est pas égal au volume d'eau évaporé [19]. Car la perte d'eau libre, qui a lieu au tout début, entraîne peu ou pas de retrait. D'après A. Neveille les bétons qui nécessitent des rapports E/C plus élevés, comme le cas des bétons de sables, pour des raisons de maniabilité, on trouve des pores capillaires même lorsque l'hydratation est complète. Dans ce cas, la disparition de l'eau des

capillaires se fait sans provoquer le retrait. Par contre une fois l'eau des capillaires disparue, l'eau adsorbée se mobilise et cause un retrait similaire à celui pour la pâte pure. [19].

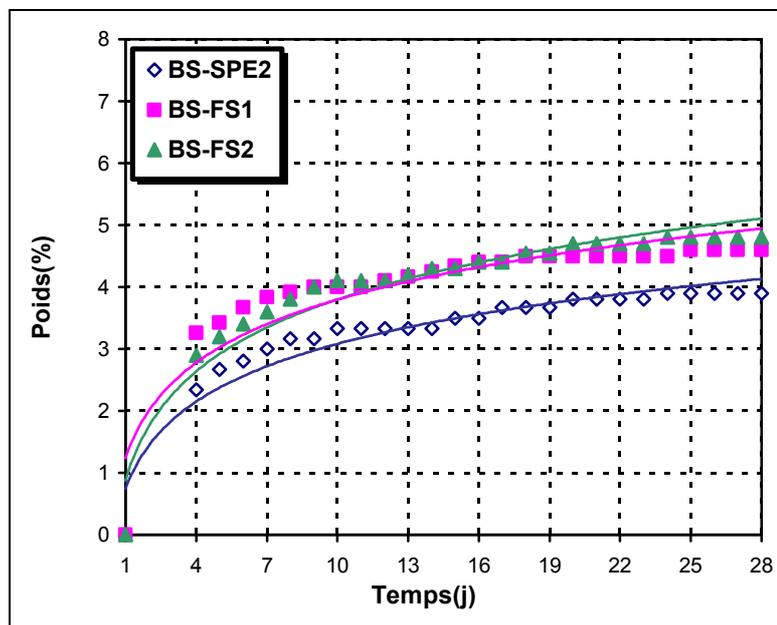


Figure 4.21: Effet du Fumée de silice sur la perte de masse

RESULTAT /

Les résultats acquis par cette série d'essais, ont montré qu'avec le béton au pourcentage de 5% de fumée de silice, on obtient de meilleurs résultats, avec un béton plastique pour un affaissement de 7cm. Nous avons enregistré aussi une résistance à la compression de 49 MPa, et une résistance à la traction de 8.2 MPa à l'âge 28 jours. Quant au retrait, on observe une amplitude de 70 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 28 jours. Dont on peut conclure que c'est un béton à retrait compensé. On enregistre l'effet de F.S dans la diminution du retrait des BS. Comme on peut dire qu'avec un dosage de 8% on obtient des résultats moins importants. Des lors, on constate un gain économique moindre pour ce dosage. Aussi on adopte le béton (BS-FS2).

4.3.2/ Addition de fibres polypropylène

On a choisi d'introduire les fibres polypropylène à notre formulation de base (BS-SPE2) pour leurs rôles efficaces dans la réparation mince car elles améliorent la résistance aux chocs, à l'écaillage et limitent les risques de fissuration dus au retrait dans les

premiers ages du béton [37]. On s'est limité à deux pourcentages (0.9 et 1.2) Kg/m³. Pour voir leurs effets sur les caractéristiques mécaniques et hygrométriques du béton de sable.

4.3.2.1/ Effet de fibres polypropylène sur le béton frais

Pour les deux bétons de sable avec fibres polypropylène confectionnés, on a obtenu un béton plastique à deux valeurs d'affaissement différentes (Tableau 4.7)

Tableau 4.7 : Affaissement du béton de sable avec fibres polypropylène

Béton	Fibres (Kg/m ³)	Affaissement (cm)
BS-FB1	0.9	5
BS-FB2	1.2	8

D'un béton homogène, plastique à deux valeurs d'affaissement, avec le mélange BS-FB2 au dosage 1.2 Kg/m³, on a obtenu un béton très plastique avec très peu de ressuage. c'est l'effet de fibres polypropylène qui a contribué à cette maniabilité. Dreux, l'a mentionné car il a constaté que les fibres polypropylène ne diminuent pas la maniabilité, mais, au contraire, aurait tendance à l'améliorer.

4.3.2.2/ Effet de fibres polypropylène sur la résistance à la compression

Nous avons observé aux courbes du graphe (4.22) des chutes de résistance pour les deux mélanges de bétons avec fibres polypropylène. On a enregistré des valeurs de résistance de compression moins importantes que celles du béton de référence BS-SPE2, soit une diminution, de 5% pour BS-FB1, et de 1.5% pour BS-FB2 à 28 jours.

On sait que les fibres en général ne jouent pas un grand rôle pour l'amélioration de la résistance à la compression. D'après Johnson W. et Al, la résistance à la compression n'est pas effectuée de façon significative par la présence des fibres et Dardar.J, a distingué la diminution de la résistance à la compression à un pourcentage minimum (0.5% du volume) pour les fibres polypropylène, ou les fibres les plus longues présentent la plus faible efficacité [40]. Toutefois, dans le cadre de cette étude, la résistance à la compression n'est pas une propriété mécanique discriminante des matériaux de réparation car ce n'est pas elle qui gouverne le comportement mécanique du système de réparation.

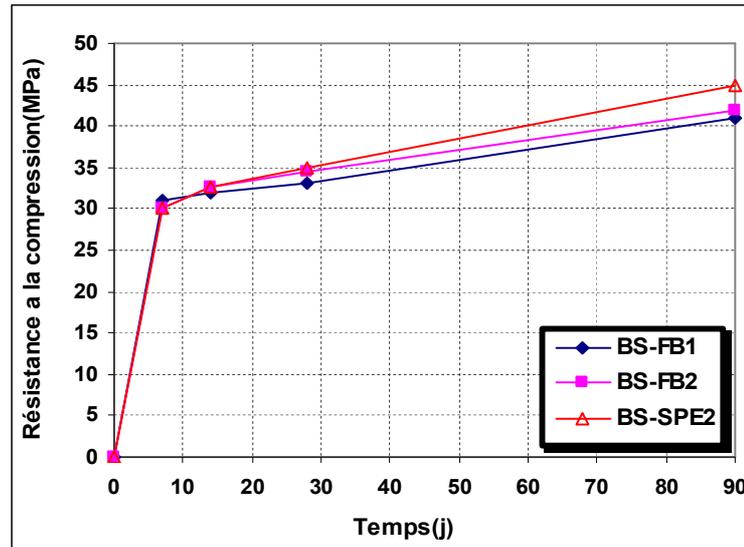


Figure 4.22: Effet de fibres polypropylène sur la résistance à la compression en fonction du temps

4.3.2.3/ Effet de fibres polypropylène sur la résistance à la traction

Les courbes présentés a la figure (4.23), montrent l'évolution des 03 bétons en fonction du temps avec la même tendance. En comparant les deux bétons fibrés au béton de référence, on trouve qu'il y a une faible amélioration pour BS-FB2. Par contre, BS-FB1 n'a enregistré aucun développement de résistance à la traction. Au contraire on a remarqué une chute de 5% par rapport au BS-SPE2. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par O.Laurance pour mortier fibré destiné à la réparation (fibres d'acier) [14]. Nous avons constaté que les fibres polypropylène n'ont aucun effet sur la résistance à la traction. On sait bien, a une moindre fragilité due à l'augmentation de la déformabilité, le béton ne se rompant plus brusquement sous l'effet de l'ouverture des fissures, mais se microfissurant et chaque fissure étant momentanément cousue par la présence des fibres qui, ainsi, retarde la rupture [37]. Et c'est le rôle principal des fibres dans les réparations minces.

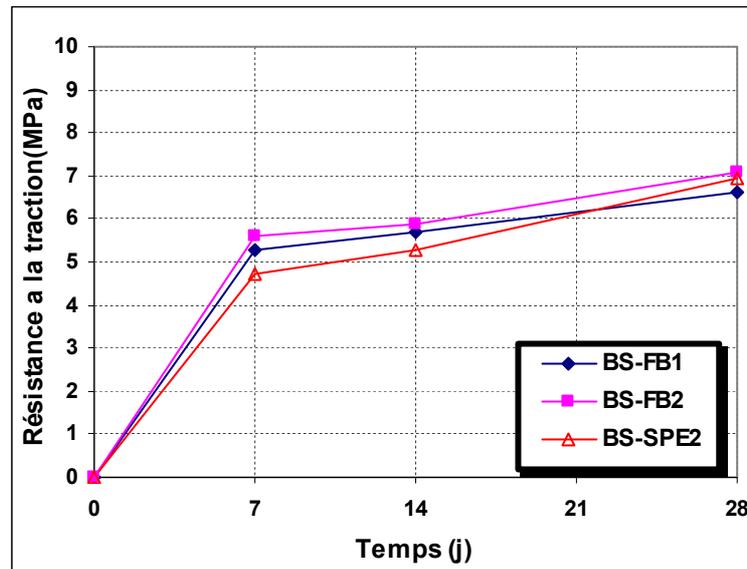


Figure 4.23: Effet de fibres polypropylène sur la résistance à la traction en fonction du temps

4.3.2.4/ Effet de fibres polypropylène sur le retrait et la perte de masse

Pour les résultats de déformation de retrait, on observe d'après les courbes à la figure (4.24), une évolution du retrait en fonction du temps, avec une différence d'amplitude. En effet la valeur de $150\mu\text{m/m}$ à 28 jours pour BS-FB1 passe à $350\mu\text{m/m}$ pour BS-FB2. On a enregistré aussi un développement d'amplitude de retrait avec l'augmentation du dosage en fibres. Mais ces amplitudes restent inférieures à celles du béton de référence. BS-FB2 avec un dosage de 1.2Kg/m^3 qui a donné plus de retrait. De même un minimum de perte de masse avec 1.4% a été enregistré figure (4.25). Par contre, le béton BS-FB1 a une perte de masse plus importante de 5% . Cette valeur dépasse celle du BS-SPE2, que l'on peut le considérer comme retrait modéré.

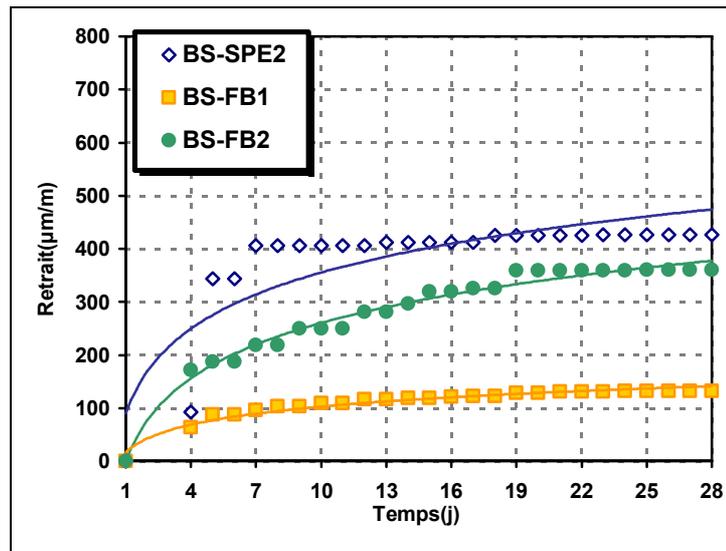


Figure 4.24: Effet de fibres polypropylène sur la déformation du retrait

Pour pouvoir trouver une explication à cet effet on a essayé de mesurer l'absorption des fibres polypropylène. Après une immersion dans l'eau pendant 24 heures, on a calculé une absorption importante égale deux fois le poids initial (200%). Après 3 jours à l'air libre, et après séchage, les fibres ont trouvé leur poids initial. Alors on peut dire comme H. Mesbah l'a constaté que, les fibres polypropylène comme les granulats ont tendance à retenir une certaine quantité d'eau [40]. De ce fait les fibres ont bien participé à la perte de masse par leur évaporation pendant les trois premiers jours de séchage. C'est la seule probabilité pour expliquer cette différence enregistrée entre les 02 bétons de fibres BS-FB1 et BS-FB2.

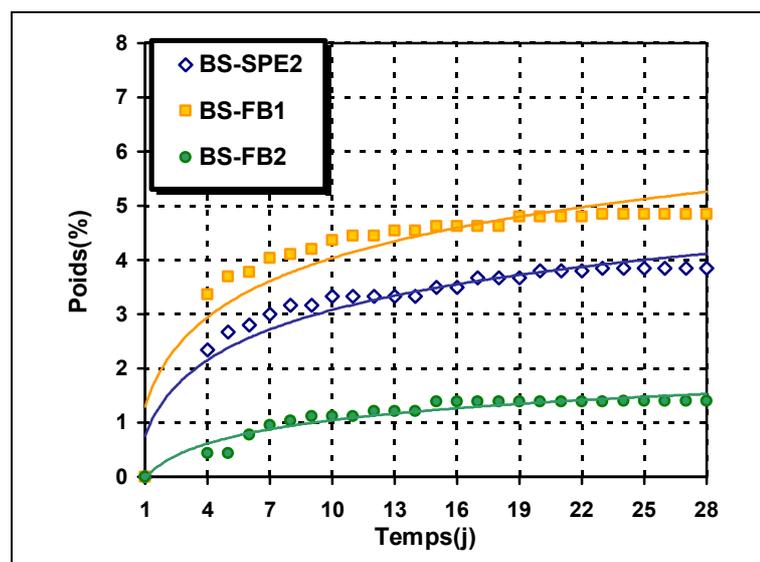


Figure 4.25: Effet de fibres polypropylène sur la perte de masse

RESULTAT /

Les résultats obtenus par les bétons fibrés avec cette série d'essais, nous ont montré qu'avec un béton au dosage de 1.2Kg/m^3 de fibre polypropylène BS-FB2, on a obtenu un béton avec une maniabilité adéquate, une résistance à la compression de 35 MPa, meilleure a celle de BS-FB1, ainsi qu'une meilleure résistance à la traction de 7 MPa à 28 jours. On a, aussi, enregistré une amplitude de retrait importante de $360\mu\text{m/m}$. C'est acceptable comme retrait à l'âge de 28 jours, avec une perte de masse moindre de 1,4%. On peut conclure que les fibres polypropylène n'ont pas donné un effet significatif à notre béton avec cette composition.

4.3.3/ Addition de latex

Dans notre étude, l'utilisation du latex a été choisie parce qu'il est reconnu que le latex permet d'obtenir des caractéristiques intéressante pour les matériaux de réparation : bonne adhésion, imperméabilisation, meilleure résistance à la traction. En effet, la plupart des mortiers de réparation sur le marché sont à base de latex. A cet effet on a voulu introduire les latex dans notre béton de sable, afin de voir leurs conséquences sur ce dernier. Le choix du latex utilisé a été pris à 2 dosages : On a remplacé une quantité d'eau par (1/2 et 1/3) de latex.

4.3.3.1/ Effet de latex sur le béton frais

Avec les deux dosages de latex, on a eu un béton homogène collant et visqueux. C'est un béton très plastique avec un affaissement $>12\text{cm}$. Un phénomène de ressuage a été observé.

Tableau 4.8 : Affaissement du béton de sable avec latex

Béton	latex (l/m^3)	Affaissement
BS-LTX1	103.25	$>12\text{cm}$
BS-LTX2	69	$>12\text{cm}$

4.3.3.2/ Effet de latex sur la résistance à la compression

Les résultats d'essais de compression donnés par les courbes de la figure (4.26), montrent le développement de la résistance à la compression en fonction du temps. On a remarqué de faibles résistances à la compression pour les deux bétons de latex.

A l'âge de 28 jours le béton BS-LTX2 atteint la même résistance que le béton de référence de 35 MPa. Le béton BS-LTX1 dépasse lui cette valeur pour atteindre 38 MPa. Au delà de cet âge, les deux matériaux avec latex commencent à se stabiliser. Ils ont présenté de faible développement de résistance. Le béton de référence ayant dépassé ces valeurs. Pour la meilleure résistance à la compression se situe à 90 jours est enregistré par (BS-SPE2). On peut commenter sur ces résultats du fait des faibles valeurs de résistances, causées par l'effet de ressuage et par la cure humide appliquée à cette série de béton de latex. Comme on l'a mentionné dans notre revue bibliographique, l'amélioration des propriétés du béton par l'addition de latex nécessite l'assèchement, au moins partiel, des pores capillaires afin que le film de polymère se forme. Cet assèchement peut se produire même dans un béton conservé humide à cause de l'autodessiccation due au processus d'hydratation si le rapport E/C est suffisamment faible. Mais plusieurs latex sont sensibles à une exposition prolongée à l'humidité. Avec la restauration des pores, le polymère retourne sous forme d'émulsion [11]. Et c'est notre cas, car on a appliqué à notre béton de latex une cure humide. On va confirmer cette explication dans la partie qui suit.

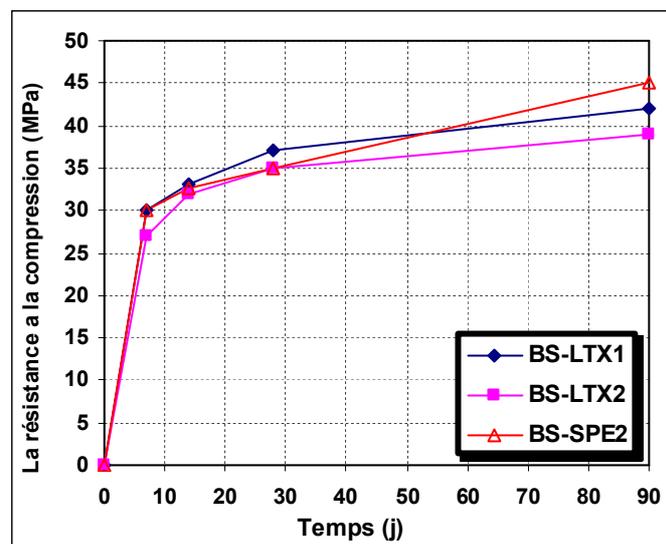


Figure 4.26 : Effet du latex sur la résistance à la compression en fonction du temps

4.3.3.3/ Effet de latex sur la résistance à la traction

Comme le montre les courbes de la figure (4.27), on distingue une faible évolution de la résistance à la traction en fonction du temps. Pour les deux mélanges aux latex et contrairement, d'ailleurs, à ce qui a été attendu du latex, il a fait affaiblir la résistance à la

traction, comparativement avec le béton de référence. Cette diminution est de l'ordre de 9% pour BS-LTX2, et de 15% pour BS-LTX1.

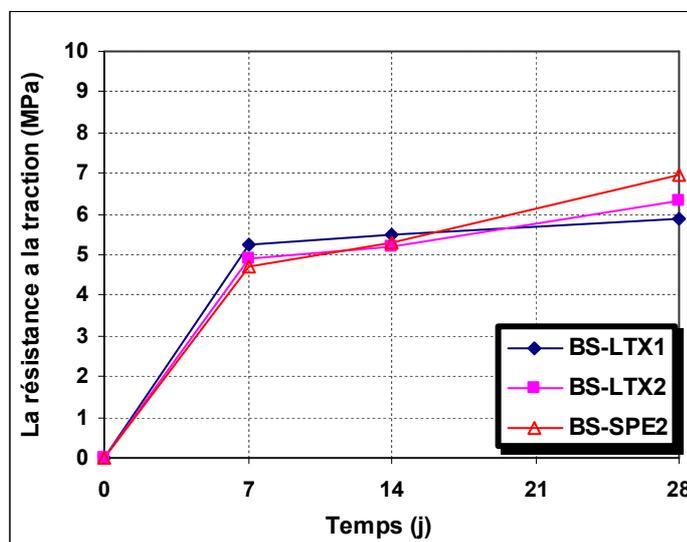


Figure 4.27 : Effet du latex sur la résistance à la traction en fonction du temps

On a constaté que la différence s'élargie au fur et à mesure de l'augmentation du dosage en latex. Afin d'avoir une explication et confirmer ainsi les causes de la cure humide, on a essayé d'en profiter des éprouvettes qui ont subi le test de retrait, qui ont été conservés à l'air libre, sans cure humide, afin d'appliquer en fin de test (28 jours) l'essai de traction, d'où on a obtenu les résultats figurant au tableau (4.9) ci-après :

Tableau 4.9 : Résultats d'essais de traction pour deux modes de cure du béton de latex

Béton	RT ₂₈ (MPa)	RT ₂₈ (MPa)
	conservation humide	conservation à l'air
BS-LTX1	5.9	8
BS-LTX2	6.3	7.5

D'après les valeurs présentées au tableau (4.9), on remarque bien la différence entre ces résultats. On constate une augmentation de la résistance due au séchage à l'air libre. Ces valeurs sont supérieures à celles du béton de référence, par l'effet positif de latex. L'explication donnée : c'est que l'eau et les additifs qui ont pu se retirer des capillaires pour que les chaînes de polymère se déposent et coagulent pour former un film qui tapisse la

surface des vides capillaires. Ce résultat confirme l'hypothèse de A.Desdevises et F.Saucier [11]

4.3.3.4/ Effet de latex sur le retrait et la perte de masse

Les déformations de retrait des matériaux de réparation avec latex sont présentées sur la figure (4.28). Chaque point sur ces courbes représente, à nouveau, la moyenne des mesures réalisées sur 2 éprouvettes identiques. Le comportement hydrique des matériaux avec latex est très différent, aussi bien en terme de retrait que de perte en masse, confrontent au béton témoin. Les 2 bétons avec latex qui affichent des comportements similaires, ont développé des déformations nettement plus faibles que celle mesurées sur le béton (BS-SPE2). Ces valeurs ne dépassent pas $100\mu\text{m/m}$ à l'âge de 28 jours. C'est encourageant comme résultat. On enregistre une différence de déformation 04 fois plus pour BS-SPE2, pour une amplitude de $426\mu\text{m/m}$. Ce phénomène s'explique par l'effet bénéfique du latex, du à la formation du film de polymère a la surface du mortier, dès le début de la période de dessiccation.

Pour les pertes de masse, on constate d'après la figure (4.29), une perte importante adjacente à celle du béton témoin sans latex. On observe bien la superposition de 3 courbes, présentant les même pertes en fonction du temps, jusqu'à l'âge de 28 jours. Au-delà de cet age, il reste à voir et à confirmer par un temps prolongé.

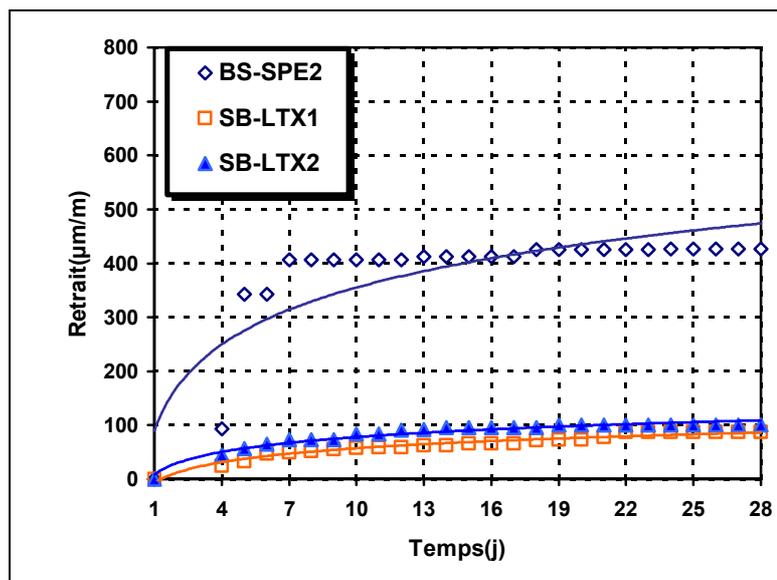


Figure 4.28 : Effet du latex sur la déformation du retrait

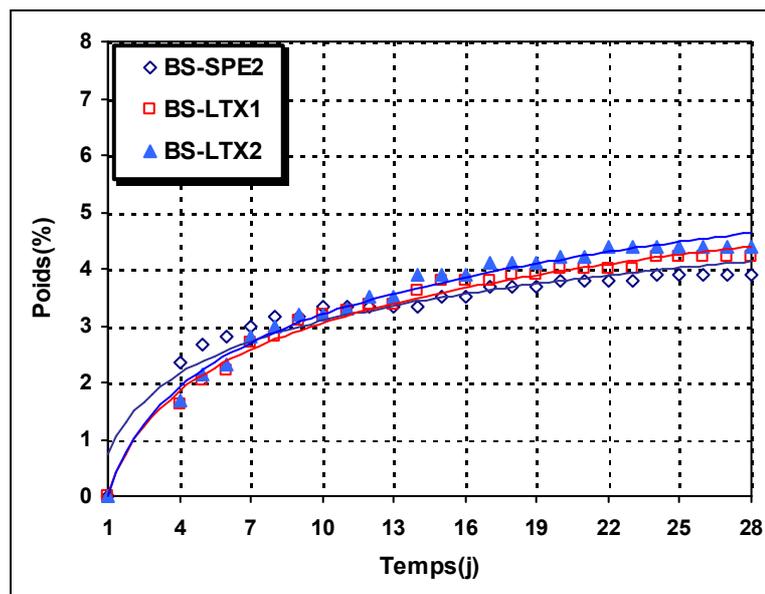


Figure 4.29 : Effet du latex sur la perte en masse

RESULTAT /

Les résultats obtenus par l'addition de latex à la formulation de base ont montré une diminution des résistances mécaniques à la compression et à la traction dus à la cure humide. On a obtenu un béton de maniabilité convenable à l'état frais. Pour le retrait, on a enregistré de faibles amplitudes pour les deux bétons avec latex. C'est très significatif comme résultats pour les matériaux de réparation.

4.3.4/ Addition d'une combinaison (fibres polypropylène + latex)

On a voulu dans cette partie, voir l'effet de la combinaison (fibre+latex) sur les propriétés mécaniques et hygrométrique du béton de sable. On fait introduire le pourcentage de fibres, ayant donné de bonnes performances au béton de référence. Comme présenté au tableau (4.10). Le dosage du latex est pris pour 1/3 d'eau, en pensant au coût (coté économique).

Tableau 4.10 : Affaissement du béton de sable avec (fibres+ latex)

Béton	Latex (l/m ³)	Fibres polypropylène (Kg/m ³)
BS-LFB	69	1.2

4.3.4.1/ Effet d'une combinaison (fibres + latex) sur le béton à l'état frais

On a obtenu un béton homogène, collant et visqueux avec une maniabilité acceptable ($F > 10\text{cm}$). Le phénomène de ressuage reste persistant.

4.3.4.2/ Effet d'une combinaison (fibres + latex) sur la résistance à la compression

Les courbes de la figure (4.30) montrent l'évolution en fonction du temps et de la résistance à la compression de 04 mélanges. Pour le béton (BS-LFB) on constate, à l'âge de 28 jours une amélioration de 10% par rapport au béton de référence. Et le contraire par rapport au deux autres bétons BS-LTX2 et BS-FB2. A l'âge de 90 jours, on a remarqué que la résistance inférieure a été enregistrée par le BS-LFB, et c'est la valeur minimale comparant au 3 autres mélanges. On peut expliquer ce résultat par premier point : le rôle limité des fibres pour la résistance a la compression, et en deuxième point : l'exposition prolongée des éprouvettes à l'humidité (cure humide). Avec la restauration des pores, le polymère s'est retourné sous forme d'émulsion [11]. L'effet de ressuage peut être mis aussi, en cause.

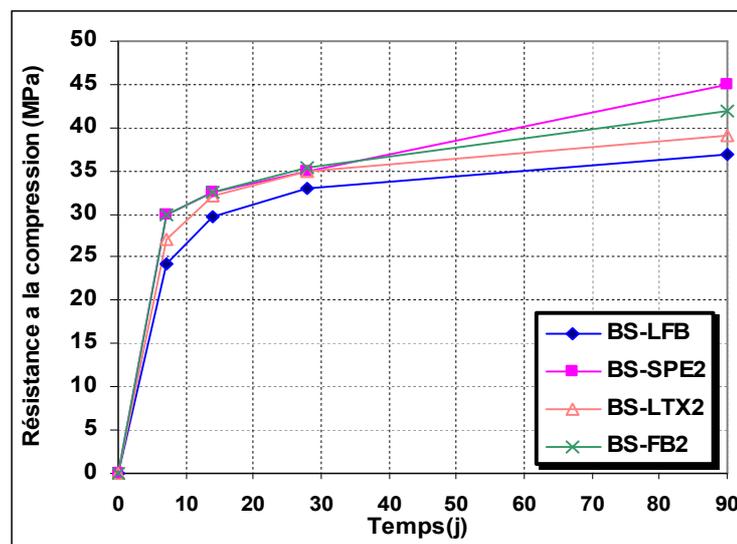


Figure 4.30 : Effet d'une combinaison fibre+latex sur la résistance a la compression en fonction du temps

4.3.4.3/ Effet d'une combinaison (fibres + latex) sur la résistance à la traction

Pour les résultats de la résistance à la traction présentés par la figures (4.31), on constate une amélioration en fonction du temps, on a obtenu pour BS-LFB le béton avec matrice (fibre+ latex), la même résistance que du béton de référence à 28 jours.

A remarquer qu'on n'a pas eu une amélioration de la résistance à la traction, ainsi, cette valeur reste inférieure à celle du BS-LTX2 et du BS-FB2. Les mêmes explications ont été données pour l'évolution de la résistance à la compression.

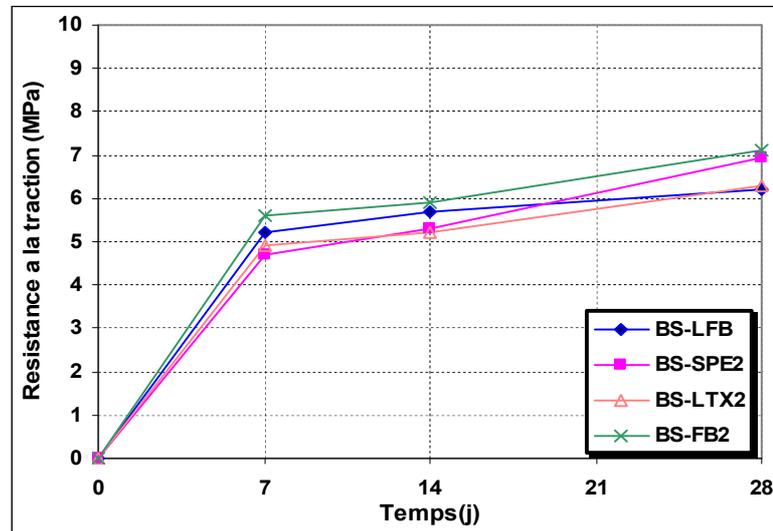


Figure 4.31 : Effet d'une combinaison fibre+latex sur la résistance à la traction en fonction du temps

4.3.4.4/ Effet d'une combinaison (fibres + latex) sur le retrait et la perte de masse

Les courbes présentées à la figure (4.32), donnent les variations de retrait des 4 matériaux. On a constaté différentes amplitudes. Soit une valeur de $130\mu\text{m/m}$ à 28 jours, pour le béton BS-LFB avec matrice (fibre+latex) qui demeure inférieure à celle du béton témoin et du béton avec fibre BS-FB2. Mais on la comparant avec celle du béton avec latex BS-LTX2, on enregistre une amplitude un peu plus élevée. Ces valeurs sont logiques sachant que les latex ont un effet de diminution des déformations de retrait.

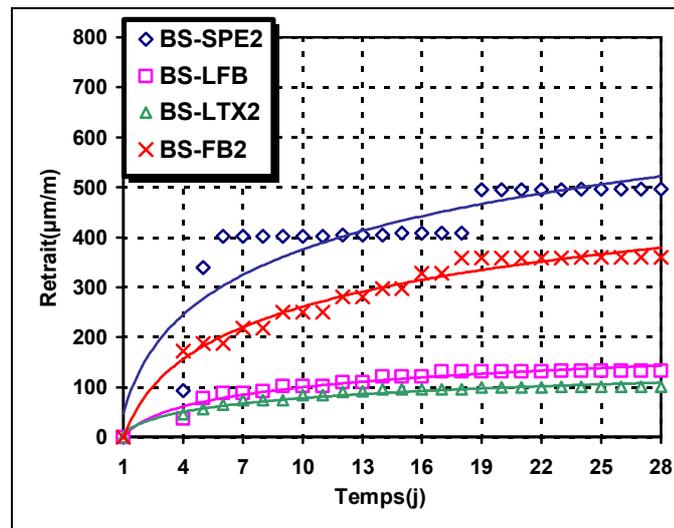


Figure 4.32 : Effet d'une combinaison fibre+latex sur la déformation du retrait

Pour les résultats de pertes en masse d'après la figure (4.33), on a enregistré une perte importante pour le béton BS-LFB dépassant 7% à l'âge de 28 jours. C'est la plus élevée. Par contre une plus faible perte de masse a été enregistrée par SB-FB2. d'où l'apparition d'un phénomène inverse. Aucune explication n'a pu être trouvée.

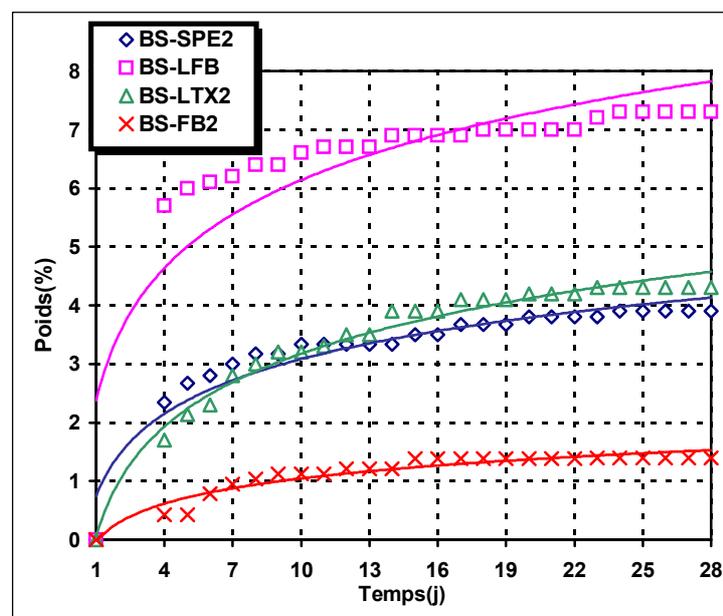


Figure 4.33 : Effet d'une combinaison fibre+latex sur la perte de masse

RESULTAT/

Les résultats obtenus par l'addition de la matrice (fibre +latex) à la formulation de base ne sont pas significatifs car les valeurs de résistance à la traction et même à la compression sont moins importantes. Des amplitudes de retraits modérés avec de perte en masse élevés ont été enregistrées avec BS-LFB. Par contre, d'autres mélanges ont donné des amplitudes de retraits moins faibles, comme les 2 bétons avec latex, et aussi le béton BS-FB2. On a constaté que cette formulation de béton avec fibres polypropylène plus latex, n'a donné aucun gain à notre formulation de base.

4.4/ CAPACITE D'ABSORPTION D'EAU DES DIFFERENTES

FORMULATIONS DE BETONS DE SABLE

La capacité d'absorption d'un béton ou mortier donne une idée sur la présence des pores. Plus le béton est compact plus sa capacité d'absorption est faible donc plus étanche. On a voulu savoir le taux de vides dans nos différents mélanges et la capacité d'absorption de chaque béton. La procédure d'essai est détaillée au chapitre 3. Chaque résultat présente une moyenne de 03 éprouvettes par béton.

Nous remarquons des résultats différents de la capacité d'absorption d'eau. Le meilleur résultat ayant enregistré la plus faible capacité est donné par le mélange BS-SF2, tel qu'il est mentionné à l'histogramme présenté par la figure (4.34). Quant à la capacité la plus élevée elle est donnée par les BS-BF2. Cela est du à la capacité importante d'absorption des fibres polypropylène, qui a été expliquée déjà au paragraphe (4.3.2.4). Pour notre béton de référence on a obtenu une valeur de 5.7%. C'est un résultat significatif comparé à ceux de Z.Boudaoud [30] et K.Gadri [31] et obtenus par les bétons de sable ordinaire. Cette performance revient à la nature du sable utilisé, le sable concassé qui contient un pourcentage important de filler. On constate également, des améliorations de compacité avec les additions introduites à notre formulation de base et en particulier, la fumée de silice. A cause de leur grande finesse, les particules de fumée de silice peuvent remplir les vides qui se trouvent entre les particules plus grosses de ciment. Surtout lorsque celles-ci ont été bien défloculées par une quantité adéquate de superplastifiant. comme elle participe aussi à procuré une faible pénétrabilité. Mais, reste une valeur importante qui n'a pu être expliquée de la capacité d'absorption de 5%, obtenue par BS-FS1 avec 8% de FS. La seule explication à donner est l'excès du dosage en F.S avec ce pourcentage et avec lequel on a eu une résistance à la compression moins importante que BS-FS2 à un dosage de 5%. On a remarqué aussi qu'avec

le latex on a observé de faibles absorptions pour BS-LTX1 et BS-LTX2. La plus faible valeur a été relevée avec le dosage de E/2 latex. Les capacités élevées d'absorption d'eau été enregistrée aussi par le béton à la combinaison fibres+latex. Malgré la capacité d'absorption des fibres polypropylène, la valeur d'absorption du BS-LFB est plus faible que le béton fibré. Ceci grâce au latex et au film de polymère qui se forme à la surface du mortier dès le début de la période de dessiccation.

Nous avons remarqué qu'il y a une relation irréversible entre l'absorption et la résistance à la compression. On constate que la capacité d'absorption d'eau s'affaiblit avec l'augmentation de la résistance en compression. Le matériau qui a donné meilleure résistance à la compression, a enregistré la plus faible absorption. Et ça s'explique par la compacité des matériaux.

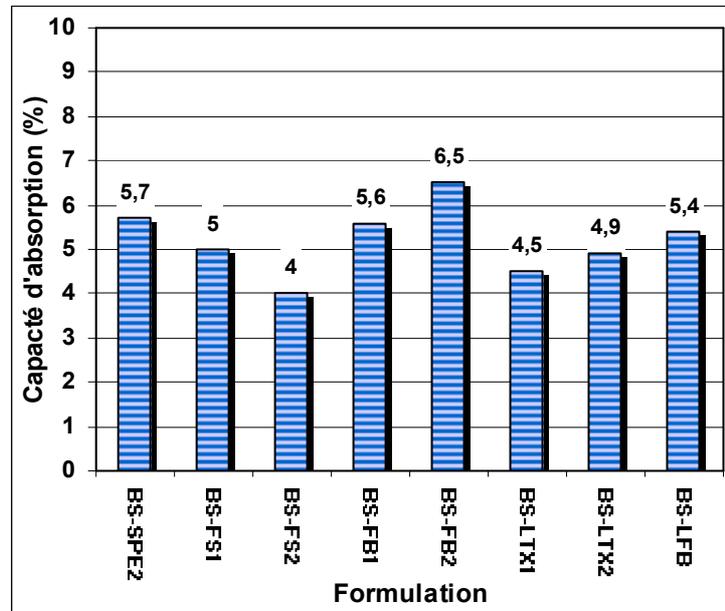


Figure 4.34 : Capacité d'absorption d'eau des différentes formulations

4.5/ MODULE D'ELASTICITE DES DIFFERENTS MATERIAUX

Le module de Young du matériau est en effet un paramètre important dans le contexte des réparations minces sous chargement hydrique. Pour un même niveau de déformation de retrait libre, plus le matériau de réparation sera rigide et plus les contraintes de traction seront importantes du fait de la plus grande restriction offerte aux déformations.

A cet effet, pour mieux comprendre le comportement de nos matériaux, connaître leur intervalle de déformation, et déterminer aussi toutes leurs caractéristiques mécaniques, on a

essayé de calculer leur module d'élasticité. Les résultats de module d'élasticité en compression donnés au tableau (4.11), sont calculés par la formule suivante : (extrait du BAEL91 [24])

$$E_{ij} = 8100 f_{cj}^{1/3} \text{ (MPa)}$$

Tableau 4.11: Valeurs du Module d'élasticité des matériaux de réparation

Matériau	E₂₈ (MPa)	E₉₀ (MPa)
BS-SPE2	26500	28810
BS-FS1	29022	30426
BS-FS2	29640	30804
BS-FB1	25980	27930
BS-FB2	26370	28156
BS-LTX1	26990	28156
BS-LTX2	26500	27469
BS-LFB	25980	26990

Nous pouvons ainsi voir la différence des résultats présentés au tableau (4.11) et par l'histogramme donné par la figure (4.35) ou cette différence est modérée. Le matériau qui a donné la meilleure résistance à la compression, a enregistré le module le plus élevé. Ce matériau est désigné par le béton avec fumé de silice. En comparant ces valeurs à celles du béton ordinaire et d'autres matériaux destinés à la réparation, on les trouve plus faibles. On constate d'après ces valeurs que les bétons de sable sont plus déformables quelles que soit les additions à introduire à leurs composition. Il en est même pour leurs valeurs de résistances à la compression. D'après ces résultats calculés, d'où A.Benaïssa l'a constaté, les modules d'élasticité des bétons de sables sont inférieurs à ceux du bétons ordinaire d'où une plus grande déformabilité et donc moins de fissuration [28]. Ces résultats sont toutefois jugés satisfaisants pour l'utilisation qui en sera faite. Et les différences enregistrées de module de Young de nos matériaux indiquent, par avance, les différences de comportement mécanique entre les réparations réalisées avec chaque matériau.

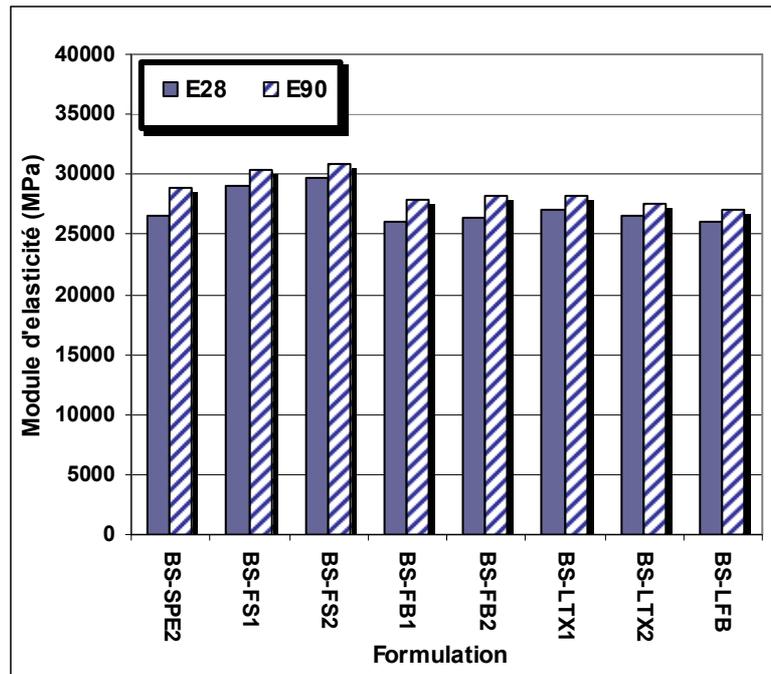


Figure 4.35 : Variation du module d'élasticité des différents matériaux

4.6/ REPARATION DES ELEMENTS EN BETON

Pour étudier la réponse des réparations minces, voir l'effet de séchage sur le comportement du matériau béton de sable qu'on a fabriqué et afin de tester sa compatibilité déformationnelle ainsi le taux d'adhérence au support, on a essayé, avec nos propres moyens modestes, de réparer 06 éprouvettes en béton ordinaires de formes prismatiques (10X10X40) cm avec des surfaces préparées à l'avance. La procédure de préparation de surface été expliqué au chapitre 03. Pour les bétons de réparation, on en a sélectionné 04 qui sont présentés au tableau (4.12). On a aussi varié aux conditions de surfaces, en prenant 02 variantes :

- Saturée surface sèche (SSS) : Il semble que cet état hydrique de surface soit la condition optimale pour l'obtention d'une bonne adhérence, d'après (Saucier, 1990).
- Emploi d'agent de liaison (latex) : Selon plusieurs auteurs Felt et Saucier, l'agent de liaison n'augmente pas l'adhérence au support. Par contre Cleland et long montrent son effet bénéfique, ou il aide à augmenter la résistance de l'interface.

A cet effet, on a voulu varier à la condition de surface pour voir l'effet de ces paramètres.

On a 06 éléments à réparer. Pour ce petit nombre, on s'est limité à ces deux conditions de surface, de telle façon à prendre 03 éprouvettes à chaque condition, tableau (4.12) :

Tableau 4.12 : Béton de Réparation et conditions de surface

Béton	Nombre d'éprouvettes	Etat de substrat (SSS*)	Agent de liaison
BS-SPE4	1	+	-
BS-FS2	1	+	-
BS-LTX2	1	+	-
BS-SPE4	1	-	+
BS-FS2	1	-	+
BS-LFB	1	-	+

SSS* : saturé surface sèche

Par les photos (4.1) on montre l'état des éprouvettes avant et après réparation.

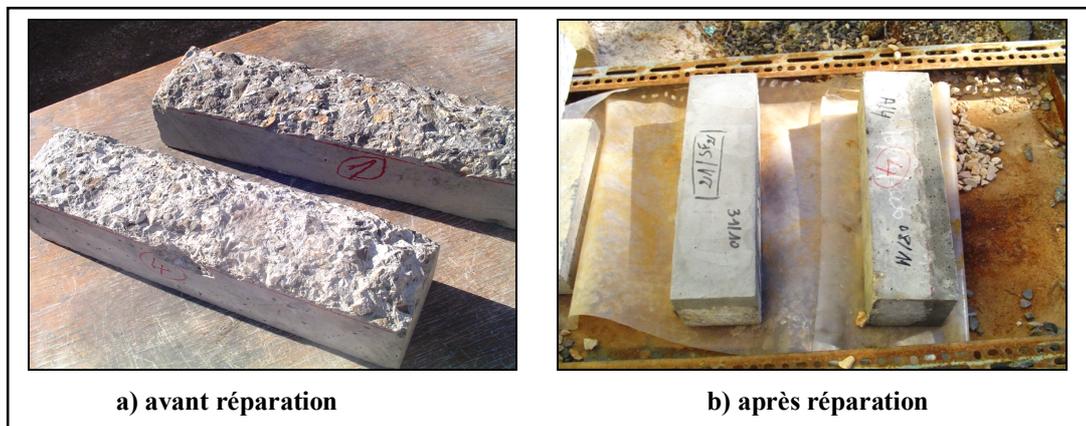


Photo 4.1 : Etat d'éprouvettes avant et après réparation de surface

4.6.1/ Procédure de réparation

Pendant les deux jours qui ont précédé la mise en place des matériaux de réparations, la surface des 03 supports a été arrosée périodiquement de façon à se placer en condition saturée -surface sèche (SSS). Il semble en effet que cet état hydrique de surface soit la condition optimale pour l'obtention d'une bonne adhérence, d'après [Saucier et Pigeon, 1996]. Mais pour les trois autres supports, la surface a été arrosée au moins une heure (01) avant la confection du mortier. Pour cette série, l'application de la couche mince de latex, comme agent de liaison, s'effectue dans les minutes qui suivent l'application du matériau de réparation.

On a pris les moules prismatiques (10x10x40) a confection du béton comme coffrage pour les éléments de réparation afin de facilité la tache de mise en œuvre. Après malaxage et préparation du mélange, on procède à la mise en place du mortier à l'aide d'une spatule d'acier. On déverse le mortier sur la surface rugueuse à l'aide de la spatule ; on le répartit sur l'ensemble de la surface à une épaisseur de 3 cm, puis on met l'ensemble (support réparé) a une vibration légère afin d'assurer le meilleur contact possible avec le support, de façon a éviter les vides de compaction. Finalement, la surface est arasée à l'aide de la spatule afin d'obtenir une épaisseur relativement constante.

Dès la mise en place des réparations, une cure à l'eau et une protection contre le séchage ont été appliquées pendant 3 jours à l'aide de toile textile maintenue humide et d'un film en plastique[9][14]. À l'issue de cette période de mûrissement, les réparations ont été exposées aux conditions de température et d'humidité extérieures.

4.6.2/ Evaluation de la compatibilité déformationelle

Les réparations effectuées subissent une cure humide pendant 03 jours. Ensuite les 06 éprouvettes sont exposées aux conditions climatiques extérieures, similaires à la réparation in situ. On a suivi le comportement de nos réparations en deux étapes :

- Conditions de séchage seul.
- Sous chargement (contrainte de compression).

4.6.2.1/ Réparations soumises au séchage seul

Les éprouvettes réparées sont exposées à l'air libre dans les conditions climatiques extérieurs pendant 04 mois : (novembre, décembre, janvier, février), à une température moyenne de 20C°.

Les éprouvettes sont stockées à l'horizontale, face réparée en dessus. Elles reposent sur 02 appuis disposés de façon à avoir une sollicitation mécanique due au poids propre minimum, comme présenté par la photo (4.2).



Photo 4.2 : Eprouvettes réparés sur le site d'exposition

Le comportement des éléments réparés était suivi durant les quatre mois et par manque des moyens, on s'est limité à contrôler leur comportement et leur état de déformation (déformations empêchées) par l'observation à l'oeil nu.

Pour voir l'adhérence et la durabilité des réparations sous l'action d'un chargement hygrométrique réel, on a suivi leur comportement durant les quatre mois de séchage. Après 28 jours de séchage, il n'y a pas d'influence sur l'adhérence des réparations. Durant les 03 mois qui suivent, on n'a noté aucune remarque importante. Les éprouvettes sont restées à leur état initial. Il ne s'est rien produit ni décollement, ni fissure, ni même de microfissures. Les réparations n'ont pas subi de déformations comme on le remarque dans la photo (4.3).

On sait que le séchage et le retrait provoquent des déformations restreintes aux réparations. Donc on est devant des conséquences hygrométriques indésirables sur le comportement mécanique et sur la durabilité des réparations minces. La différence du gradient de concentration d'eau entre le cœur (qui est presque saturé) et la surface, induit un transfert d'humidité de l'intérieur vers l'extérieur du béton. Ce transfert est évidemment très lent, du à la perméabilité très faible du matériau.

On est satisfait des résultats obtenus, qui peuvent être expliqué par le caractère spécifique des bétons de sable. Car ceux ci éprouvent un séchage rapide et uniforme, donnant un béton non fissurant.

A. Benaïssa, a montré la bonne homogénéité du matériau B.S, sa porométrie fine qui est à l'origine de la nature de séchage uniforme, est radicalement différente de celle observée dans les autres gamme de bétons. Les gradients hygrométriques entre la périphérie et le cœur du matériau (ou éprouvette) sont faibles. Par conséquent les gradients de contraintes sont, eux

aussi, faibles ; ceci a pour conséquence une faible fissuration [22] [33]. Grâce aussi à leur module d'élasticité relativement faible, qui implique une plus grande déformabilité et donc un moindre risque de fissuration.

On a essayé de donner une explication aux comportements de nos réparations avec le béton de sable. On a constaté l'effet non fissurant des bétons de sable, l'uniformité du séchage facteur principal de cette compatibilité qui contribué à l'adhérence, ainsi qu'à la durabilité des réparations. On peut dire pour conclure que le matériau B.S est soumis à peu de déformations empêchées. Il a donc une bonne capacité déformationnelle.



Photo 4.3 : Etat des éprouvettes réparées après 4 mois

Il nous reste à confirmer ces résultats par un prolongement dans le temps (1ans de minimum), variation aux conditions du substrat, à l'épaisseur de la couche de réparation, contrôler avec des moyens spécialisés comme : loupes ou lunette optique de grossissement exacte, un fissuromètre....etc.

Les résultats auxquels on a abouti sont donc basés sur un nombre d'essais assez réduit et demandent par conséquent à être confortés par des essais complémentaires.

4.6.2.2/ Réparations soumises à une contrainte de compression

Après 04 mois de séchage, on a voulu savoir comment réagissent ces réparations sous un effort de compression et connaître le taux d'adhérence au support. On a eu l'idée de préparer la presse hydraulique afin de pouvoir y mettre les éprouvettes prismatiques en position verticale, photo (4.4), puis appliquer sur elles un effort de compression de 200 KN (ce choix est arbitraire), d'où on a enregistré les résultats donnés par le tableau (4.13).



Photo 4.4 : Position des éprouvettes réparées dans la presse

Tableau 4.13 : Etat d'adhérence des réparations sous chargement

Matériau de réparation	N° support	Etat du support	Contrainte de fissuration (KN)	Etat de fissure
BS-SPE2	1	SSS	300	Fissures préjudiciables au centre de l'éprouvette sans affecter l'interface.
BS-FS2	2	SSS	270	Fissuration profonde, préjudiciable a l'interface (réparation +support), sans délaminage.
BS-LTX2	3	SSS	150	Fissuration faible au centre de l'éprouvette sans délaminage.
BS-SPE2	4	Avec latex	200	Fissuration peu profonde au centre de l'éprouvette sans délaminage.
BS-FS2	5	Avec latex	300	Fissuration légère peu profonde a l'interface (réparation +support), sans délaminage.
BS-LFB	6	Avec latex	270	Fissuration importante a l'interface (réparation +support), avec délaminage d'une partie du support.

Notre objectif pour cet essai, est de tester l'adhérence des réparations aux supports réparés

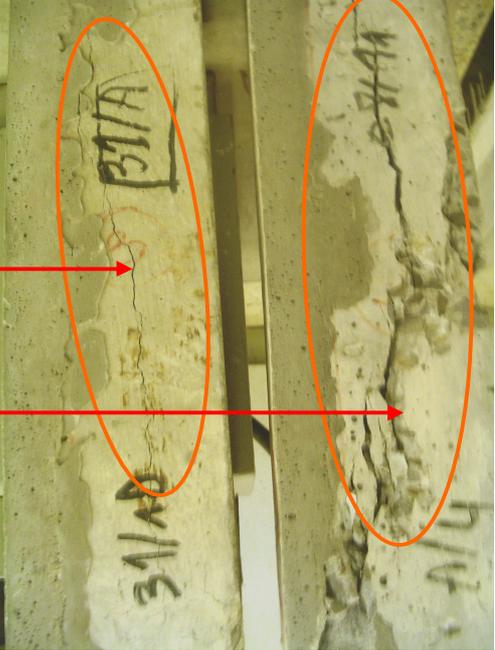
 <p>Faible fissure</p>	 <p>Faible fissure au centre du support</p> <p>Fissure préjudiciable au centre du support</p>	
<p>Support N° 3</p>	<p>Support N° 4(a gauche), N°1(a droite)</p>	
 <p>Fissure importante a l'interface</p>	 <p>Fissure importante a l'interface</p>	 <p>Faible fissure a l'interface</p>
<p>Support N° 6</p>	<p>Support N° 2</p>	<p>Support N° 5</p>

Photo 4.5 : Etat de fissure pour chaque réparation

Après application d'essai, on a obtenu les résultats figurant au tableau (4.13). Ces résultats indiquent le taux d'adhérence pour chaque matériau de réparation au support. Comme observé sur les photos (4.5), on a relevé les constatations suivantes :

- Pour le matériau BS-SF2 (béton de sable avec fumée de silice), on a noté une adhérence plus importante au support avec agent de liaison latex, (support n° :5). Au contraire au support n°2 dans des conditions (SSS), des fissures profondes à l'interface sont apparues.
- Pour les matériaux avec latex BS-LTX2, on a remarqué une légère fissuration au milieu de support n° 3 mais loin de l'interface. A la condition de support SSS, on constate le rôle bénéfique du latex dans la composition des matériaux de réparation.
- Pour notre béton de référence BS-SPE2 (béton de sable sans addition), on remarque bien, avec le support n° 1 au condition de substrat (SSS), des fissures préjudiciable avec délaminage partiel de la couche de réparation. Par contre, on a enregistré une adhérence appréciable au support n°4 avec latex.
- Pour le matériau à la combinaison (latex+fibres) BS-LFB, on a observé une fissure préjudiciable a l'interface du support n°6, au condition (SSS) sans délaminage, du certainement à l'effet des fibres.

Pour conclure, on peut dire que la condition du substrat ou du support, est tellement importante qu'il faudrait la prendre en considération. On a vu aussi qu'avec l'agent de liaison, on obtient un meilleur état d'adhérence ; d'où le rôle important de l'agent de liaison.

4.7/ CONCLUSION

Le programme expérimental réalisé dans le cadre de ce projet de mémoire avait pour but de formuler et étudier un béton de sable avec additions qui sera destinée à la réparation. La formulation du béton de sable est faite pour deux gammes : béton de sable ordinaire, béton de sable avec des additions (fibres polypropylène, fumée de silice et latex). Nous avons étudié l'effet de ces additions sur les caractéristiques mécaniques et hygrométriques du BS. Après, on a eu l'idée d'appliquer la réparation avec nos bétons confectionnés sur des éléments en béton, Pour voir leur comportement au séchage seul pendant 120 jours, et contrôler leur adhérence au support en appliquant une contrainte de compression.

Les résultats de ce programme nous ont permis de dégager les principales conclusions suivantes :

- La formulation du béton de sable avec un sable concassé a la place d'un sable fin (Dune ou Oued), donne des gains de résistances de compression et de traction appréciables.
- Pour un dosage égal à 180 Kg/m^3 de filler calcaire, on assure la compacité optimale d'un béton de sable dosé à 1480 Kg/m^3 de sable concassé.
- Les superplastifiants contribuent à l'amélioration de la maniabilité et de la résistance à la compression des bétons de sable.
- Le contrôle de la maniabilité des bétons de sable composés d'un superplastifiant est difficile, d'où l'utilisation d'un retardateur de prise est nécessaire.
- A un dosage de 2% du superplastifiant (point de saturation) et a un rapport E/C =0.59, semble être plus efficace pour l'amélioration de la maniabilité tout en préservant une meilleure résistance.
- L'effet filler de la fumée de silice a contribué à l'amélioration de la maniabilité et de résistances mécaniques.
- L'ajout de la fumée de silice au béton de sable contribue à la diminution du retrait total et de la capacité d'absorption d'eau.
- L'addition de la fumée de silice a donné un effet bénéfique à un dosage de 5% du poids de ciment.
- L'ajout des fibres polypropylène aux dosages ($0,9$ et $1,2 \text{ kg/m}^3$), n'a donné aucun effet au BS sur les résistances mécanique.
- Les fibres polypropylène ont une grande capacité d'absorption, lesquels ont contribue à élever la capacité d'absorption d'eau des BS.
- L'effet des fibres polypropylène sur le retrait est modéré.
- De faibles résistances mécaniques ont été enregistrées avec le béton de sable additionné au latex.
- Une cure humide a un effet néfaste sur les résistances mécaniques des bétons additionnés au latex.
- Avec les latex on a eu des déformations de retrait plus faibles, d'où on résulte d'un béton de sable avec retrait compensé.
- Le latex participe à la diminution de la capacité d'absorption et au retrait des bétons de sable.

- De faibles résultats étaient enregistrés par l'addition d'une combinaison (fibre + latex) au BS. A cet effet on n'a aucun effet améliorant par rapport au béton additionné au latex seul, donc c'est moins économique.
- On a obtenu des résistances élevées à la compression avec nos bétons de sable. A l'âge de 28 jours, on a enregistré 35MPa par le béton de référence BS-SPE2, par contre la meilleure valeur de 49MPa est donnée par BS-FS2.
- On a obtenu des résistances à la traction qui dépassent 8MPa à l'âge de 28 jours
- Les amplitudes de déformation de retrait, de nos bétons destinés à la réparation, sont acceptables, par rapport aux produits de réparation au marché. On a enregistré un intervalle de déformation de [70 à 426] $\mu\text{m/m}$ à l'âge de 28 jours. La plus faible déformation de retrait était enregistrée par le béton avec fumée de silice a 5% quant à la plus élevée elle a été enregistré par le béton de référence BS-SPE2 sans addition. D'où l'on constate un effet significatif des additions.
- Les bétons de sable manifestent une cinétique de séchage rapide provoquant un important retrait au 1^{er} age, et se stabilisant rapidement dans un temps limité.
- Les modules d'élasticité des bétons de sables calculés sont faibles avec ou sans additions. on a enregistré plus de déformabilité et moins de fissuration.
- Une cure humide pendant les 3 premiers jours de séchage aux réparations fait condenser le retrait.
- A l'effet du retrait compensé de nos matériaux de réparation des BS et au faible module d'élasticité, on a pu obtenir des compatibilités déformationnelle significatives aux supports.
- Avec un agent de liaison au support on peut contribuer à l'adhérence du matériau de réparation.