

CHAPITRE 4

PRESENTATON, ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

4.1 Introduction

La formulation du matériau de réparation demeure l'un des paramètres clés gouvernant la durabilité d'une réparation, et la recherche du matériau développant une meilleure compatibilité et une meilleure adhérence au support, forme l'objectif primordial de notre étude.

A cet effet le choix du BAN comme matériau de réparation est dû essentiellement comme nous l'avons déjà exprimé en premier chapitre, à sa grande fluidité due à un dosage élevé de superplastifiant permettant de combler tous les vides. Il s'avère aussi qu'il offre une excellente durabilité, une belle apparence des surfaces et une bonne adhérence au support.

Dans ce chapitre notre principal objectif est de formuler et caractériser des BAN, afin de les désigner à la réparation, tout en passant par un programme expérimental qui se divise en plusieurs phases.

Phase n°1: développer et formuler un béton autonivelant, en optimisant les principaux paramètres clés de la composition, tels que:

- le volume de gravier, pour une plage de 250l à 350l;
- la concentration en super plastifiant pour une plage de 0.8% à 1.2% de la masse du ciment.
- le rapport volumique S/Pt, et le rapport massique E/C pour des valeurs 0.6, 0.7 , 0.8 et 0.35,0.40 , 0.45 respectivement.
- la concentration en agent colloïdal, pour des valeurs 0.015, 0.03, 0.07% .

Phase n°2: introduire des additions minérales(30%FC, 40%LT et 10%FS) au béton sélectionné dans la phase n°1, et savoir l'effet de ces ajouts sur la maniabilité et la résistance.

Phase n°3: introduction des fibres polypropylènes, et étudier ses effets sur la maniabilité et la résistance des BAN sélectionnés.

Phase n°4: étude de l'effet de la résine sur la maniabilité et aussi la résistance des BAN.

Phase n°5: après la formulation et la caractérisation du BAN, on teste notre matériau résultant, où on l'utilise comme matériau de réparation sur des simulations fabriquées en béton ordinaire, et on procède à l'étude de l'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton.

4.2 Développement des formulations des BAN

Dans notre étude, et comme nous avons vu au chapitre n°2, section 2.7.2, la plupart des formulations des BAN sont conçues actuellement de manière empirique, notre formulation alors se fait par tâtonnement sur la base de certaines plages dessinées pour chaque constituant. Ces plages étaient présentées selon les travaux de P.Turcry [54] dans la section précédemment citée.

4.2.1 Optimisation du volume de gravier

Cette phase consiste essentiellement à examiner l'effet du volume de gravier sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du béton afin de déterminer un volume optimal qui améliore ces paramètres. Nous avons alors fabriqué cinq bétons dont la dose en gravier est de 250 l à 350 l par pas de 25 l. Notons que tous les mélanges possèdent les mêmes rapports S/Pt de 0.6 et E/C de 0.4 ainsi qu'un SP % égale 0.8.

Le tableau (4.1) présente le dosage des constituants de tous les bétons réalisés lors de cette phase.

D'après Holcim [25], pour les BAN, généralement on limite le diamètre maximal de granulats à 16 mm. M.Sonebi [51] a également utilisé des granulats de 14 mm, pour la formulation des BAN coulés sous l'eau. A cet effet nous avons choisi d'utiliser des granulats de type 7/15, ce type de granulats est très disponible dans le marché algérien, ainsi qu'il peut offrir une meilleure fluidité (qualité très recherchée) pour notre béton.

TAB. 4.1 - compositions des bétons destinés à l'optimisation du volume de gravier.

| N° | Gravier | | Eau | ciment | | Sable | | Superplastifiant | |
|-----------|---------|-----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|------------------|------|
| | [l] | [kg] | [l] | [l] | [kg] | [l] | [kg] | [l] | [kg] |
| 01 | 250 | 655 | 253.5 | 201.25 | 633.9 | 275.73 | 700.35 | 4.74 | 5.07 |
| 02 | 275 | 720.5 | 244.9 | 194.41 | 612.4 | 266.36 | 676.55 | 4.57 | 4.89 |
| 03 | 300 | 786 | 236.3 | 187.56 | 590.8 | 256.98 | 652.73 | 4.41 | 4.72 |
| 04 | 325 | 851.5 | 227.71 | 180.72 | 569.27 | 247.6 | 628.9 | 4.25 | 4.55 |
| 05 | 350 | 917 | 219.08 | 173.87 | 547.71 | 238.22 | 605.07 | 4.09 | 4.38 |
| | | S/Pt=0.6 | | E/C=0.4 | | SP%=0.8 | | | |

Résultats et discussions :

Il est clair que l'effet du volume de gravier sur les propriétés du béton à l'état frais, n'est pas négligeable. La figure 4.1 exprime son effet sur la fluidité, où nous avons remarqué que plus le volume de gravier est élevé, plus l'étalement est réduit. Cette réduction peut atteindre 73.68% lorsque le volume de gravier augmente de 250 l à 350 l. Ce résultat est éprouvé par de nombreux chercheurs, qui ont déjà travaillé sur les BAN, [51] [31] où ils ont montré que ce comportement est associé directement à l'insuffisance de la teneur en pâte de ciment engendrée par l'augmentation du volume des gravillons. Dans ce cas les grains des gravillons ont tendance à venir en contact les uns avec les autres, ce qui augmente les forces de frottement entre eux dans la masse du béton et limite donc l'étalement. (Pour plus d'informations se référer à l'annexe A).

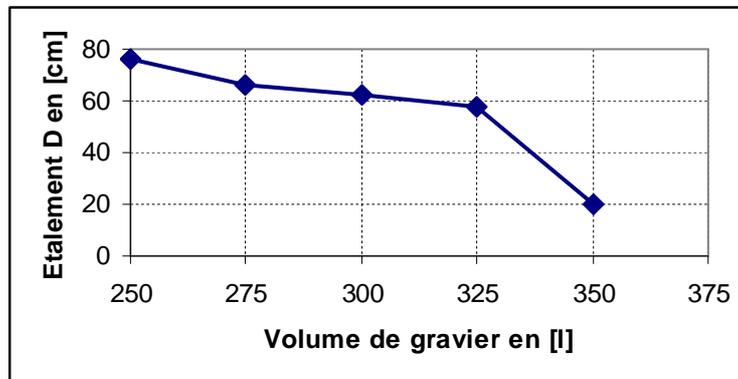


Fig.4.1 - Effet du volume de gravier sur la fluidité.

De même aussi, la figure 4.2 montre l'effet négatif du volume de gravier sur la capacité de remplissage H_2/H_1 , on remarque que l'augmentation du volume de gravier a tendance de diminuer la déformabilité, et même on arrive à un état de blocage lorsque ce volume atteint 350 l, où les grains de gravier cisailent le mortier et viennent en contact entre eux, ce qui engendre la formation des amas contre les armatures et entraînent le phénomène du blocage.

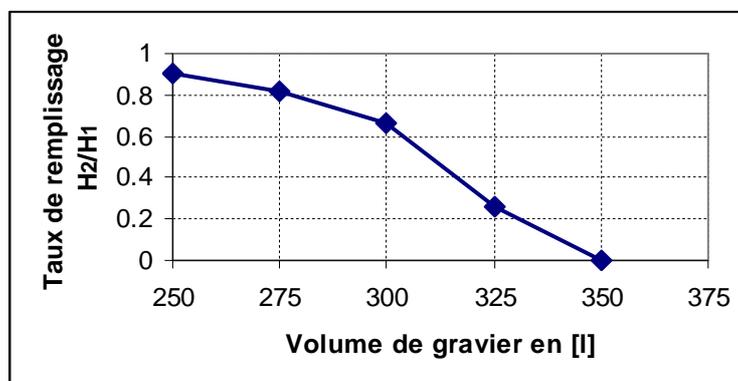


Fig.4.2 - Effet du volume de gravier sur la déformabilité

En ce qui concerne la stabilité, l'effet du volume de gravier est bien illustré sur la figure 4.3 où nous pouvons remarquer que l'indice de ségrégation diminue tant que le volume de gravier augmente, cet indice arrive même à une valeur quasi nulle lorsque le volume de gravier est de 325 l, et nulle avec un volume de 350 l.

La seule explication qu'on peut en donner est que la réduction du volume de la pâte, qui s'accompagne avec l'augmentation du teneur en gravier, conduit à une limitation de la quantité de laitance, ce qui provoque une diminution de l'indice de ségrégation.

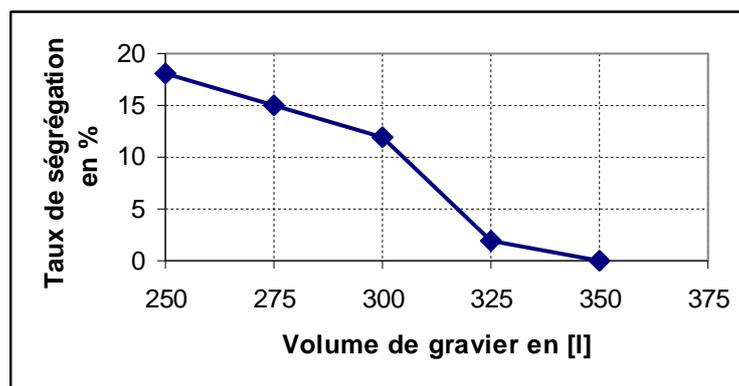


Fig.4.3 - Effet du volume de gravier sur la stabilité.

A l'état durci, nous avons procédé aux essais sur des prismes de dimensions (10cmx10cmx10cm), et (10cmx10cmx40cm) pour caractériser la résistance à la compression, et à la traction respectivement. La figure 4.4 montre que les mélanges confectionnés acquièrent des résistances croissantes en fonction du volume de gravier, cette croissance est peut être due aux rapports G/S plus élevés, comme le montre [G.Dreux et J.Festa \[11\]](#), et comme l'affirme [A.M Neville \[41\]](#) que lorsque le rapport massique de G/C s'accroît, il y a une amélioration de résistance.

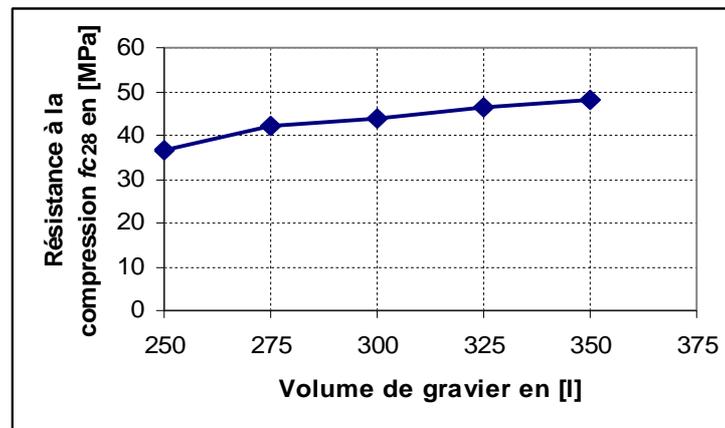


Fig.4.4 - Effet du volume de gravier sur la résistance à la compression.

Cependant, pour la résistance à la traction, la figure 4.5 montre qu'il y a une amélioration jusqu'à une teneur en gravier de 300 l/m^3 , au delà duquel la résistance commence à diminuer, c'est peut être parce que l'augmentation du volume de gravier, s'accompagne par une diminution du volume du liant, ce qui provoque une perte d'adhérence mortier-graviers, et la rupture du béton se fait par décollement des graviers, alors que pour les volumes faibles de gravier, la bonne adhérence du mortier sur les graviers, à cause de l'importance quantité du liant, entraîne la rupture des graviers eux mêmes.

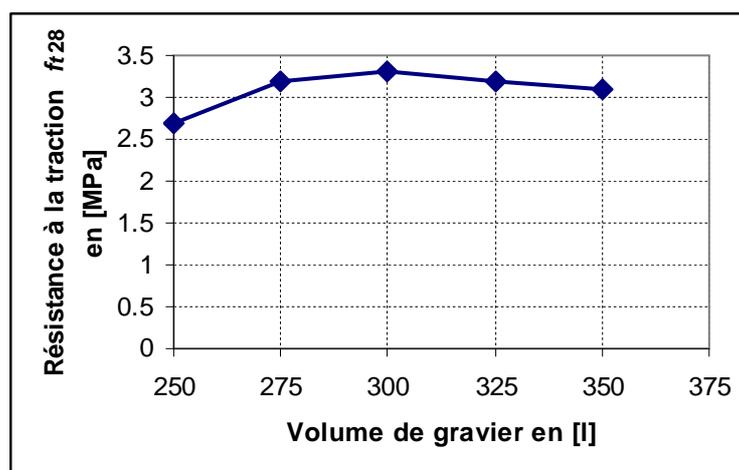


Fig.4.5 - Effet du volume de gravier sur la résistance à la traction.

Maintenant, selon les résultats obtenus on peut dire que parmi tous les bétons préparés, il y a seulement le mélange fabriqué avec un dosage en gravier de 275l qui répond aux exigences de l'AFGC [1], c'est à dire ($D \geq 60$ cm, $H_2/H_1 > 0.8$ et $\pi \leq 15$ %), tout en préservant des bonnes résistances à la compression et à la traction.

4.2.2 Optimisation du dosage en super plastifiant

Après avoir déterminé le volume nécessaire qui offre l'auto nivellement de notre béton, essayons dans cette phase à optimiser le dosage en super plastifiant, tout en examinant leur effet sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons.

A cet effet nous avons fabriqué neuf bétons, dont on fixe la dose en gravier à 275 l, et le rapport E/C=0.4, et on fait varier le % en super plastifiant de 0.8% à 1.2%, avec un pas de 0.2%, et le rapport S/Pt de 0.6 à 0.8, avec un pas de 0.1.

Le tableau (4.2) présente le dosage des constituants de tous les bétons réalisés lors de cette phase.

TAB. 4.2 - compositions des bétons destinés à l'optimisation du super plastifiant.

| N° | SP% | S/Pt | Eau | Ciment | | Sable | | Superplastifiant | |
|----|-----|------|---------------|--------|----------------|--------|--------|------------------|------|
| | | | [l] | [l] | [kg] | [l] | [kg] | [l] | [kg] |
| 01 | 0.8 | 0.6 | 244.9 | 194.41 | 612.4 | 266.36 | 676.55 | 4.57 | 4.89 |
| 02 | | 0.7 | 230.5 | 182.98 | 576.38 | 292.44 | 742.79 | 4.30 | 4.61 |
| 03 | | 0.8 | 217.69 | 172.77 | 544.24 | 315.61 | 801.65 | 4.06 | 4.35 |
| 04 | 0.1 | 0.6 | 244.26 | 193.89 | 610.66 | 266.29 | 676.37 | 5.7 | 6.10 |
| 05 | | 0.7 | 229.89 | 182.45 | 574.74 | 292.39 | 742.67 | 5.37 | 5.74 |
| 06 | | 0.8 | 217.12 | 172.32 | 542.81 | 315.60 | 801.62 | 5.07 | 5.42 |
| 07 | 1.2 | 0.6 | 243.62 | 193.35 | 609.0 | 266.27 | 676.32 | 6.82 | 7.30 |
| 08 | | 0.7 | 229.29 | 181.98 | 573.24 | 292.38 | 742.64 | 6.42 | 6.87 |
| 09 | | 0.8 | 216.55 | 171.87 | 541.39 | 315.59 | 801.59 | 6.07 | 6.49 |
| | | | G=275l | | E/C=0.4 | | | | |

Résultats et discussions :

L'effet du super plastifiant sur la fluidité est bien illustré dans la figure 4.6, où on remarque que l'accroissement du diamètre de l'étalement de tous les mélanges, avec le même rapport S/Pt, est une conséquence de l'augmentation progressive du dosage en super plastifiant, par exemple on passe de 66.5 cm à 90 cm, lorsque on augmente le dosage en SP% de 0.8% à 1.2 pour un mélange de rapport S/Pt=0.6 (Pour plus d'informations se référer à l'annexe B).

Cette augmentation est due à l'action des molécules à longue chaîne du SP qui peuvent s'enrouler autour des grains du ciment et de leur conférer une charge hautement négative, de sorte qu'ils se repoussent les uns des autres, provoquant une défloculation des grains et une lubrification de la pâte [11] [41].

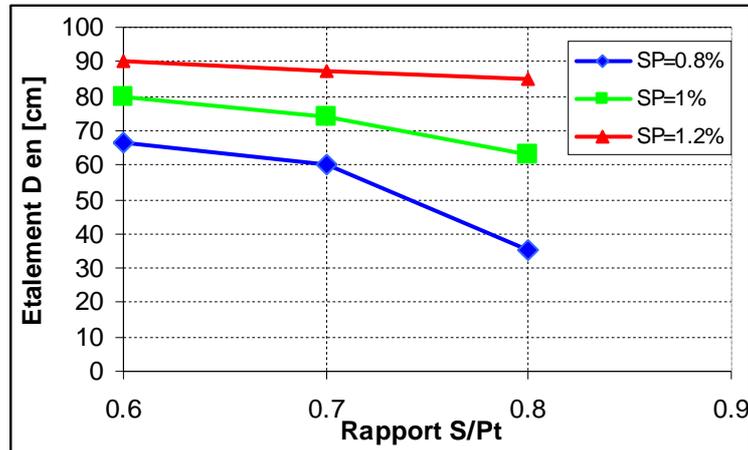


Fig. 4.6 - Effet du dosage en SP sur la fluidité.

La figure 4.7 montre l'accroissement de la capacité de remplissage avec l'accroissement du dosage en super plastifiant, parce que simplement la déformabilité dépend étroitement de la fluidité.

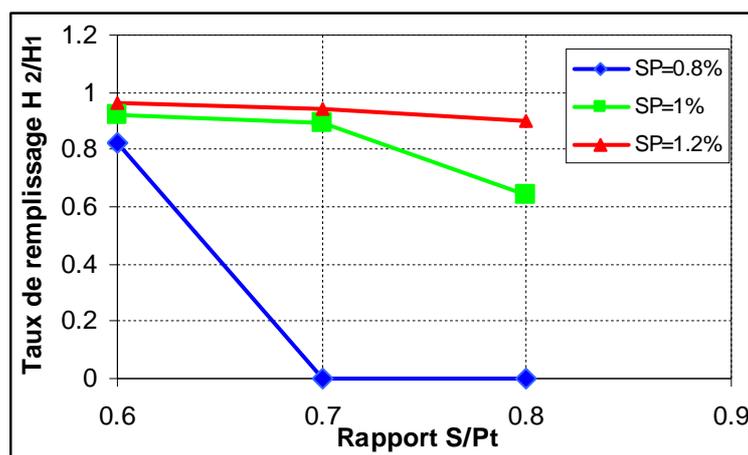


Fig. 4.7 - Effet du dosage en SP sur la déformabilité.

En ce qui concerne le taux de ségrégation, l'effet du dosage en super plastifiant prend presque les mêmes allures de la fluidité et la déformabilité comme il est indiqué dans la figure 4.8 où l'augmentation du dosage en super plastifiant provoque une grande perte de

stabilité, à titre d'exemple pour un rapport S/Pt=0.8, l'indice de ségrégation augmente de 2% à 18% lorsque le dosage en SP passe de 0.8% à 1.2%.

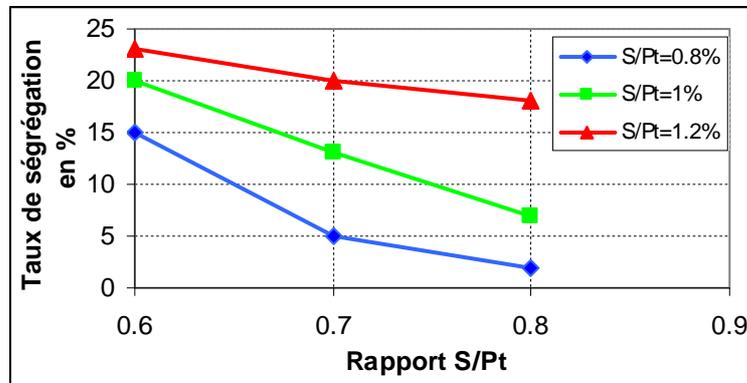


Fig. 4.8 - Effet du dosage en SP sur la stabilité.

A l'état durci, il est clair que la fabrication des bétons à hautes résistances nécessite l'utilisation des super plastifiants [11], à cet effet la figure 4.9 montre l'effet du dosage en SP sur la résistance à la compression, de façon à signaler une augmentation de l'ordre de 19.04% et de 15.78% lorsque le dosage en SP s'élève de 0.8% à 1.2% avec des rapports S/Pt de 0.6 et 0.8 respectivement.

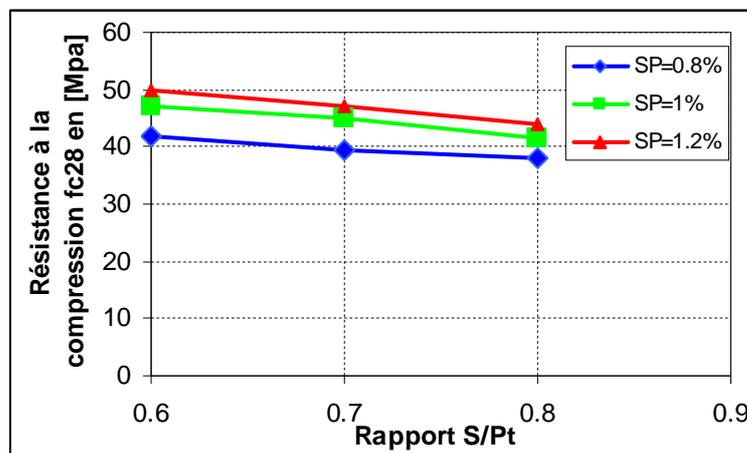
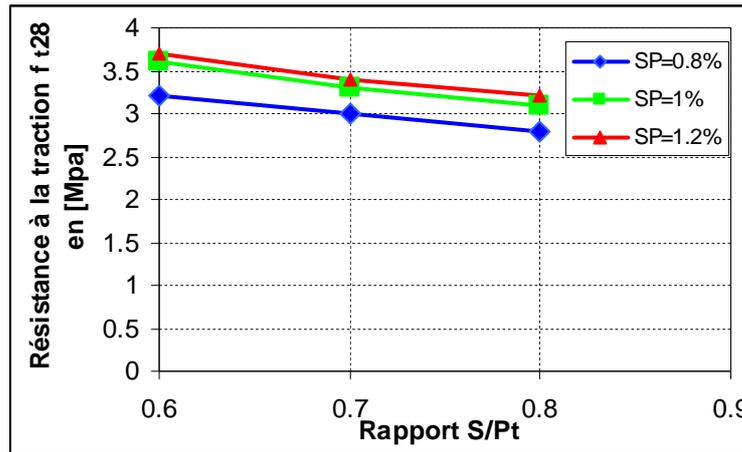


Fig. 4.9 Effet du dosage en SP sur la résistance à la compression f_{c28} .

La même remarque peut être faite pour la résistance à la traction à 28jours, où nous avons marqué une augmentation de 15.6% et 14.28% de résistance de traction lorsque le dosage en SP s'élève de 0.8% à 1.2% avec des rapports S/Pt de 0.6 et 0.8 respectivement, comme il est exprimé sur la figure 4.10.

Fig. 4.10 - Effet du dosage en SP sur la résistance à la traction f_{t28} .

Parmi les résultats obtenus, nous avons simplement deux bétons qui sont vraiment auto nivelants, et qui répondent aux exigences de l'AFGC [1] ce sont les bétons confectionnés avec les rapports suivants : S/Pt =0.6 et SP=0.8% ; et S/Pt=0.7 et SP=1%.

Alors d'après ces résultats on optimise un dosage en super plastifiant de 1%, vu qu'il offre une bonne fluidité pour nos bétons, et de plus avec un rapport S/Pt=0.7 on économise une quantité de 37.66kg de ciment pour chaque mètre cube de béton.

4.2.3 Optimisation des rapports S/Pt et E/C

Dans cette section, on essaye d'étudier l'influence du rapport volumique S/Pt, et le rapport massique E/C sur les propriétés rhéologiques et mécaniques de nos bétons. Alors nous avons préparé neuf mélanges de nouveau, dont les constituants sont représentés dans le tableau 4.3 avec le volume de gravier et le dosage en SP sont fixés.

TAB. 4.3 compositions des bétons destinés à l'optimisation des rapports S/Pt et E/C.

| N° | E/C | S/Pt | Eau | Ciment | | Sable | | Superplastifiant | |
|----|------|------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|------|
| | | | [l] | [l] | [kg] | [l] | [kg] | [l] | [kg] |
| 01 | 0.35 | 0.6 | 229.58 | 208.23 | 655.94 | 266.36 | 676.55 | 6.13 | 6.56 |
| 02 | | 0.7 | 216.07 | 195.98 | 617.35 | 292.47 | 742.87 | 5.77 | 6.17 |
| 03 | | 0.8 | 204.07 | 185.09 | 583.00 | 315.68 | 801.82 | 5.44 | 5.83 |
| 04 | 0.4 | 0.6 | 244.26 | 193.89 | 610.66 | 266.29 | 676.37 | 5.70 | 6.10 |
| 05 | | 0.7 | 229.89 | 182.45 | 574.74 | 292.39 | 742.67 | 5.37 | 5.74 |
| 06 | | 0.8 | 217.12 | 172.32 | 542.81 | 315.60 | 801.62 | 5.07 | 5.42 |
| 07 | 0.45 | 0.6 | 257.89 | 181.94 | 573.11 | 267.10 | 678.45 | 5.35 | 5.73 |
| 08 | | 0.7 | 242.72 | 171.23 | 539.39 | 293.29 | 744.96 | 5.04 | 5.39 |
| 09 | | 0.8 | 229.24 | 161.72 | 509.43 | 316.57 | 804.10 | 4.76 | 5.09 |
| | | | G=275l | | SP%=1 | | | | |

Résultats et discussions :

En fonction des deux paramètres S/Pt et E/C, l'évolution de la fluidité de nos bétons est bien illustrée dans la figure 4.11, où nous pouvons constater qu'avec un rapport E/C égal, plus le rapport S/Pt est élevé, plus l'étalement sera faible, à titre d'exemple, lorsque le rapport S/Pt s'accroît de 0.6 à 0.8, l'étalement [D] pour un béton de rapport E/C=0.35 diminue de 65cm à 52cm.

De telle raison l'accroissement du rapport S/Pt se fait au détriment du volume de pâte de ciment qui est supposée la composante visqueuse du béton.

Dans la formulation des BAN, cette pâte doit non seulement combler les vides intergranulaires, mais il faut en plus prévoir un volume excédentaire afin d'écarter suffisamment les granulats et assurer un bon étalement. Pour cela, les BAN doivent renfermer donc un rapport S/Pt limité.

Ce résultat a été confirmé par plusieurs chercheurs travaillant sur les BAN, à l'instar de [F. Kharchi \[31\]](#) qui a trouvé que l'effet de la variation du rapport volumique S/Pt de 0.75 à 0.67 semble être plus efficace pour l'amélioration de la fluidité (diamètre de l'étalement), au contraire [M. Sonebi \[51\]](#) a trouvé que l'étalement du BAN destiné à la réparation sous l'eau diminue de 66cm à 65.5cm quand le rapport S/Pt décroît de 0.7 à 0.6, avec un rapport E/C de 0.41 et un volume des gravillons de 330 l.

Par ailleurs, on peut remarquer que pour tous les rapports S/Pt utilisés, l'augmentation du rapport E/C améliore systématiquement la fluidité, ceci s'explique tout simplement par l'excès de la quantité d'eau qui est sans aucun doute le principal paramètre influençant la fluidité du béton. En plus, 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. Malheureusement ce résultat n'a été pas confirmé par [M. Sonebi \[51\]](#) qui a démontré que pour tous les rapports S/Pt considérés et avec des volumes de gravier de 300 l et 330 l, le rapport E/C de 0.41 favorisait les meilleurs étalements comparés à ceux de rapport E/C de 0.47. Malgré qu'il n'a pas fourni les raisons de ce comportement, cela peut être dû au dosage différent en SP, (5 l/m^3 pour les mélanges de rapport E/C=0.41, et 3 l/m^3 pour ceux de rapport E/C=0.47).

(Pour plus d'informations se référer à l'annexe C).

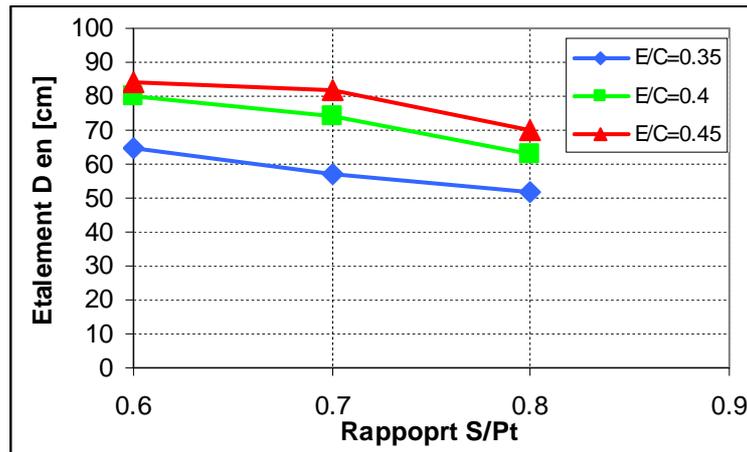


Fig. 4.11 - Effet des rapports S/Pt et E/C sur la fluidité.

La figure 4.12 montre l'effet des rapports S/Pt et E/C sur la capacité de remplissage, où nous pouvons constater que les mélanges confectionnés acquièrent des taux de remplissage décroissants en fonction du S/Pt. A titre d'exemple pour un rapport E/C=0.4, lorsque le rapport S/Pt s'accroît de 0.6 à 0.8, la capacité de remplissage H_2/H_1 diminue de 0.92 à 0.64. Il est important alors que le volume de la pâte de ciment soit ajusté de façon que les BAN puissent facilement traverser les coffrages très ferrailés. Ce résultat est en accord avec ce qui a trouvé [M.Sonebi \[51\]](#).

De même il est possible de remarquer qu'avec un rapport S/Pt donné, l'augmentation du rapport E/C de 0.35 à 0.45 a contribué significativement à l'amélioration de la déformabilité de nos mélanges.

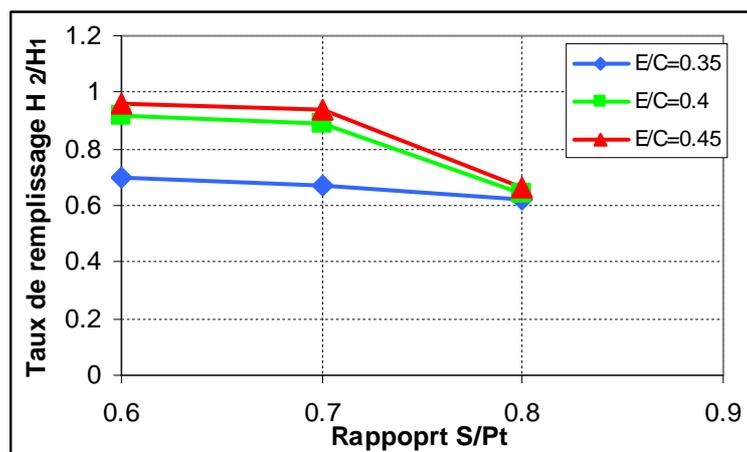


Fig. 4.12 - Effet des rapports S/Pt et E/C sur la déformabilité.

En ce qui concerne la stabilité, l'effet des rapports S/Pt et E/C prend presque les mêmes allures de la fluidité et la déformabilité, comme il est indiqué dans la figure 4.13, de telle façon à constater qu'avec un rapport E/C donné, l'augmentation du rapport S/Pt peut diminuer l'indice de ségrégation, un comportement qui contredit certaines études (F.Kharchi [31], par exemple). Mais nous pouvons l'expliquer par l'effet que l'augmentation du rapport S/Pt s'accompagne d'une diminution des volumes d'eau, de ciment et de super plastifiant, ce qui influe directement sur le taux de ségrégation.

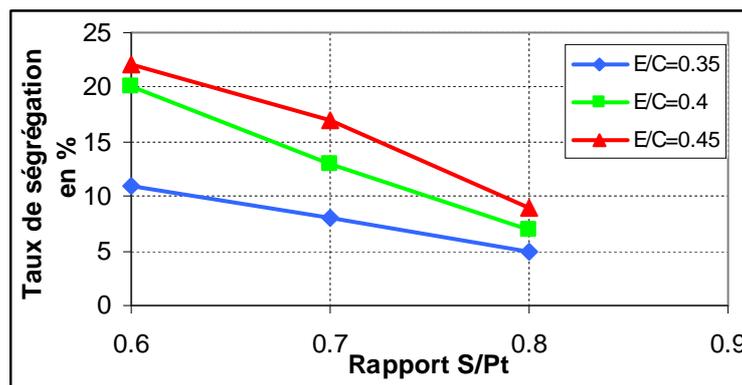


Fig. 4.13 - Effet des rapports S/Pt et E/C sur la stabilité.

A l'état durci l'influence des rapports S/Pt et E/C, est bien illustrée sur les figures 4.14 et 4.15 représentant les résistances à la compression et à la traction respectivement.

L'analyse de la figure 4.14, montre que la résistance à la compression décroît en même temps que le rapport S/Pt augmente, dont on peut conclure que ce comportement est lié directement à la diminution de la quantité de ciment, et l'augmentation de la quantité du sable, ce qui conduit directement à une réduction du volume d'hydrates formés, d'où des résistances plus faibles.

De même pour les différents rapports S/Pt, l'augmentation du rapport E/C, affecte la résistance de compression d'une façon bien remarquable, où nous pouvons constater que lorsque le rapport E/C passe de 0.35 à 0.45 pour un rapport S/Pt =0.7, la résistance chute de 48 à 42 [MPa].

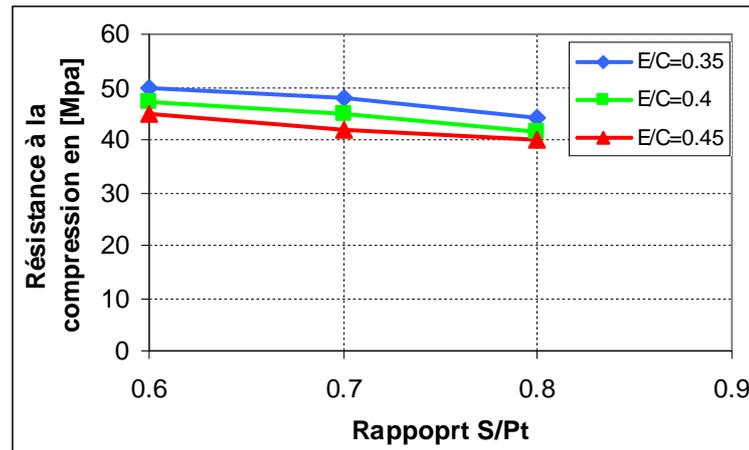


Fig. 4.14 - Effet des rapports S/Pt et E/C sur la résistance à la compression.

La même remarque aussi peut être faite pour la résistance à la traction, vu la relation qui peut lier les deux comportements, où l'analyse de la figure 4.15 montre que l'augmentation du rapport S/Pt s'accompagne d'une diminution de la résistance à la traction, et aussi pour le même rapport S/Pt, l'augmentation du rapport E/C affecte cette résistance.

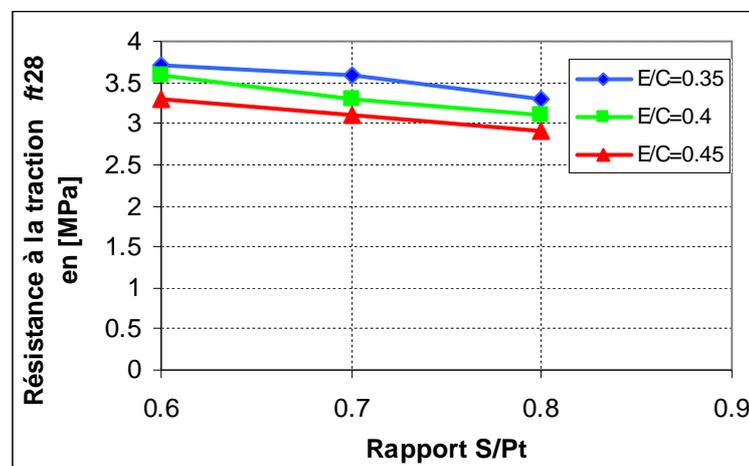


Fig. 4.15 - Effet des rapports S/Pt et E/C sur la résistance à la traction.

En résumé, on peut conclure que l'augmentation du rapport E/C, améliore la fluidité, la déformabilité, mais au contraire elle affecte la stabilité. Alors que l'augmentation du rapport S/Pt diminue l'étalement, la déformabilité, mais améliore la stabilité. A cet effet et pour répondre aux exigences de l'AFGC [1], et parmi tous nos mélanges dans cette section, on peut dire qu'on a signalé un seul béton qui est vraiment

autonivelant, il s'agit du béton confectionné avec un rapport $S/Pt=0.7$, un rapport $E/C=0.4$, un dosage $SP=1\%$, et un volume de gravier de 275 l. Ce résultat semble proche à ceux de M.Sonebi [51] et K Khayat [32] qui ont optimisé pour leurs BAN des rapports S/Pt et E/C de 0.6 et 0.41 respectivement.

4.2.4 Optimisation du dosage en agent colloïdal

Jusqu'à maintenant, nous avons développé notre formulation de BAN, sans utiliser l'agent de viscosité, mais pour suivre notre étude jusqu'au bout, et pour mieux comprendre l'effet du dosage en agent de viscosité (AV), nous essayons dans cette section d'optimiser la quantité nécessaire qui peut être utilisée sans nuire les propriétés rhéologiques et mécaniques de notre béton. Le tableau 4.4 résume les compositions des bétons et les quantités d'agent colloïdal nécessaires.

TAB. 4.4 - compositions des bétons destinés à l'optimisation du dosage en agent colloïdal.

| N° | A.V %(c) | Gravier | Ciment | | Sable | | Superplastifiant | | Eau |
|----|-------------|----------------|--------|-----------------|--------|--------------|------------------|------|--------|
| | | [l] | [l] | [kg] | [l] | [kg] | [l] | [kg] | [l] |
| 01 | 0.015 | 275 | 182.45 | 574.74 | 292.39 | 742.67 | 5.37 | 5.74 | 229.89 |
| 02 | 0.03 | | | | | | | | |
| 03 | 0.07 | | | | | | | | |
| | | E/C=0.4 | | S/Pt=0.7 | | SP%=1 | | | |

Résultats et discussions :

D'après la figure 4.16, on remarque que l'augmentation du dosage en agent colloïdal affecte l'étalement d'une façon très significative, à titre d'exemple le diamètre D diminue de 74 cm à 60 cm lorsque on utilise un dosage en AC de 0.015%, et à 45cm seulement si ce dosage augmente à 0.07%.

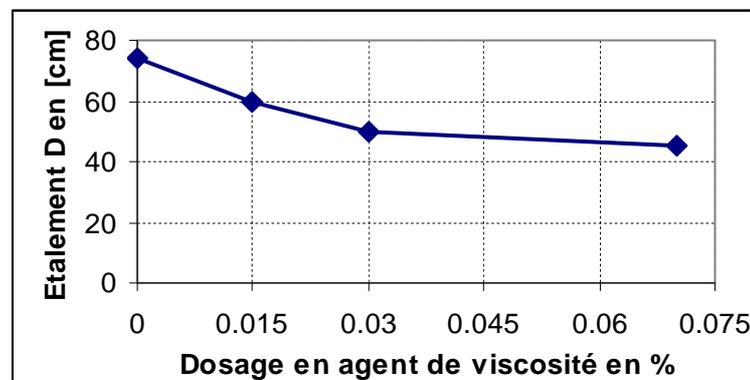


Fig. 4.16 - Effet du dosage en AC sur la fluidité.

L'effet du dosage en agent colloïdal (AC) sur la déformabilité peut prendre aussi la même allure, où on observe sur la figure 4.17 que la capacité de remplissage diminue en fonction du dosage en AC de telle façon à arriver à un taux de remplissage H_2/H_1 égal à 0.4 lorsque ce dosage atteint la valeur de 0.07%, et à la lumière de ces résultats de fluidité et de déformabilité, on peut dire que pour notre formulation la valeur 0.015% représente le seuil au delà du quel, notre béton ne sera plus auto nivelant ou bien c'est la valeur maximum qui sera utilisée pour garder son autonivellement, résultat qui semble loin à ceux de [M.Sonebi \[51\]](#) qui a optimisé un dosage de 0.07% pour des BAN destinés aux travaux de réparation sous l'eau, et [K.Khayat \[32\]](#) qui a adopté un dosage de 0.075%.

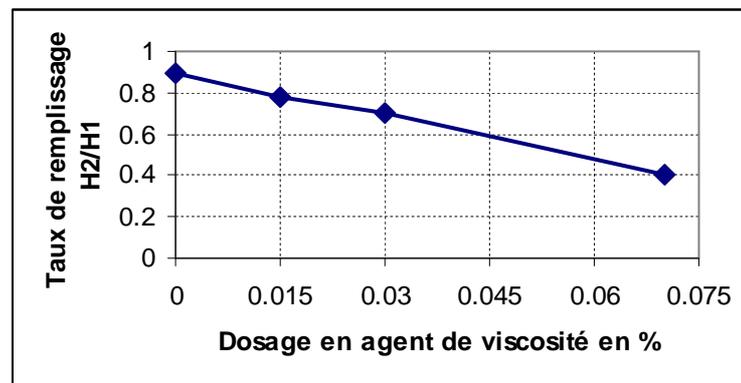


Fig. 4.17 - Effet du dosage en AC sur la déformabilité.

L'amélioration de la stabilité des BAN par le dosage en agent de viscosité, est tout à fait claire sur la figure 4.18, où nous pouvons constater que l'indice de ségrégation diminue de 13% à 2.5% lorsque on introduit à notre béton un dosage de 0.015% d'agent La même allure colloïdal, et cet indice devient presque quasi nul lorsqu' on augmente ce dosage à 0.07%.

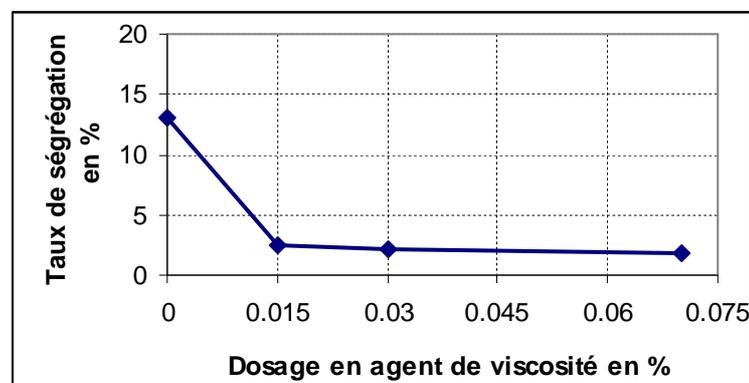


Fig. 4.18 - Effet du dosage en AC sur la stabilité.

A l'état durci, et au contraire aux travaux de M.Sonebi [51] qui a trouvé que l'incorporation de l'AC améliore légèrement la résistance à la compression des BAN coulés sous l'eau, nous avons marqué une légère diminution de la résistance (moins de 1MPa) avec le dosage seuil que nous avons optimisé (0.015%), comme il est illustré sur la figure 4.19, mais cette résistance reprend sa valeur lorsqu'on augmente le dosage en AC à 0.03%, puis elle augmente légèrement avec le dosage de 0.07%, ce comportement peut expliquer par le fait que l'AC augmente la résistance par l'amélioration de la stabilité.

D'une façon générale, notre résultat semble confirmer par l'étude de T.Sedran [49], qui affirme que l'utilisation d'un agent de viscosité ne semble pas avoir d'influence sur le matériau durci. La même remarque a été faite par Y.Roussel [47] qui a ajouté qu'avec un rapport E/L=0.4, l'AC ne semble pas affecter la résistance à la compression.

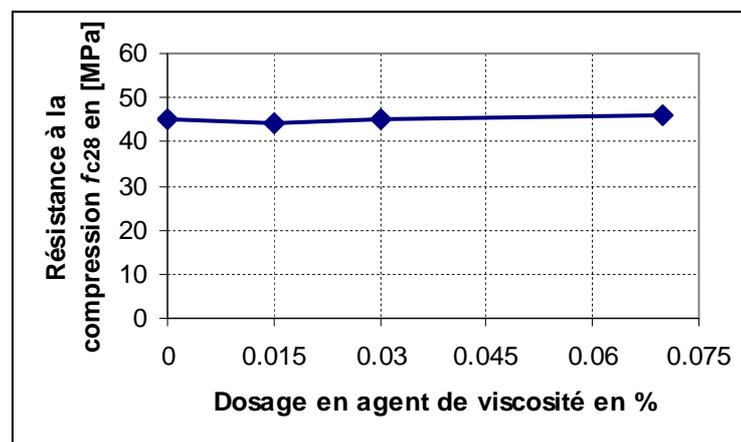


Fig. 4.19 - Effet du dosage en AC sur la résistance à la compression.

Les mêmes remarques peuvent être projetées en ce qui concerne la résistance à la traction, où nous n'avons marqué aucune amélioration qui peut être prise par considération, comme il est présenté par la figure 4.20, simplement une légère diminution avec le dosage seuil, ensuite la courbe reprend presque son état initial lorsque le dosage en AC s'élève à 0.07%. (Pour plus d'informations se référer à l'annexe D).

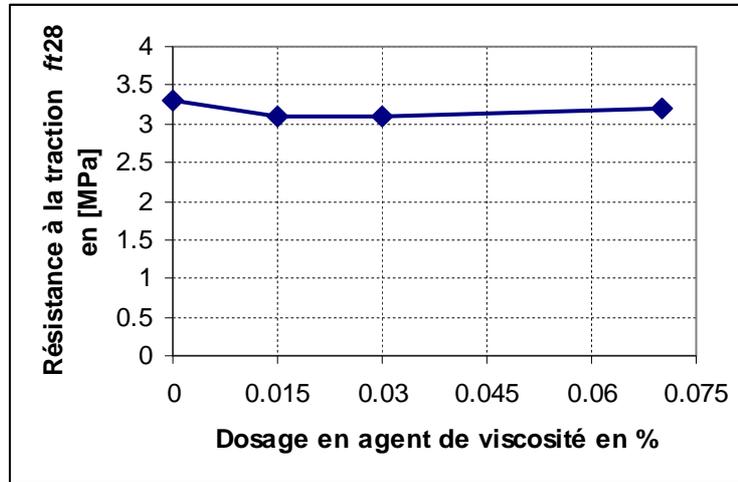


Fig. 4.20 - Effet du dosage en AC sur la résistance à la traction.

Enfin, et pour terminer avec cette phase, on résume notre travail dans la formulation suivante, en tenant compte, les résultats répondant aux exigences de l'AFGC [1] à l'état frais, et améliorent en même temps les propriétés mécaniques à l'état durci.

TAB. 4.5 - compositions des bétons optimisés sans additions minérales.

| Désignation | AC (%) | Gravier | | Ciment | | Sable | | Eau [l] |
|-------------|--------|----------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | | [l] | [kg] | [l] | [kg] | [l] | [kg] | |
| BAN-1 | 0.00 | 275 | 720.5 | 182.45 | 574.74 | 292.39 | 742.67 | 229.89 |
| BAN-2 | 0.015 | | | | | | | |
| E/C=0.4 | | S/Pt=0.7 | | | | SP=1% | | |

4.3 Effet des additions minérales sur la maniabilité et la résistance des BAN

Après avoir, déterminé les composantes de notre BAN, dans la phase précédente, et vu sa richesse considérable en matière cimentaire 574.74 kg/m^3 , cette teneur importante du ciment provoque un accroissement de la température des BAN due à la chaleur d'hydratation et engendre en plus une augmentation de leur coût, donc il est raisonnable de substituer une fraction du ciment par des additions minérales.

Alors dans cette phase, nous allons essayer non pas d'optimiser la nature et le dosage en ajouts minéraux, mais directement de voir leurs effets sur la maniabilité et la résistance, parce que comme nous avons vu dans la littérature que plusieurs recherches sont arrivés à fixer les quantités des additions à 30% pour les fillers calcaires, 40 ou 50% pour le laitier, et de 8 à 10% pour la fumée de silice. A cet effet, nous allons utiliser ces proportions et nous allons voir leurs effets sur les propriétés rhéologiques et mécaniques de notre béton.

Le tableau 4.6 exprime la composition des bétons et les additions minérales utilisées dans cette phase.

4.3.1 Effet sur la maniabilité des BAN

La figure 4.21 met en évidence l'effet des additions minérales sur la fluidité. Il est possible donc d'observer l'augmentation de l'étalement avec le dosage en filler calcaire (30% FC) à 77cm, cette amélioration est due à sa grande finesse, et leurs particules les plus fines qui peuvent remplir les vides entre les grains grossiers du ciment et libérer l'eau captive entre eux, et aussi à leur non réactivité lors de l'hydratation, c'est un résultat qui a été trouvé par plusieurs chercheurs [39] [40] [47] [51].

Contrairement aux FC, avec le même dosage en SP, le laitier qui a une surface spécifique relativement proche du ciment et à une fraction de 40%, il a tendance à diminuer l'étalement de 74 cm à 58 cm seulement, ce qui nous oblige de rajouter une nouvelle quantité de SP. Alors nous étions obligés d'augmenter le dosage en SP à 1.2% pour garder l'auto nivellement de notre béton à un étalement de 63 cm.

TAB.4.6- Composition des bétons optimisés avec additions minérales

| N° | Désignation | Ciment | | Addition | | Sable | | Eau | Superplast | | % SP |
|--------------------------------------|-------------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|------------|------|------|
| | | [l] | [kg] | [l] | [kg] | [l] | [kg] | [l] | [l] | [kg] | |
| 01 | 100%C | 182.45 | 574.74 | 0.00 | 0.00 | 292.39 | 742.67 | 229.89 | 5.37 | 5.74 | 1% |
| 02 | 70C+30FC | 123.41 | 388.75 | 66.64 | 166.6 | 292.48 | 742.89 | 222.14 | 5.18 | 5.55 | 1% |
| 03 | 60C+40LT | 106.44 | 335.30 | 81.87 | 223.53 | 292.45 | 742.82 | 223.53 | 5.22 | 5.58 | 1% |
| 04 | 60C+40LT | 106.44 | 335.30 | 81.87 | 223.53 | 291.41 | 740.18 | 223.53 | 6.26 | 6.7 | 1.2% |
| 05 | 90C+10FS | 159.17 | 501.39 | 29.79 | 55.71 | 292.47 | 742.87 | 222.84 | 5.20 | 5.57 | 1% |
| 06 | 90C+10FS | 159.17 | 501.39 | 29.79 | 55.71 | 291.43 | 740.23 | 222.84 | 6.24 | 6.68 | 1.2% |
| 07 | 90C+10FS | 159.17 | 501.39 | 29.79 | 55.71 | 290.39 | 737.59 | 222.84 | 7.28 | 7.8 | 1.4% |
| G=275l E/L=0.4 S/Pt=0.7 | | | | | | | | | | | |

La même remarque peut être faite pour l'utilisation de la fumée de silice, où nous avons constaté qu'avec un dosage de 10%, l'étalement diminue à 50 cm, et notre mélange augmente la demande en SP presque de 40% par rapport au mélange de 100% de ciment.

Donc on a augmenté le dosage en SP à 1.4% pour garder l'autonivellement de notre béton et avoir un étalement de 64 cm. Ce comportement s'explique peut être par la grande surface spécifique de la fumée de silice qui demande une dose plus élevée de SP pour assurer une bonne maniabilité [51].

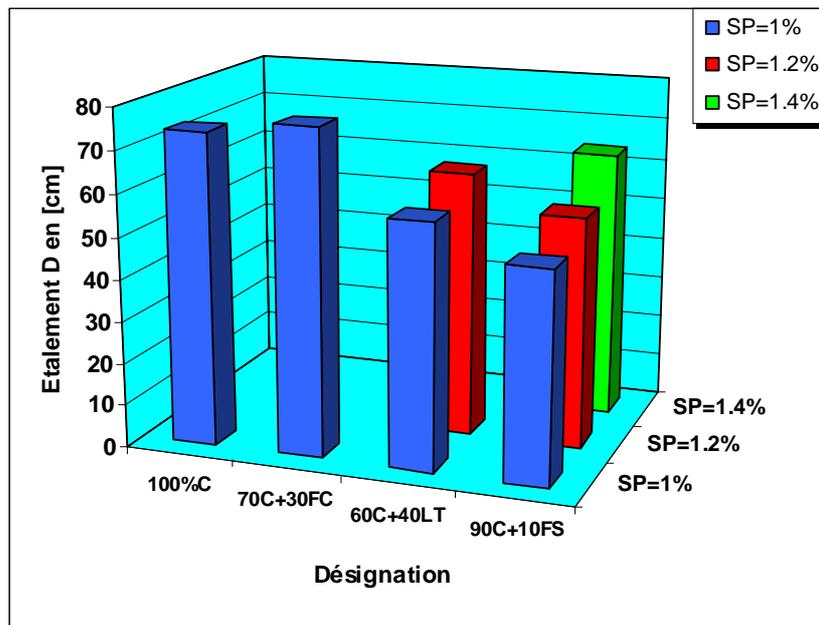


Fig. 4.21 - Effet des additions minérales sur la fluidité.

Le comportement de la déformabilité en fonction des additions minérales est associé directement à la fluidité des BAN. La figure 4.22 montre également l'effet bénéfique des FC sur la déformabilité où nous avons marqué une amélioration du taux de remplissage H_2/H_1 de 0.89 pour un mélange fabriqué à 100% de ciment, à 0.95 pour un mélange contenant une fraction de 30% de FC. Cependant pour les mélanges avec du laitier et de la fumée de silice, nous sommes obligés, comme nous l'avons expliqué dans la section précédente, d'augmenter la dose en SP à 1.2% et 1.4% respectivement pour améliorer la fluidité et par conséquent la déformabilité, de telle façon à obtenir un taux de remplissage de 0.78 pour le mélange contenant du laitier et 0.82 pour celui de la fumée de silice.

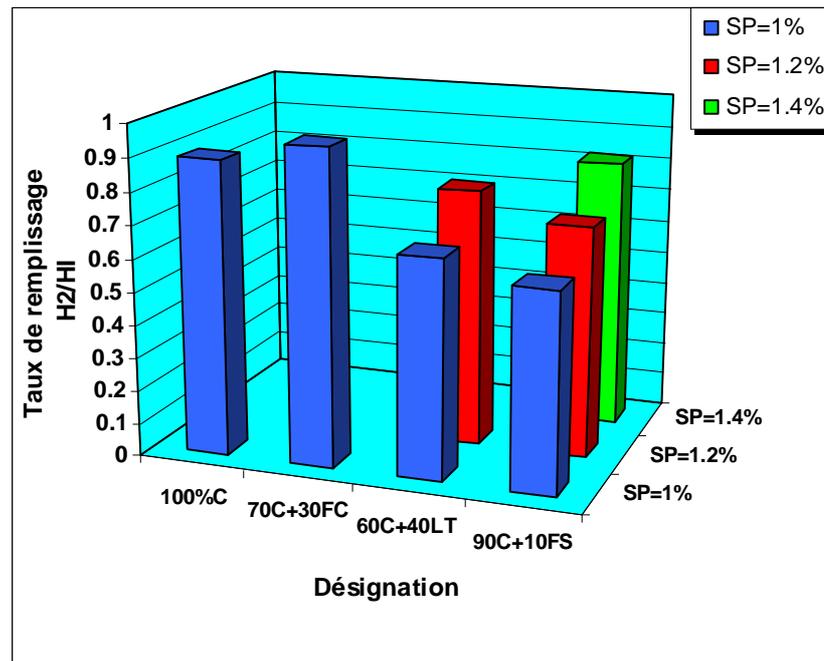


Fig. 4.22 - Effet des additions minérales sur la déformabilité.

L'amélioration de la stabilité en fonction des additions minérales est bien illustrée sur la figure 4.23. On note que l'incorporation de 30% de fillers calcaires peut diminuer l'indice de ségrégation de 13% (mélange 100%C) à 10% simplement.

La même constatation peut être faite pour l'utilisation du laitier ou de la fumée de silice, à un dosage en SP de 1% par exemple on a noté une diminution de l'indice de ségrégation à 4.5% et à 4% pour les mélanges contenant du laitier et de la fumée de silice respectivement. Même lorsqu'on a augmenté le dosage en SP à 1.4% pour la fumée de silice, nous avons enregistré un taux de ségrégation qui ne dépasse pas 5.5%.

Ces résultats s'expliquent du fait que les grains des additions minérales améliorent la granulométrie et peuvent augmenter la cohésion et la viscosité des BAN, ce qui rend très difficile de dissocier les constituants les uns des autres.

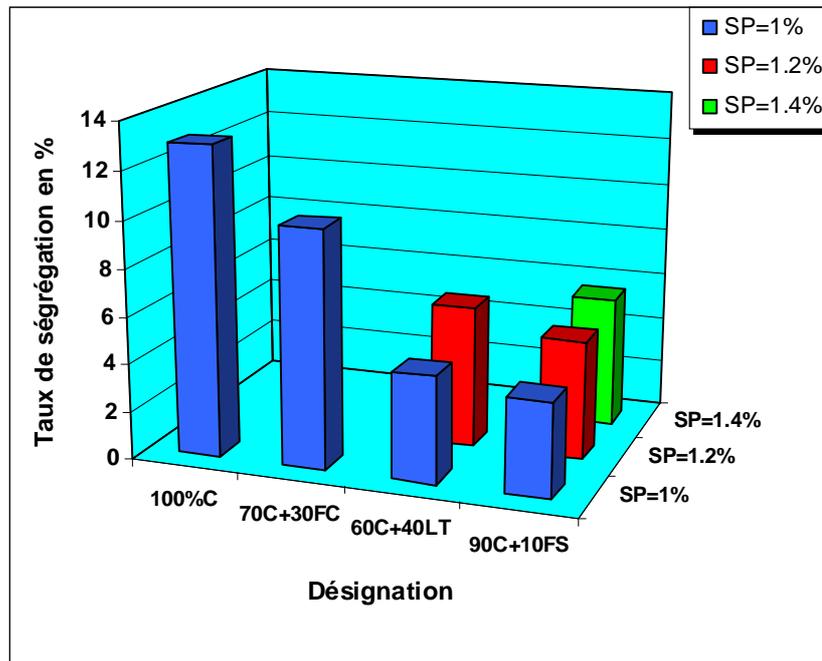


Fig. 4.23 - Effet des additions minérales sur la stabilité.

4.3.2 Effet sur les résistances mécaniques des BAN

En ce qui concerne l'effet des additions minérales sur la résistance à la compression, on note d'après la figure 4.24, que cette résistance s'avère inversement proportionnelle au dosage en fillers calcaires et au laitier, et proportionnelle au dosage en fumée de silice. A cet effet il paraît que l'incorporation de 30% de FC, peut diminuer la résistance à la compression de presque de 11.11% comparativement à un mélange de 100% de ciment, tandis que l'utilisation de 40% de laitier peut chuter cette résistance à 17.77%, alors que le remplacement de 10% de ciment par la fumée de silice peut améliorer cette résistance à 28.88%. Ces résultats ont été trouvés par plusieurs chercheurs à l'instar de [T.Naadia \[39\]](#) et [Y.Roussel \[47\]](#). Ce comportement s'explique par le fait que l'introduction d'une fraction d'ajouts minéraux, s'accompagne nécessairement par une diminution de la quantité de ciment et par conséquent conduit à un rapport E/C plus élevé, ce qui provoque une réduction de volume d'hydrates formées, d'où des résistances plus faibles. Cependant, l'incorporation de 10% de fumée de silice, (substitution utilisée par [M.Sonebi \[51\]](#) pour les travaux de réparation sous l'eau) est suffisante pour améliorer la résistance à la compression, et même nous offre des bétons à haute performance BHP (58MPa).

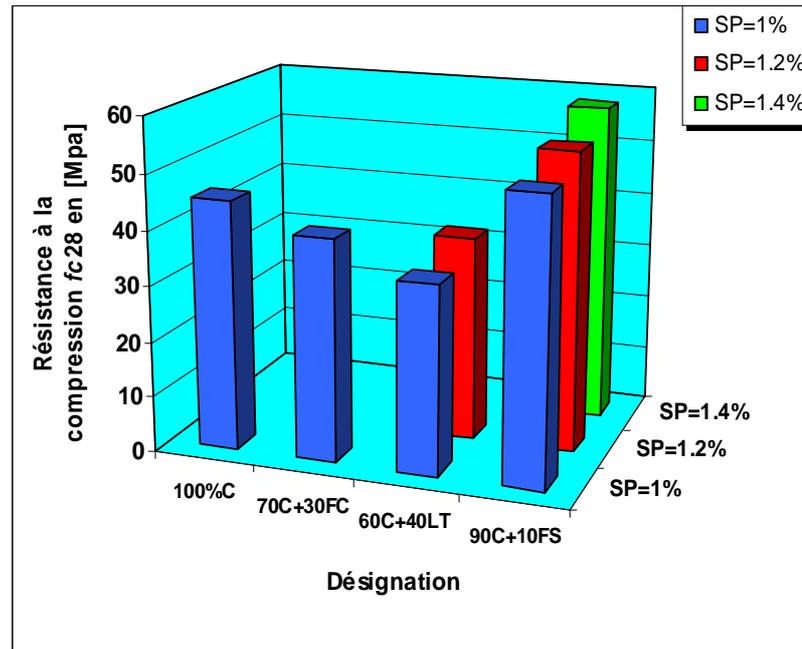


Fig. 4.24 - Effet des additions minérales sur la résistance à la compression.

La résistance à la traction des mélanges confectionnés avec des ajouts minéraux, peut prendre les mêmes allures que celles des résistances à la compression. Sur la figure 4.25 on peut lire une chute de la résistance à la traction pour les bétons fabriqués avec des substitutions des fillers calcaires et du laitier, cette chute est plus considérable avec un remplacement en laitier, où elle peut diminuer à 2.5MPa lorsqu'on utilise un dosage en SP=1%, et elle ne dépasse pas les 2.9MPa lorsqu'on augmente ce dosage à 1.2%.

Par ailleurs, la substitution de 10% de ciment par la fumée de silice, comme pour la résistance à la compression, donne une amélioration de la résistance à la traction, qui peut atteindre 3.6MPa, avec un dosage de SP=1% et 4.2MPa lorsque ce dosage s'élève à 1.4%.

Ce résultat s'explique du fait que les particules de FS peuvent améliorer le remplissage des vides inter granulaires, elles agissent comme fillers et améliorent l'adhérence de la pâte de ciment hydraté avec les granulats, plus particulièrement avec les grosses particules, ce qui permet aux granulats de mieux participer à l'interface des contraintes [41].

Enfin, et pour terminer avec cette section, on peut conclure que l'effet des additions minérales sur les propriétés rhéologiques ou mécaniques des BAN dépend essentiellement de la nature de ces additions, et aussi du dosage en super plastifiant, et l'effet commun de toutes ces additions est d'améliorer la stabilité des BAN quelque soit le dosage en adjuvant (super plastifiant).

(Pour plus d'informations se référer à l'annexe E).

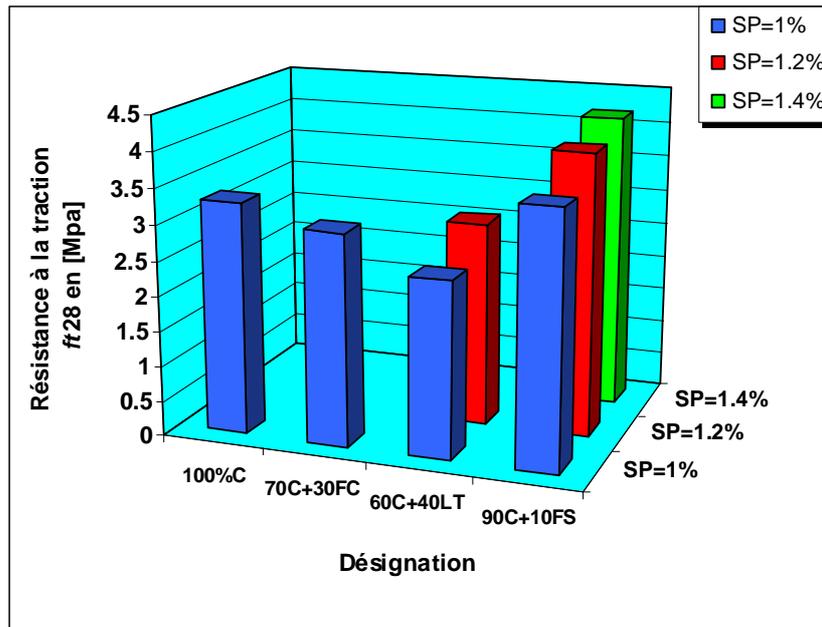


Fig. 4.25 - Effet des additions minérales sur la résistance à la traction.

4.4 Effet des fibres polypropylènes sur la maniabilité et la résistance des BAN

Cette section constitue la troisième phase de notre recherche, où nous allons essayer de voir l'effet des fibres polypropylènes sur la maniabilité et la résistance des BAN.

Le tableau 4.7 résume les compositions de tous les mélanges utilisés. A titre indicatif, nous avons utilisé pour les additions simplement celles qui ont assuré l'auto nivellement de nos bétons à des dosages différents en super plastifiant. Alors pour le dosage en fibres on est limité à un pourcentage fixé par le fournisseur par 0.6 Kg/m^3 .

TAB. 4.7 - compositions de différents mélanges utilisés avec fibres.

| N° | Désignation | SP% | Ciment | Addition | Sable | Eau | Superplast |
|--------------------|-------------|------|----------|---------------|--------|--------|------------|
| | | | [kg] | [kg] | [kg] | [l] | [kg] |
| 01 | 100%C | 1% | 574.74 | 0.00 | 742.67 | 229.89 | 5.74 |
| 02 | 70C+30FC | 1% | 388.75 | 166.6 | 742.89 | 222.14 | 5.55 |
| 03 | 60C+40LT | 1.2% | 335.30 | 223.53 | 740.18 | 223.53 | 6.7 |
| 04 | 90C+10FS | 1.4% | 501.39 | 55.71 | 737.59 | 222.84 | 7.8 |
| G=720.5 kg E/L=0.4 | | | S/Pt=0.7 | Fibres=0.6 kg | | | |

4.4.1 Effet sur la maniabilité des BAN

A l'état frais, il semble que l'utilisation des fibres polypropylènes a un effet remarquable sur la maniabilité. La figure 4.26 montre que la fluidité de tous les mélanges est affectée négativement par la présence des fibres, où nous avons enregistré un rapport de chute du diamètre de l'étalement du béton avec fibres sur l'étalement du béton sans fibres qui dépasse 0.87 pour tous les mélanges. Ce résultat a été confirmé par [Y.Roussel \[47\]](#) qui a trouvé que les fibres polypropylènes diminuent plus la maniabilité. Contrairement aux [G.Dreux et J.Festa \[11\]](#) qui ont constaté que les fibres polypropylènes ne diminuent pas la maniabilité, mais au contraire, elles ont tendance à l'améliorer.

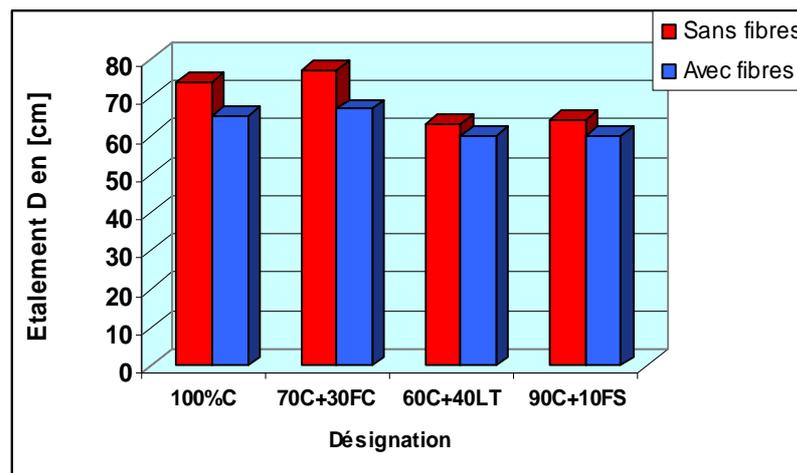


Fig. 4.26 - Effet des fibres polypropylènes sur la fluidité.

Le comportement de la déformabilité, comme nous l'avons vu précédemment, est associé directement à la fluidité. La figure 4.27 montre que la capacité de remplissage H_2/H_1 prend la même allure que celle de la fluidité, où nous avons marqué aussi une chute de taux de remplissage des bétons avec fibres, comparable ment aux bétons confectionnés sans fibres.

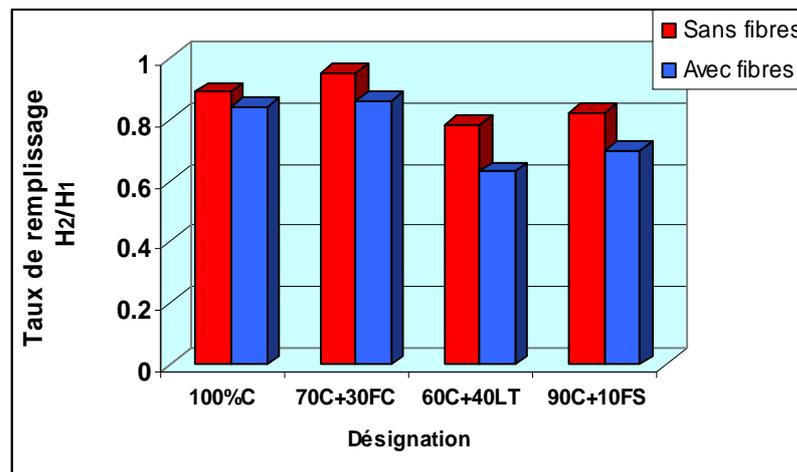


Fig. 4.27 - Effet des fibres polypropylènes sur la déformabilité.

L'amélioration de la stabilité en fonction des fibres polypropylènes est bien illustrée sur la figure 4.28. On note que l'incorporation d'une quantité de 0.6 Kg/m^3 peut diminuer l'indice de ségrégation aux valeurs très faibles (cas du laitier et de la fumée de silice). Cette amélioration est peut être due à l'effet que l'utilisation des fibres polypropylènes demande plus de super plastifiants, pour atteindre une même maniabilité pour des bétons fabriqués avec des fibres métalliques d'après [Y.Roussel \[47\]](#). Donc c'est une affirmation discrète que les fibres polypropylènes diminuent le ressuage et améliorent la stabilité. Nous avons trouvé aussi dans la littérature [H.Mesbah](#) rapporté par [K.Guedri \[16\]](#) que les fibres polypropylènes, comme les granulats, ont tendance à retenir une quantité d'eau, alors ce qui influe positivement sur le comportement de la stabilité des bétons.

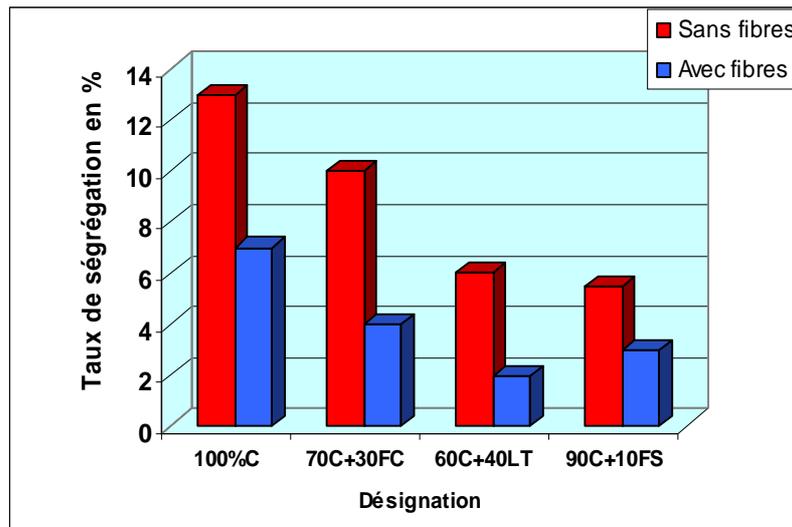


Fig. 4.28 - Effet des fibres polypropylènes sur la stabilité.

4.4.2 Effet sur les résistances mécaniques des BAN

Les fibres en général ne jouent pas un grand rôle pour l'amélioration de la résistance à la compression, toutefois, cette résistance n'étant pas modifiée [11]. A cet effet, sur la figure 4.29 nous avons remarqué une légère chute de résistance pour le béton confectionné sans ajouts minéraux. Par ailleurs, on a constaté qu'il y a une petite amélioration de la résistance pour les bétons contenant des substitutions en additions minérales. Cependant ces deux comportements différents, n'expliquent pas l'effet que ce soit négatif ou positif des fibres sur la résistance à la compression. Pourtant, pour notre étude, la résistance à la compression ne soit pas une propriété mécanique discriminante des matériaux de réparation car ce n'est pas elle qui gouverne le comportement mécanique du système de réparation.

Pour la résistance à la traction, presque les mêmes remarques précédemment citées, peuvent être projetées maintenant. La figure 4.30 nous apporte une légère augmentation avec le béton contenant de la fumée de silice, tandis qu'il n'y a aucun changement dans les résistances à la traction pour le béton sans ajouts minéraux, ou le béton contenant du filler calcaire.

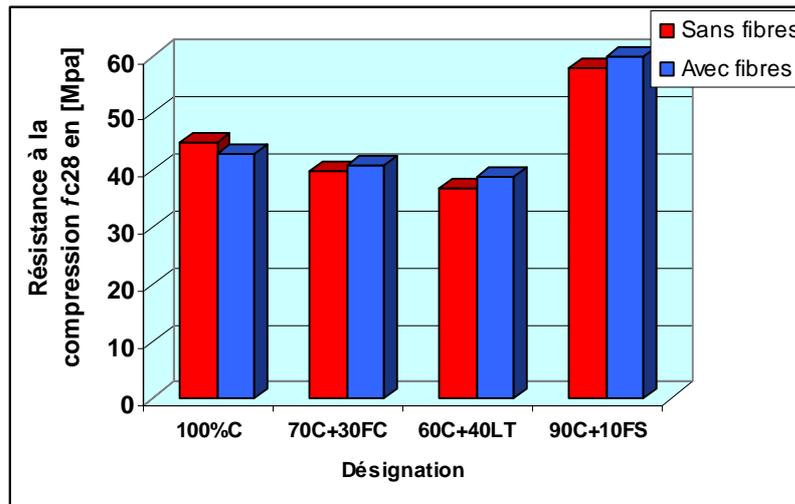


Fig. 4.29 - Effet des fibres polypropylènes sur la résistance à la compression.

Cependant, nous avons constaté une petite diminution pour le béton contenant du laitier. La seule remarque qui peut être notée ici, est que lors de l'essai à la traction par flexion, nous avons remarqué que le mode de rupture des bétons avec fibres ne se fait pas brusquement, et les parties de l'éprouvette après fissuration restent coller les unes aux autres par la présence des fibres. C'est sans aucun doute l'effet bénéfique apporté par la présence de fibres polypropylènes dans le béton, comme l'affirment [G.Dreux et J.Festa \[11\]](#), q'une moindre fragilité due à l'augmentation de la déformabilité, le béton ne se rompe plus brusquement sous l'effet de l'ouverture d'une fissure, mais se micro fissure, et chaque micro fissure étant momentanément cousue par la présence des fibres qui, retardent ainsi la rupture [11]. (Pour plus d'informations se référer à l'annexe F).

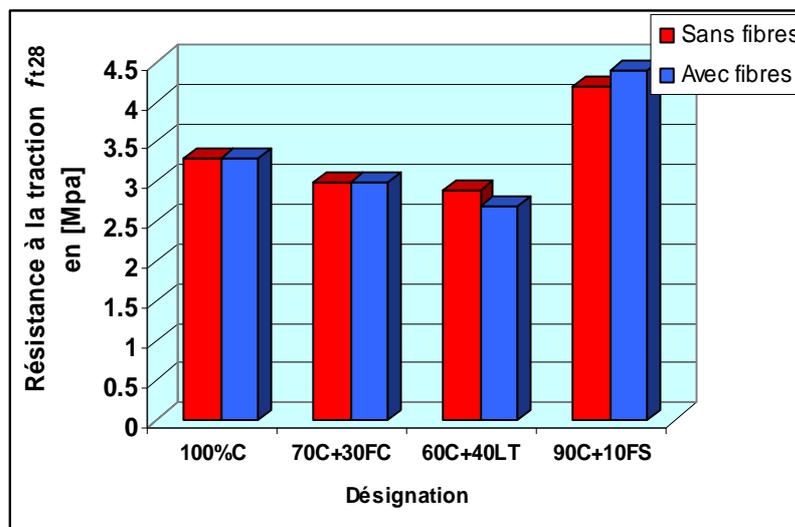


Fig. 4.30 - Effet des fibres polypropylènes sur la résistance à la traction.

4.5 Effet de la résine sur la maniabilité et la résistance des BAN

Malgré, que nous n'avons trouvé aucune étude qui fait l'objet sur l'utilisation des résines pour les BAN, alors nous avons essayé d'entamer ce domaine, avec nos moyens simples, et voir en même temps leur effet sur la maniabilité et la résistance de ces BAN.

Donc, dans cette avant dernière phase de notre recherche, nous avons utilisé les mêmes formulations que celles utilisées précédemment, c'est à dire la formulation principale à 100% de ciment et aussi celles contenant des additions minérales.

L'introduction de la résine (latex), se fait avec un dosage de 25% d'eau, c'est à dire à un quart pour chaque litre.

Notre choix, d'utilisation de la résine n'est pas arbitre, car d'après la littérature, elle peut améliorer les caractéristiques des bétons qui comportent, comme la bonne adhésion, l'imperméabilisation et la meilleure résistance à la traction, etc.

4.5.1 Effet sur la maniabilité des BAN

L'effet de la résine sur la fluidité est bien illustré sur la figure 4.31, où nous pouvons constater que tous les mélanges présentent un diamètre d'étalement D qui dépasse le seuil exigé par l'AFGC[1], donc il y a une amélioration considérable pour la fluidité.

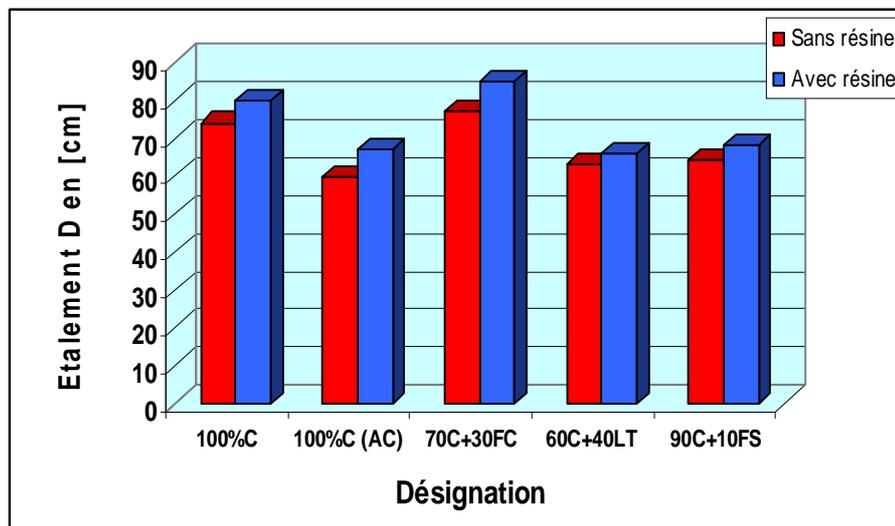


Fig. 4.31- Effet de la résine sur la fluidité.

Contrairement à la fluidité et malgré qu'éventuellement la déformabilité prend l'allure de la fluidité, cette fois ci, avec l'utilisation des résines, nous avons marqué des taux de remplissages H_2/H_1 , très loin de celui demandé par l'AFGC. Par exemple, comme

le montre la figure 4.32, pour un béton sans ajouts le taux de remplissage ne dépasse pas 0.46, alors qu'il chute à 0.35 pour un béton confectionné avec de la fumée de silice, le bon résultat ne dépasse pas 0.55 pour un béton contenant des fillers calcaires. Ce comportement de chute libre du taux de remplissage, peut être dû à la polymérisation (association) des molécules identiques engendrant la formation de molécules plus grosses [11], ce qui provoque l'accolement des grains de gravier les uns aux autres au fond de la boîte en-L, et ne laissent pas la pâte s'écouler vers sa partie horizontale. On a trouvé même de très grande difficulté lors de nettoyage de la boîte, parce que le béton avec la résine durci plus rapidement et la pâte au bout d'une demi heure se transforme en colle.

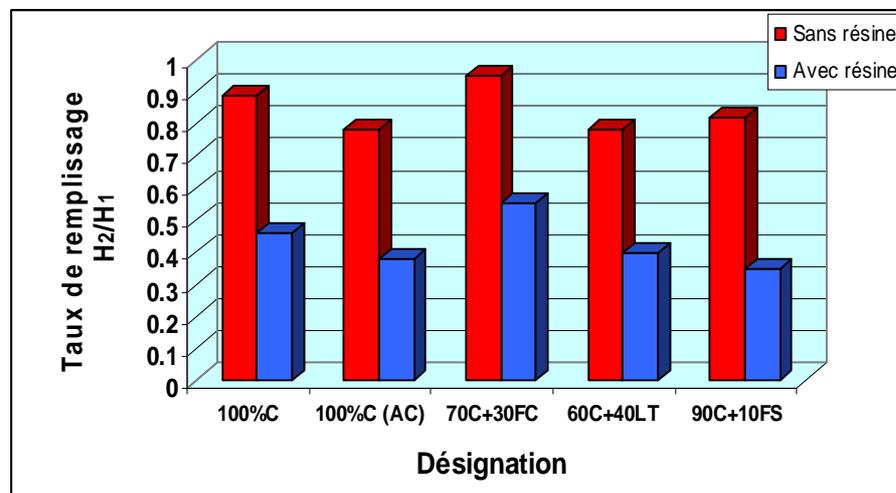


Fig. 4.32 - Effet de la résine sur la déformabilité.

De même, l'utilisation de la résine, n'assure pas une bonne stabilité au béton. À cet effet, nous avons constaté un surplus de ressuage pour la formulation de base (BAN-1) où le taux de ségrégation arrive à une valeur incroyable de 20%, et notre béton n'est plus stable.

Pour corriger ce problème de ressuage, nous sommes obligés d'utiliser la formulation (BAN-2) avec un dosage de 0.015% d'agent colloïdal, avec cette formulation le taux de ségrégation s'abaisse à 12%, mais de nouveau nous sommes confrontés au problème de la déformabilité, où nous avons enregistré un taux de remplissage H_2/H_1 de 0.38 simplement, ce taux est plus loin du taux demandé par l'AFGC ($H_2/H_1 \geq 0.8$).

Les fillers calcaires n'ont aussi aucune tendance de diminuer l'indice de ségrégation avec l'utilisation de la résine, nous avons également trouvé un taux de 22%,

comme il est montré sur la figure 4.33. Seulement les mélanges contenant du laitier ou de la fumée de silice qui sont stables, et avec des indices de ségrégations moins de 15%, malheureusement, ne sont pas autonivelants, car le critère de la déformabilité n'est pas rempli.

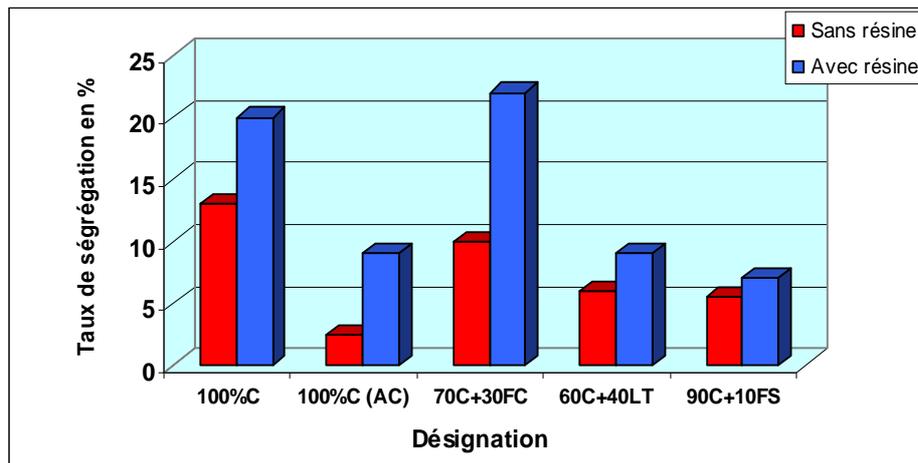


Fig. 4.33 - Effet de la résine sur la stabilité.

A la lumière de ces résultats, on peut conclure qu'avec les résines et d'une dose de 25% d'eau, on ne peut pas fabriquer des BAN à la base de notre formulation de rapports $S/Pt=0.7$; $E/C=0.4$; $G=275$ et $SP=1\%$. Même avec l'utilisation des additions minérales, parce que dans tous les cas, le critère de la déformabilité n'est plus rempli, et dans le cas de mélange à 100% (ciment), et celui avec l'utilisation des fillers calcaires, en plus de la déformabilité, la stabilité n'est plus assurée.

4.5.2 Effet sur les résistances mécaniques des bétons

Malgré que l'utilisation de la résine ne nous offre pas des BAN, vu que deux critères (la déformabilité et la stabilité) sur trois ne sont pas remplis, nous essayons dans cette section d'aller de notre étude jusqu'au bout, et de savoir leur effet sur les résistances à la compression et à la traction.

La figure 4.34 met le point sur l'effet des résines sur la résistance à la compression, où nous pouvons constater une chute de cette résistance pour tous les mélanges. La diminution peut être due à l'effet de ressuage et à la cure humide qui a été appliqué à cette série de béton. Cependant l'amélioration des propriétés du béton confectionné avec des résines nécessite l'ensèchement, ou moins partiel, afin que le film de polymère se forme.

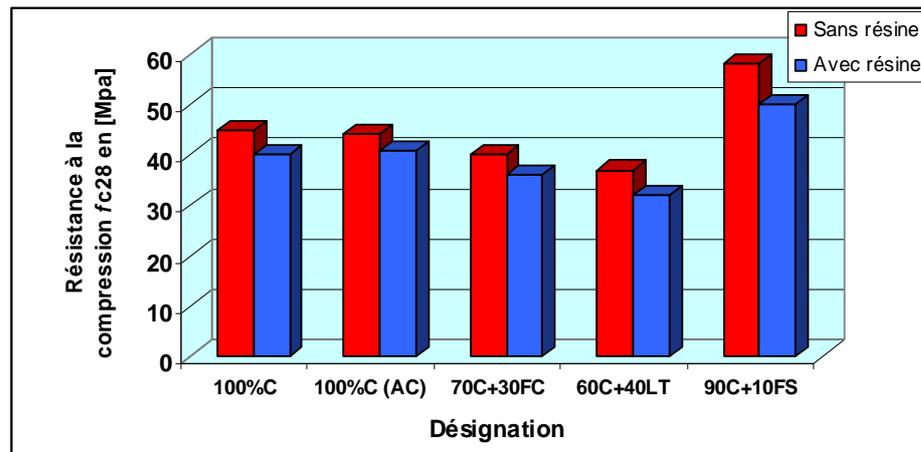


Fig. 4.34 - Effet de la résine sur la résistance à la compression.

De la même façon, une légère diminution a été constatée pour les résistances à la traction de tous les mélanges confectionnés avec de la résine, comme il est indiqué sur la figure 4.35, cette diminution peut être due à la cure humide aussi.

(Pour plus d'informations se référer à l'annexe G).

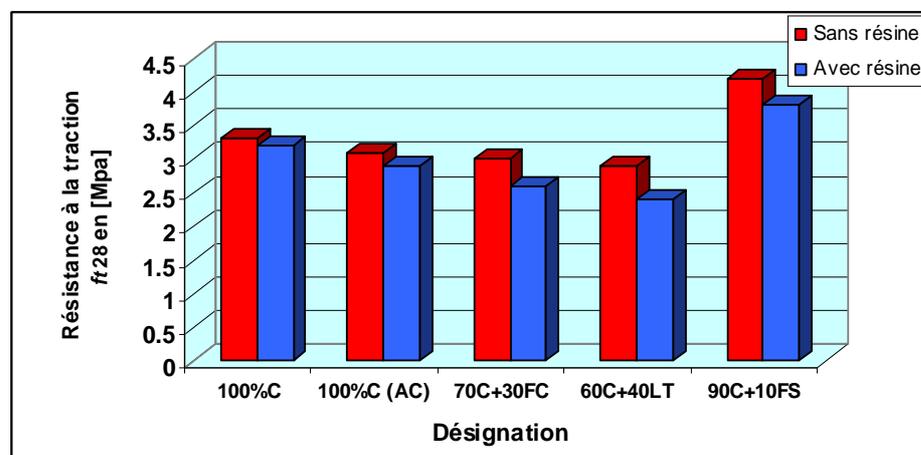


Fig. 4.35 - Effet de la résine sur la résistance à la traction.

4.6 Comparaison des propriétés mécaniques des BAN à celles d'un BO

A l'exclusion des bétons confectionnés avec de la résine, qui ne sont pas auto nivelants, et à partir des analyses précédentes nous avons sélectionné dans cette section neuf bétons qui sont tous autonivelants, et de comparer leurs propriétés mécaniques, avec celles d'un béton ordinaire témoin qui ne contient ni de super plastifiant, ni des additions.

A titre de rappel, la formulation du béton ordinaire, est prise d'un projet de recherche (d'une chercheuse) de l'université USTHB- Alger [31].

Le tableau 4.8 regroupe les dosages de tous les mélanges, ainsi que leurs résistances à la compression f_{c28} . (Pour plus d'informations se référer à l'annexe H).

TAB.4.8. Compositions des BAN optimisés et du BO.

| N° | Désignation | Gravier | Sable | Ciment | Addition | Eau | SP | $f_{c_{28}}$ |
|----|--------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|---------------------|-----|--------------|
| | | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [l/m ³] | % | [MPa] |
| 01 | BAN | 720.5 | 742.67 | 574.74 | 0.00 | 229.89 | 1 | 45 |
| 02 | BAN (fibres) | 720.5 | 742.67 | 574.74 | 0.00 | 229.89 | 1 | 43 |
| 03 | BAN (AC) | 720.5 | 742.67 | 574.74 | 0.00 | 229.89 | 1 | 44 |
| 04 | BAN (FC) | 720.5 | 742.89 | 388.75 | 166.6 | 222.14 | 1 | 40 |
| 05 | BAN (FC+f) | 720.5 | 742.89 | 388.75 | 166.6 | 222.14 | 1 | 41 |
| 06 | BAN (LT) | 720.5 | 740.18 | 335.30 | 223.53 | 223.53 | 1.2 | 37 |
| 07 | BAN (LT+f) | 720.5 | 740.18 | 335.30 | 223.53 | 223.53 | 1.2 | 39 |
| 08 | BAN (FS) | 720.5 | 737.59 | 501.39 | 55.71 | 222.84 | 1.4 | 58 |
| 09 | BAN (FS+f) | 720.5 | 737.59 | 501.39 | 55.71 | 222.84 | 1.4 | 60 |
| | | E/L=0.4 | S/Pt=0.7 | Fibres=0.6 kg/m ³ | | | | |
| N° | Désignation | Gravier7/15 | Gravillons3/8 | Sable | Ciment | Eau | E/C | $f_{c_{28}}$ |
| | | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [l/m ³] | | [MPa] |
| 10 | BO | 851 | 261 | 630 | 400 | 200 | 0.5 | 39 |

4.6.1 Evaluation de la résistance à la compression aux différents âges

L'évolution de la résistance à la compression aux différents âges est bien illustrée sur la figure 4.36, où nous pouvons lire qu'au jeune âge tous les mélanges sauf ceux qui contiennent du laitier développent des résistances plus élevées que le béton ordinaire. A titre d'exemple le mélange (BAN) à l'âge de 14j représente une résistance de l'ordre de

82% de la résistance du béton ordinaire à 28j, alors que le mélange BAN (FS) développe une résistance à l'ordre de 115.38% de celle du béton ordinaire à l'âge de 28j aussi.

Les bétons à base de laitier favorisent des résistances à 14j inférieures à celle du béton ordinaire, car d'une part le laitier à l'âge de 14j n'a pas encore du temps pour contribuer à l'augmentation de la résistance, et d'autre part, le béton à base de laitier contient un dosage en ciment plus faible.

A long terme et à l'âge de 90j, on constate que tous les BAN optimisés ont donné des résistances à la compression plus élevées à celle du béton ordinaire, même avec les BAN contenant du laitier, qui a maintenant du temps pour contribuer à l'amélioration de la résistance par sa propriété pouzzolanique.

Cependant, ce n'est pas le même cas avec les BAN à base de fillers calcaires qui présentent des résistances à 90j les plus faibles dans l'ensemble, mais à peu près très proches à celle du béton ordinaire.

D'une façon générale, tous les BAN présentent des résistances importantes à long terme, et même les additions minérales, à l'exception du filler calcaire, ont contribué à cette amélioration par le fait de l'hydratation due à leurs propriétés pouzzolaniques.

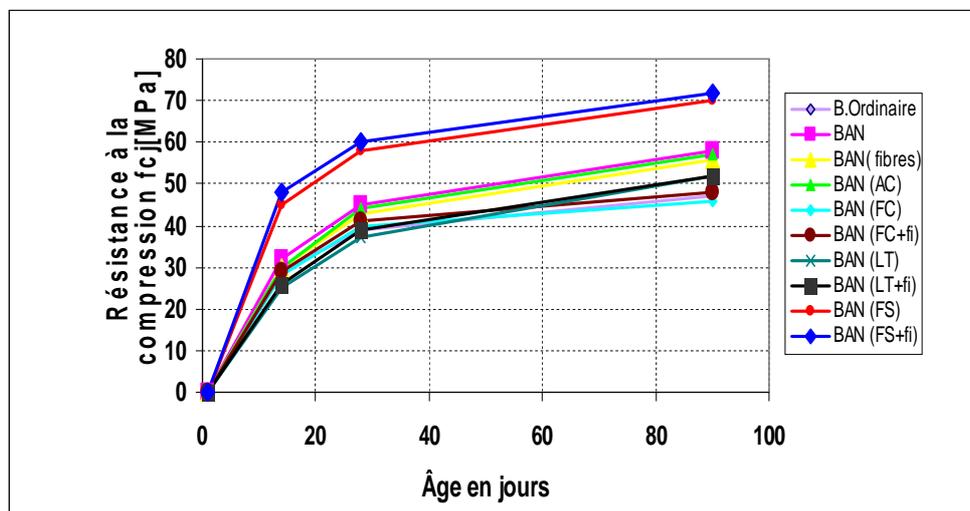


Fig. 4.36 - Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps.

4.6.2- Evaluation de la résistance à la traction des BAN optimisés

D'après la figure 4.37, on remarque que tous les BAN ont développé des résistances à la traction légèrement supérieures à celle du béton ordinaire, sauf le mélange contenant du laitier, qui a donné une résistance peu moins à celle du béton ordinaire, cette diminution peut être due à le fait que ce mélange contient une quantité plus moins de ciment, et de plus le laitier à l'âge de 28j n'a pas encore développé ses caractères mécaniques.

La plus grande différence, nous avons remarqué dans les mélanges contenant des fumées de silice, qui ont développé des résistances à la traction plus élevées.

Ces bons résultats sont principalement obtenus grâce à l'homogénéité et la bonne répartition entre les granulats de la pâte liante. Cette homogénéité est assurée par la présence du super plastifiant qui disperse l'empilement des grains de ciment et les particules de fumée de silice [31].

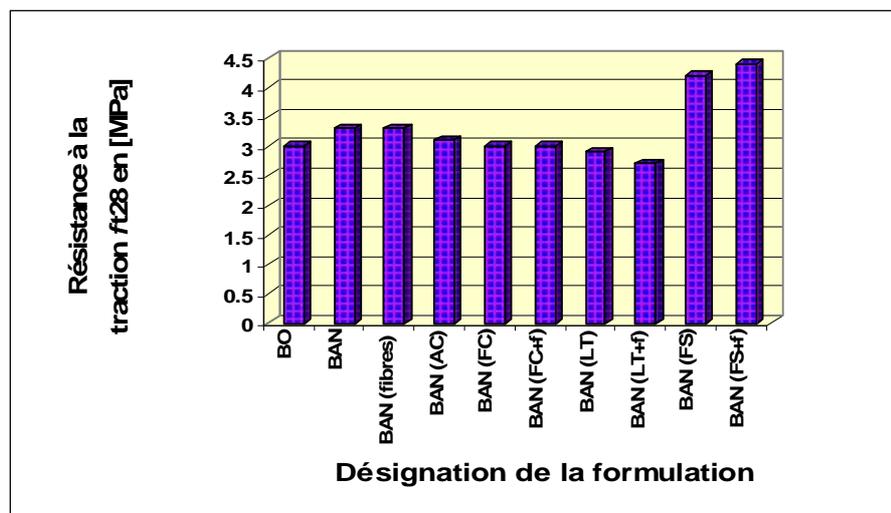


Fig. 4.37 - Résistance à la traction à 28j des BAN optimisés et du BO.

4.6.3 Evaluation du module élastique

Généralement le module élastique est affecté par la teneur en gravier, c'est pourquoi les BAN sont susceptible d'être plus déformables que les bétons ordinaires.

A cet effet il est possible de remarquer sur la figure 4.39, que le module élastique de tous les BAN, à part les mélanges qui contiennent de la fumée de silice, est

systématiquement inférieur à celui du béton ordinaire. Ce résultat est prouvé par plusieurs chercheurs [54] [28] [38] et confirmé par l' AFGC [1].

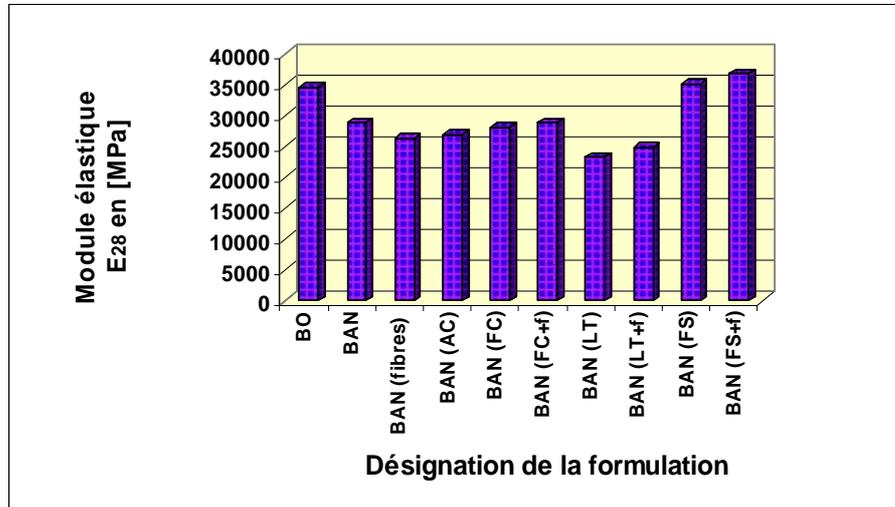


Fig. 4.38 - Module élastique à 28j des BAN optimisés et du BO.

Maintenant on essaye de calculer le module élastique suivant le [BAEL91] qui évalue la valeur du module élastique en fonction de la résistance caractéristique du béton de la manière suivante :

$$E_{cm} = 11000 f_{ck}^{1/3}$$

Dans ces relations E_{cm} et f_{ck} sont exprimés en MPa. [12].

Le tableau 4.9 regroupe les résultats du module élastique pour les deux méthodes.

TAB 4.9 Module élastique à 28j (comparaison entre les deux méthodes)

| Désignation | f_{c28} [MPa] | E_{28} calculé en [MPa] (BAEL91) | E_{28} mesuré en [MPa] (laboratoire) |
|-----------------|--------------------|---------------------------------------|---|
| B ordinaire | 39 | 37303 | 34500 |
| BAN | 45 | 39125 | 28800 |
| BAN (fibres) | 43 | 38537 | 26250 |
| BAN (0.015% AC) | 44 | 38834 | 27000 |
| BAN (30% FC) | 40 | 37619 | 28200 |
| BAN (30% FC+fi) | 41 | 37930 | 28800 |
| BAN (40% LT) | 37 | 36654 | 23250 |
| BAN (40% LT+fi) | 39 | 37303 | 24750 |
| BAN (10% FS) | 58 | 42580 | 35250 |
| BAN (10% FS+fi) | 60 | 43063 | 36750 |

L'analyse des résultats représentés au tableau 4.9, montre que pour le cas calculé par la formule du [BAEL91], le rapport du module élastique du BO et celui des BAN, se situe dans une plage de 0.98 à 1.15, parce que ces résultats dépendent essentiellement des résistances f_{c28} , et vu que les BAN représentent des résistances à la compression plus élevées, alors leurs modules élastiques automatiquement seront plus grands, ce qui contredit plusieurs recherches. Cependant le rapport du module élastique du BO et celui des BAN, pour le cas mesuré, peut varier dans un intervalle de 0.67 à 1.06, ce qui explique la différence entre ces modules, et les BAN qui renferment les modules élastiques les plus faibles, sont susceptible d'être plus déformables.

4.6.4 Evaluation du retrait total

Pour notre étude, et avant de commencer l'interprétation, il est important de rappeler qu'à défaut de moyens, et le manque de temps, j'ai suivi simplement le retrait de sept bétons.

Comme nous avons vu dans la partie bibliographique, plusieurs chercheurs ont trouvé que le retrait des BAN est systématiquement plus grand que celui des bétons ordinaires [38] [54] [1]. Alors, sur la figure 4.40 on peut identifier les constatations suivantes : Tout d'abord tous les BAN développent un retrait plus grand que celui du BO, à

part le BAN (FC) et le BAN (LT), ce comportement peut être expliqué par le fait que ces deux bétons renferment une faible quantité de ciment, qui est plus proche à celle du BO.

Ensuite les courbes des BAN, BAN avec fibres, et BAN avec AC, se superposent avec une légère augmentation pour le retrait du béton avec agent colloïdal, ce qui nous montre que les fibres polypropylènes n'ont aucun effet sur le retrait des bétons.

Finalement on marque un retrait total très important développé par le BAN (FS), il semble que le surplus du dosage en super plastifiant (1.4%) et la grande finesse de la fumée de silice soient en grande partie responsable du retrait plus important [47].

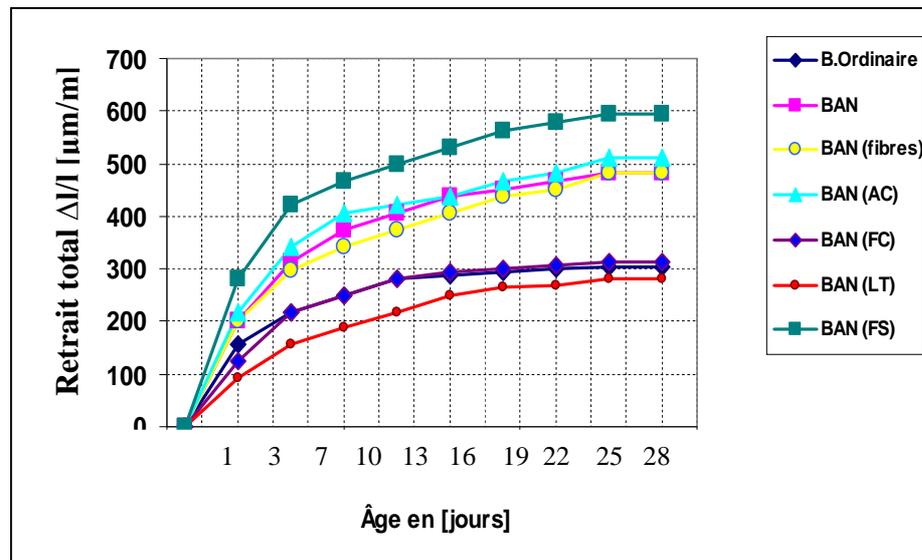


Fig.4.39 : Retrait total de dérivés des BAN optimisés et du BO.

4.7 Réparation des éléments avec BAN

Dans les phases précédentes de notre étude, nous avons procédé à la formulation et la caractérisation des BAN, où nous avons étudié également l'effet des additions minérales, des fibres, et des résines sur leur maniabilité et leur résistance, essayons maintenant dans cette phase d'évaluer l'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton.

La procédure de préparation et la réparation des éprouvettes, ainsi que la description des essais de l'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton, sont décrites dans les sections 3.5.1 et 3.5.2 du troisième chapitre.

Rappelons simplement que les travaux de réparation ont été effectués sur des simulations fabriquées en béton ordinaire dont la composition est exprimée au tableau 4.8.

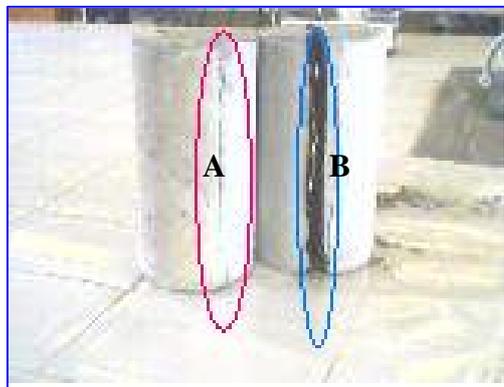
4.7.1 Examen visuel des surfaces de rupture

Après éclatement du béton (éprouvettes composites en béton ancien et béton nouveau), nous avons constaté que l'examen visuel des surfaces de rupture, nous conduit vers l'obtention des deux grands modes de rupture :

Mode 1 : ce mode concerne les surfaces de rupture observées pour les bétons de réparation contenant des fibres polypropylènes, dans ce cas on remarque qu'après l'éclatement les deux parties de l'éprouvette composite (nouveau et ancien béton) restent retenues l'une à l'autre par la présence des fibres (formation des microfissures).

Mode 2 : vu que ce mode concerne les surfaces de rupture, pour les bétons de réparation qui ne contiennent pas des fibres, où nous avons remarqué que l'éclatement du béton se fait d'une façon brusque et les deux parties de l'éprouvette composite se décollent par fragilité l'une de l'autre. Dans ce mode on peut différencier aussi deux sous modes :

- ❖ Le premier sous mode de rupture se caractérise par un décollement complet du nouveau béton exactement à son interface avec l'ancien béton, et il ne reste coller au support que quelques amas minuscules de pâte de nouveau béton, et la surface originale du support demeure intacte comme si nous n'avons appliqué aucune réparation.
- ❖ Le deuxième sous mode de rupture se caractérise par un plan de rupture situé seulement quelque millimètre au dessus du plan de collage. Ce sous mode expose les granulats du nouveau béton sans les fracturer, comme il nous permet d'observer sur le coté ancien béton de l'éprouvette, une mince couche de nouvelle pâte de ciment qui adhère fortement au support.



Phot. 4.1- Modes de rupture. A : avec fibres, B : sans fibres.

4.7.2 Evaluation de la contrainte d'adhérence entre ancien et nouveau béton

Pour évaluer la contrainte d'adhérence entre ancien et nouveau béton, nous avons procédé aux méthodes déjà exposées dans la section 3.5.2 du troisième chapitre.

A titre de rappel, on a utilisé une méthode inspirée de la norme CRD C85, pour évaluer la contrainte d'adhérence au niveau des réparations effectuées sur des éprouvettes prismatiques, et cette contrainte sera estimée par le rapport de la charge à la rupture et de la surface, et le tout est affecté d'un facteur de correction estimé à 0.98.



Phot. 4.2. Dispositif pour mesurer la résistance à l'adhérence.

Pour les réparations effectuées sur des éprouvettes cylindriques, on a utilisé la méthode calculant la résistance en traction par fendage, dite aussi « Essai Brésilien » et la contrainte sera calculée par la formule suivante : $f_t = 2P/\pi DL$,

Avec : P, est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du plan diamétral vertical ; D et L, sont le diamètre et la longueur du cylindre.

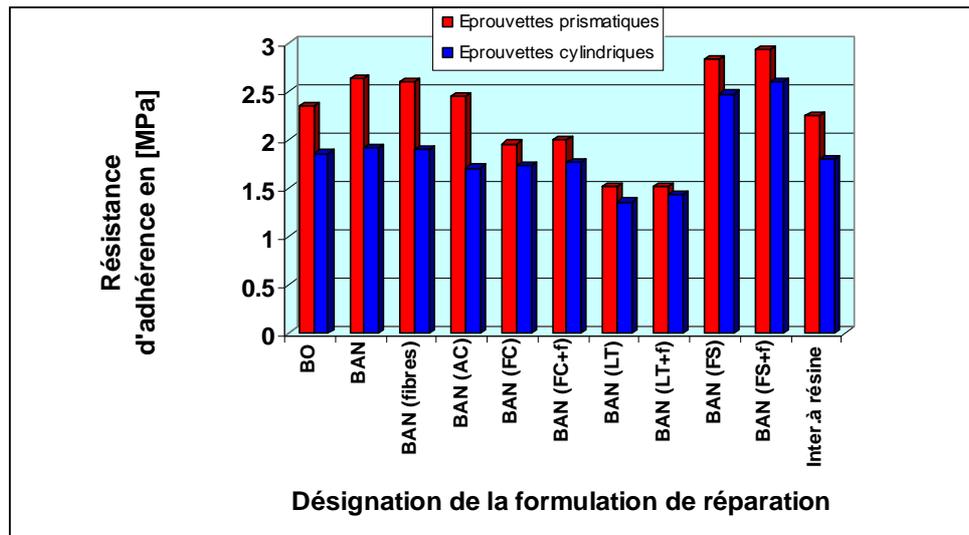


Fig. 4.40 - Résistance à l'adhérence pour les différents mélanges de réparation.

La première constatation qu'on peut tirer de l'étude de la figure 4.40 est que l'essai sur les éprouvettes prismatiques donne des résistances à l'adhérence plus grandes en valeur comparablement à l'essai sur des éprouvettes cylindriques.

La deuxième remarque est que les valeurs de la résistance à l'adhérence prennent, d'une façon générale l'allure des valeurs des résistances à la traction, où nous pouvons constater que les mélanges contenant 10% de fumée de silice, que se soit en fibres ou non, offrent les meilleurs résistances à l'adhérence, résultat prouvé par M.Sonebi [51]. Les plus faibles résistances à l'adhérence sont celles des mélanges avec du laitier, cela peut être dû au faible rapport de ciment dans ces mélanges (335.5 kg/m^3 simplement).

L'utilisation des fibres polypropylènes ne donne pas une indication sur l'amélioration ou la diminution de la résistance à l'adhérence parce que nous avons constaté une légère amélioration de l'adhérence pour les mélanges contenant de la fumée de silice et des fillers calcaires, au contraire il y a une petite diminution pour le BAN fabriqué à 100% de ciment. Cependant, on peut dire que la présence des fibres n'a pas pour objectif d'augmenter la résistance à la traction ou à l'adhérence, mais de favoriser un comportement ductile permettant un contrôle de la fissuration dans les réparations minces[35].

Si on fait la comparaison avec du béton ordinaire, on trouve qu'à part les mélanges confectionnés avec les fillers calcaires et le laitier, tous les autres mélanges donnent des résistances à l'adhérence plus élevées.

On a également remarqué, avec une interface fabriquée en mortier à base de résine, que la résistance à l'adhérence est médiocre (2.25MPa), c'est un résultat qui peut être expliquée par le fait que les bétons à base de résine demandent l'ensèchement. Et la cure humide comme nous avons appliqué à cette série de béton, a un effet négatif sur le comportement mécanique.

(Pour plus d'informations se référer à l'annexe I).

4.8 Bilan

L'étude que nous avons menée dans ce chapitre forme la structure principale de notre programme expérimental, qui a pour objectif de formuler et de caractériser des BAN pour les travaux de réparation.

Tout d'abord et suivant les résultats obtenus dans ce chapitre, nous avons apporté également une meilleure compréhension de l'effet des paramètres clés (volume de gravier, les rapports S/Pt, et E/C, le pourcentage du dosage en SP et en agent colloïdale), ainsi que les additions minérales, l'incorporation des fibres polypropylènes, l'utilisation de la résine, sur la fluidité, la déformabilité, la stabilité, les résistances à la compression et à la traction, le module élastique, et le retrait.

Ensuite, nous avons essayé d'appliquer ce type de béton aux travaux de réparation, tout en évaluant la résistance à l'adhérence qui se développe entre l'ancien (béton ordinaire) et le nouveau béton (réparation en BAN), afin de la comparer avec une réparation en béton ordinaire, où nous avons remarqué que l'utilisation des BAN dans les travaux de réparation offre les meilleures résistances à l'adhérence, notamment ceux qui contiennent de la fumée de silice, comparablement au béton ordinaire.

Conclusion générale et recommandations

Notre étude forme un pas pour l'utilisation des BAN dans les travaux de réparation. En portant une attention particulière sur leur maniabilité et leur durabilité, ainsi que sur la résistance à l'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton.

D'une façon globale, notre mémoire se subdivise en deux grandes parties :

— La première est une recherche bibliographique répartie sur deux chapitres : Le premier chapitre présente un aperçu détaillé sur la réparation des ouvrages en béton dégradés, où l'on a essayé d'effectuer un balayage sur le contexte de réparation, les causes et les origines de dégradation, ainsi que les facteurs qui affectent la durabilité des bétons. Ensuite nous avons soulevé le problème de la réparation, sa stratégie et ses difficultés, telles que la fissuration et la perte d'adhésion avec le substrat.

Enfin nous avons abordé la définition d'une réparation durable, les méthodes d'obtention de la compatibilité déformationnelle, et l'utilisation des BAN dans les travaux de réparation, tout en donnant des exemples concrets sur l'emploi de ce type de béton dans le monde entier.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le concept, les caractérisations des BAN à l'état frais et à l'état durci, leurs principaux constituants, les additions, les fibres polypropylènes, et la résine, ainsi que leurs effets sur les propriétés rhéologiques et mécaniques. Et enfin nous avons présenté la formulation et quelques exemples de formules des BAN.

— La seconde partie est consacrée aux travaux de laboratoire, où nous avons présenté au troisième chapitre, les normes, les mélanges et les procédures à suivre au cours de l'étude.

Le dernier chapitre forme le squelette principal de notre travail dont l'objectif n'est pas simplement de formuler et caractériser des BAN, mais aussi pour les utiliser dans les travaux de réparation et évaluer la résistance à l'adhérence qui peut se développer entre l'ancien et le nouveau béton.

Suivant les résultats obtenus dans notre étude, il est important de tirer les conclusions suivantes :

- aux rapports $S/Pt = 0.7$, $E/C = 0.4$, et à un dosage en $SP = 1\%$, il est possible de fabriquer un BAN de bonnes propriétés rhéologiques et mécaniques, avec un volume de gravier type 7/15 de 275 l.
- L'accroissement du rapport S/Pt diminue l'étalement, la déformabilité, et la résistance, mais augmente au contraire la stabilité.
- Pour un rapport fixe de S/Pt , l'accroissement du rapport E/C augmente l'étalement, le taux de remplissage, et diminue la stabilité et la résistance.
- L'augmentation du dosage en superplastifiant augmente la fluidité, la déformabilité, et la résistance, mais affecte la stabilité.
- Il est possible de fabriquer des BAN sans agents colloïdaux.
- Pour une formulation de BAN, avec un rapport $S/Pt = 0.7$, $E/C = 0.4$, $SP = 1\%$, et $V_G = 275$ l, il semble que l'utilisation d'un AC à une dose de 0.015% de ciment, forme un seuil au delà duquel notre béton perd ses caractères d'auto nivellement.
- La substitution d'une quantité de ciment par 30% de FC améliore la maniabilité, mais diminue la résistance à la compression.
- L'utilisation de 40% de laitier et 10% de la fumée de silice, nécessite un surplus de dosage en super plastifiant de 1.2 et 1.4% respectivement pour assurer un étalement et une déformabilité acceptables.
- L'utilisation de 40% de laitier diminue la résistance à la compression à 28j à un niveau plus bas, mais à l'âge de 90j, elle récupère cette diminution (caractère pouzzolanique).
- L'incorporation de 10% de fumée de silice et 1.4% de super plastifiant offrent des bétons de hautes résistances (≥ 58 MPa) pour le BAN.
- Les fibres polypropylènes assurent un comportement ductile aux BAN.
- Les fibres polypropylènes ont tendance à diminuer le diamètre d'étalement, et d'améliorer la stabilité des BAN.
- Les fibres polypropylènes n'ont aucun indice sur l'amélioration ou la diminution des comportements mécaniques des BAN.
- Avec un dosage de 25% de la masse d'eau, la résine n'assure pas la formulation d'un BAN, vu que les critères de la déformabilité et la stabilité ne sont pas remplis.

- L'utilisation d'un AC semble corriger la stabilité, mais la déformabilité reste loin de la valeur exigée par l'AFGC (soit ≥ 0.8).
- A une cure humide la résine a tendance de diminuer la résistance à la compression du BAN.
- Le module élastique des BAN est systématiquement plus faible que celui du béton ordinaire.
- Le retrait total des BAN est plus élevé que celui du béton ordinaire.
- Les résistances à l'adhérence trouvées à l'essai sur des éprouvettes prismatiques sont plus grandes en valeurs que celles sur des éprouvettes cylindriques.
- Les résistances à l'adhérence prennent les mêmes allures que les résistances à la traction.
- Les BAN assurent une adhérence à l'ancien béton meilleure qu'aux BO.
- L'ajout de 10% de fumée de silice à un BAN augmente la résistance à l'adhérence.
- Les fibres polypropylènes ne donnent aucune indication sur l'amélioration de la résistance à l'adhérence, mais elles ont tendance à donner un comportement ductile au béton lors de la rupture.
- La fabrication d'une interface en mortier à base de résine donne une résistance médiocre à l'adhérence.

Pour conclure avec ce sujet, on peut dire que nos résultats sont les conséquences d'études sur des bétons particuliers, utilisés pour les travaux de réparation, leur généralisation n'est pas immédiate. D'autres études sont nécessaires pour les confirmer et même de mettre l'accent sur leurs utilisations tout en suivant les recherches sur :

- Développement des BAN renforcés par des fibres métalliques et l'utilisation pour les travaux de réparation.
- Développement des BAN renforcés par un fibrage mixte (fibres polypropylènes et métalliques) pour les travaux de réparation.
- Etude de la durabilité des BAN dans un milieu agressif.
- Trouver des solutions pour la formulation des BAN avec résine.
- Développer des études pour détecter et quantifier la fissuration des BAN, destinés à la réparation.
- Appliquer des réparations avec les BAN à une échelle réelle.

