

UNIVERSITE MOHAMED KHIDER- BISKRA



FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N° d'ordre.....

Série.....

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux de Construction

Présenté par :

BENADDI EL hachemi

-Thème -

***Formulation et Caractérisation des Bétons Autonivelants pour les
Travaux de Réparation***

Soutenu le : 26/11/2008

Devant le jury :

Président :	D_r: B. MEZGHICHE.	M.C Université de Biskra.
Rapporteur :	D_r: A. GUETTALA.	M.C Université de Biskra.
Examineurs :	P_r: M. MELLAS.	M.C Université de Biskra.
	D_r: A.ZATAR.	M.C Université de Biskra.

Introduction générale

Suite au développement que connaît la plupart des pays dans le monde entier, les dernières décennies du vingtième siècle, ainsi que cette décennie ont été marquées par la construction ou la mise en place d'un vaste réseau d'infrastructures en béton. Et à cause de leurs expositions pendant plusieurs années aux intempéries, les ouvrages en béton montrent des signes de vieillissement et de détérioration plus importants, ce qui nécessite donc leur réparation et réhabilitation.

En général, la réparation peut, en outre de redonner à la structure ses qualités initiales, de prolonger sa durée de vie tout en garantissant sa durabilité.

Cependant la durabilité de la réparation en béton, peut s'exprimer par deux indicateurs plus importants : une fissuration minimisée ou évitée, et une bonne adhérence entre le matériau de réparation et le matériau de support.

Ces deux indicateurs nous conduisent vers la notion de la compatibilité au sens large, qui se définit comme l'équilibre entre les propriétés physiques, chimiques, et électrochimiques du matériau de réparation et du vieux béton existant.

A cet effet la fabrication d'une réparation durable et efficace repose sur une sélection des matériaux et sur leur utilisation selon les normes et les règles de l'art, afin d'obtenir une bonne compatibilité déformationnelle.

Selon [O.Laurence](#), l'obtention de cette compatibilité peut se faire de différentes façons :

- 1- l'utilisation d'un matériau dont le retrait est faible (utilisation d'un adjuvant réducteur de retrait).
- 2- Amélioration du comportement mécanique du matériau de réparation, cela peut se faire en utilisant des matériaux de forte résistance en traction, qui sont souvent des matériaux riches en ciment, et avec un rapport E/C faible, et dont le retrait endogène va être donc élevé.
- 3- L'utilisation d'un matériau dont le potentiel de fluage est important comparativement au retrait qu'il développe au cours du temps.

Ces deux dernières façons, nous ont encouragés de choisir pour notre étude le béton autonivelant (BAN) comme matériau de réparation, vu qu'il est très riche en matière cimentaire et en fines, ainsi qu'à sa grande fluidité à l'état frais qui lui permet de remplir plusieurs formes d'interstices et de faire des réparations adéquates de surfaces de béton.

Comme ce béton se caractérise à l'état durci par un potentiel important de fluage, ce qui entraîne le développement d'une bonne compatibilité avec le matériau support.

Pour ces raisons, le présent mémoire a pour objectif de formuler et de caractériser des BAN, afin de les destiner aux travaux de réparation, tout en présentant l'effet des additions minérales, les fibres polypropylènes, ainsi que la résine sur leur maniabilité et leur résistance.

A cet effet notre mémoire se subdivise en deux grandes parties :

- 1- Une partie bibliographique approfondie et critique sur des récentes recherches comprenant aussi deux chapitres :
 - a- Le premier chapitre représente un aperçu détaillé sur la réparation des ouvrages dégradés en béton, où l'on a essayé de faire un balayage sur le contexte de réparation, les causes et les origines de dégradation, ainsi que les facteurs affectant la durabilité des bétons. Puis on a exposé la réparation, sa stratégie et ses problèmes, telles que la fissuration et la perte d'adhésion avec le substrat avant d'aborder 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 pour les problèmes de réparation.
 - b- Le deuxième chapitre présente le concept, les caractérisations des BAN à l'état frais et à l'état durci, ainsi que leurs principaux constituants, les additions, les fibres polypropylènes et la résine, en plus de leurs effets sur les propriétés rhéologiques et mécaniques pour conclure avec des exemples de formulation des BAN.
- 2- La seconde partie est consacrée à l'étude expérimentale, qui se compose de :
 - a- Troisième chapitre, formé des normes, des mélanges et des procédures à suivre au cours de l'étude.
 - b- Le dernier chapitre forme le squelette principal de notre recherche. Il est composé de deux volées, en premier lieu on a essayé de formuler et de caractériser des BAN suivant une étude bibliographique approfondie avec l'utilisation des additions minérales, des fibres polypropylènes, tout en présentant leurs effets sur la maniabilité et la résistance. Ensuite, on a appliqué ces BAN dans les travaux de réparation afin d'envisager

la résistance à l'adhérence qui se développe entre l'ancien et le nouveau béton. En fin, notre mémoire se termine par une conclusion générale résumant tout ce que nous avons réalisé et les résultats obtenus en explorant l'horizon par des perspectives que nous avons jugées utiles dans le domaine de recherche.

CHAPITRE 1

APERÇU SUR LA RÉPARATION

DES OUVRAGES DEGRADÉS EN BETON

1.1 Introduction

Aujourd'hui, la plus part des infrastructures en génie civil sont en béton armé, dont la majorité et surtout les ouvrages routiers ont atteint un seuil de dégradation important et même parfois la fin de leur vie utile. Il est donc temps de les réhabiliter ou de les remplacer.

Le remplacement de ces ouvrages pose en plus du problème de financement, le problème de mise en service et les délais précieux lors de leur remplacement.

De même il y a plusieurs structures dégradées qui ne doivent pas obligatoirement être démolies. Alors il est nécessaire de chercher d'autres méthodes telle que la réparation pour prolonger leur vie utile.

Sur le marché mondial des matériaux, de nouveaux matériaux de construction sont apparus mieux adaptés aux nouvelles techniques de réparation. Toutefois, le succès de la mise en application de ces nouvelles techniques repose grandement sur leur adaptation au type de l'intervention et aux conditions du chantier. Il est donc primordial que leur choix et leur mise en oeuvre se fassent en étroite collaboration avec les différents intervenants afin d'assurer leur succès [15].

Les réparations les plus courantes d'ouvrages en béton de ciment sont soit avec du béton projeté par procédé à sec ou humide, soit au moyen d'un coffrage avec ou sans surépaisseur de béton, soit plus récemment, avec du béton auto nivelant [26]. Cette technique innovante fait actuellement l'objet de toutes les intentions. Ce matériau est à ce point fluide et se prête aux formes les plus complexes sans qu'on le vibre [44].

Cependant, plusieurs contraintes rendent difficile l'opération de réparation, c'est pourquoi lorsque on conçoit une réparation, le principal objectif outre celui de redonner à la structure ses qualités initiales, est de garantir la durabilité de l'intervention [35]. A cet effet l'utilisation des bétons autonivelants dans la réparation des infrastructures présente des avantages bien distingués de point

du fait qu'ils possèdent une grande fluidité lui permettant de remplir tous les coins et les recoins et rendant la structure à son état initial.

1.2 Problématique et objectifs du mémoire

Les dernières décennies ont été marquées par une intense activité de construction ou de mise en place d'un vaste réseau d'infrastructures en béton de toute sorte. Ces infrastructures et surtout les ouvrages routiers, actuellement ont atteint un seuil de dégradation importants et parfois la fin de leur vie utile. Il est donc temps de les réhabiliter ou de les remplacer. Néanmoins, le remplacement ou bien la reconstruction complète d'une structure pose un problème aussi bien financier que technique. De même il y a plusieurs structures dégradées qui ne doivent pas obligatoirement être démolies. Donc il est nécessaire de chercher d'autres méthodes telle que la réparation pour prolonger leur durée de vie.

En ingénierie de la réparation des ouvrages, des progrès importants ont été accomplis ces dernières années quoi qu'il en soit, on se trouve encore aux prises avec trop de cas de réparations qui présentent des problèmes de durabilité nécessitant à court terme de nouvelles interventions [37] et parfois il faut réparer la réparation [38].

La réparation d'un élément en béton qui fait généralement intervenir deux matériaux très différents, où la mise en place d'un béton jeune sur un support de béton plus ancien provoque différents types de problèmes, tant physico-chimique, que mécaniques, liés à la compatibilité au sens large des deux matériaux en contact [35].

L'obtention d'une compatibilité mécanique conduit vers une réparation durable, qui nécessite le développement de nouvelles techniques de réparation comme le béton projeté, ou bien plus récemment le BAN.

De plus, certaines structures actuelles se caractérisent par la complexité de leurs géométries telles les formes variables, les courbures multiples ainsi que leur forte concentration en armatures. Par conséquent, l'application des bétons usuels à ces types d'ouvrages entraîne des défaillances structurales. A cet effet, les bétons autonivelants permettent la construction de membrure aux formes complexes et fortement armées sans voir à modifier les coffrages pour permettre l'introduction d'aiguilles vibrantes [51].

Et pour améliorer le comportement mécanique du matériau de réparation, en couplant la maniabilité qui caractérise les bétons autonivelants avec des fibres qui sont déjà bien connues par leur effet bénéfique en tant qu'armature secondaire minimisant l'ouverture

des fissures, et pour donner aussi une bonne capacité au matériau de réparation, tout en arrivant aux objectifs spécifiques suivants de notre étude :

- A- procéder à une étude bibliographique approfondie et critique des récentes recherches sur la formulation des bétons autonivelants et les essais de caractérisation des propriétés rhéologiques et mécaniques ;
- B- Evaluer les performances mécaniques obtenues (compression, traction, module élastique et retrait) ;
- C -Etudier l'effet des ajouts minéraux, l'ajout des fibres, et de la résine sur la maniabilité, la résistance et l'adhérence entre ancien et nouveau béton ;
- D -Recommandations sur les bétons auto nivelants destinés à la réparation.

1.3 L'état des structures et le contexte de réparation

En Algérie comme dans le monde entier ,les dernières décennies ont été marquées par la construction ou la mise en place d'un vaste réseau d'infrastructures en béton de toute sorte, comme les barrages, les ports, les ponts, les structures portuaires, les digues et les quais, etc. Les ouvrages ont été exposés pendant plusieurs années aux intempéries, c'est pourquoi actuellement ils montrent des signes de vieillissement et de détérioration bien que l'on ait très longtemps cru que les ouvrages réalisés en béton étaient indestructibles.[18]

Une fissure constitue le premier signe d'une première manifestation visuelle de dégradation qui se développe avec le temps, et la situation s'aggrave de plus en plus jusqu'à la ruine totale de l'ouvrage. Pour éviter une telle catastrophe on doit faire un diagnostic afin d'aboutir à des solutions pour une réparation réussite.

Il existe de nombreux mécanismes de détérioration du béton ainsi qu'une variété de facteurs contributifs. Puisqu'il existe également de nombreuses solutions de rechange pour chacune des catégories de détérioration, un choix judicieux tient aussi bien de critères financiers que de critères techniques. Les causes des problèmes techniques observés et les moyens utilisés pour réparer le béton ont fait l'objet de recherches considérables au cours des 30 dernières années. Les progrès accomplis dans l'élaboration de matériaux et dans les techniques de démolition, de réparation et de protection ont devancé considérablement l'estimation des coûts globaux et l'analyse des coûts-avantages relatifs à une même réparation [20].

Au Canada par exemple 16 milliards de dollars ,soit 60% des coûts totaux de la construction, sont dépensés chaque année pour la réparation et la restauration des structures de bâtiments. Au Québec le ministère des Transports consacre plus de la moitié

de son budget à l'entretien des structures en béton dont la détérioration est causée par la corrosion des armatures d'acier [18].

En France, en Amérique, en Angleterre et dans la plupart des pays développés, les gouvernements ne cessent plus de dépenser des milliards de dollars pour la restauration et la réhabilitation de leurs infrastructures (Tab 1.1).

TAB. 1.1 - Chiffres d'affaires de la construction dans quelques pays. [38]

Secteur	Etat	France (2001) (Milliard €)	Angleterre (1998) (Milliard £)	Canada(2000) (Milliard \$)	USA (1997) (Milliard \$)
Bâtiment	Neuf	47.3	/	/	551
	Entretien	44	/	/	294
Travaux publics	Neuf	17	/	/	103
	Entretien	9.5	/	/	67
Secteurs confondus	Entretien	/	14.9	16	/

1.4 Causes de dégradation du béton

Tout d'abord, il est préférable de rappeler que la dégradation du béton peut se définir comme la perte de sa performance qui se manifeste par la détérioration, la déformation ou le changement de ces propriétés suivant plusieurs causes qui peuvent être physiques ; chimiques ; ou bien mécaniques.

1.4.1 Principales causes physiques de dégradation

D'un point de vue physique, les principales causes de la dégradation du béton sont [23] :

A- Le retrait : Le retrait est un phénomène qui existe de façon systématique au sein d'un béton et se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusqu'à son vieillissement (retrait plastique, et retrait de séchage). Ceci engendre des fissurations superficielles de formes et directions quelconques et peuvent être avec le temps des causes principales de la dégradation [53].

B- Le tassement : On trouve aussi le tassement localisé des surfaces de coulage causé par la présence d'armature dans le béton engendrant ainsi des vides ou des fissures au

voisinage de ces armatures. Une augmentation du diamètre ou un mauvais compactage favorisera l'apparition des fissures [53].

C- Les contraintes thermiques : Les variations de température à l'intérieur du béton durci causées par la chaleur d'hydratation de ciment, ou bien la variation de la température atmosphérique (par exemple le phénomène gel - dégel) entraînent des changements de forme et de volume, [53] ce qui provoque des dégradations dans le béton.

1.4.2 Principales causes chimiques de dégradation

Pour le béton, l'environnement externe (l'eau de pluie ou de ruissellement, le CO_2 de l'air) apparaît comme un milieu extrêmement corrosif. C'est un peu comme si nous devions vivre dans un environnement constitué d'acide sulfurique ! Malgré tout, il résiste à la plupart des attaques chimiques lorsqu'il est fabriqué et mis en place selon les règles de l'art.

Les principaux processus chimiques des dégradations du béton sont généralement regroupés en trois catégories [18] :

A- L'hydrolyse ou la lixiviation (dissolution) des hydrates : Lorsque les eaux de ruissellement ou l'humidité du milieu externe entrent en contact avec la pâte de ciment, elles tendent à lixivier (dissoudre) certains produits à base de calcium (surtout la chaux formée par l'hydratation du ciment). Ce processus peut diminuer les propriétés mécaniques des hydrates ou augmenter la porosité interne.

B- Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif : Certaines solutions acides souvent rencontrées en milieu industriel, peuvent interagir avec la pâte de ciment pour former des sels solubles qui peuvent ensuite être facilement lixiviés.

Des eaux agressives peuvent réagir avec la pâte de ciment pour former de nouveaux produits insolubles mais qui ne participent pas au développement des propriétés mécaniques du béton.

C- La formation de produits expansifs : Plusieurs types de produits expansifs peuvent se former dans la pâte de ciment durcie. Le processus de formation est fonction des matériaux utilisés et/ou du type d'exposition. Ces produits expansifs peuvent créer de très grandes pressions internes qui peuvent provoquer une intense fissuration du béton.

Les principales causes de la formation de ces produits expansifs sont :

- l'attaque par les sulfates que l'on retrouve parfois dans les eaux souterraines. Ces réactions produisent un gel expansif.
- les réactions alcalis granulats qui produisent aussi un gel de silice fortement expansif, provoquant le gonflement de la structure.
- la corrosion des aciers qui produits différents oxydes de fer très fortement expansifs au voisinage des barres corrodées, provoquant les décollements du recouvrement de béton.
- la formation de glace qui engendre des pressions internes dans les pores capillaires du béton.

1.4.3 Principales causes mécaniques de dégradation [16]

A- Les chocs : Les chocs les plus fréquents sont ceux du poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, les chocs des bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière, ainsi que les chocs de véhicules contre les barrières de retenue, ils peuvent créer des épaufrures, des éclats importants de béton, voir même des ruptures d'acier.

B- Abrasion, érosion : Les phénomènes d'abrasion et d'érosion se rencontrent essentiellement dans des structures de génie civil en contact avec des circulations intenses d'eau comme les barrages (Érosion des évacuateurs de crue) ou les galeries d'amenée d'eau, et dans les structures soumises à des charges mécaniques répétées comme les chaussés en béton.

C- Délamination : L'action conjuguée des sollicitations climatiques des sels anti-verglas et du trafic circulant directement sur le béton constitutif des hourdis de ponts provoque des délaminations du béton pour un nombre considérable d'ouvrage d'art dans certains pays comme les Etats Unis et le Canada. Mais en France la cause principale du délaminations du béton est l'action conjuguée de la dissolution de la chaux formée du béton, du gel éventuel de ce béton gorgé d'eau et le passage répété des roues de poids lourds qui provoquent un feuilletage local, terminer par la formation des trous dans le hourdis.

1.5 Les facteurs affectant la durabilité des ouvrages en béton

Plus loin des causes de dégradation du béton, il est nécessaire de parler de la durabilité et les facteurs qui l'affectent.

1.5.1 Notions de la durabilité [18]

La durabilité des ouvrages en béton est une nouvelle exigence des maîtres d'ouvrages de 21^{ème} siècle. Les performances du béton armé et son coût économique, ont fait de lui le matériau de construction le plus utilisé à notre époque. Bien que l'on ait très longtemps cru que les ouvrages réalisés en béton étaient indestructibles, l'influence des détériorations sur les structures en béton a mis en évidence les problèmes de vieillissement et engendré des inquiétudes de plus en plus vives parmi les clients auxquels sont destinés ces ouvrages.

Il existe un très grand nombre de structures en béton âgées de 40 à 90 ans qui sont encore en excellent état, alors qu'il existe aussi d'autres cas où une mauvaise durabilité a engendré la ruine totale ou partielle des ouvrages. [18]

Le choix des formules de béton et la conception des ouvrages doivent désormais prendre en compte la durée de vie escomptée pour l'ouvrage, qui peut être très variable suivant le type de structure à construire, l'environnement considéré et naturellement le type de sollicitations que devra subir l'ouvrage. Cependant, la durabilité des structures en béton armé ou précontraint est difficile à quantifier et donc à prévoir [3].

D'après Jacques Barron, la durabilité diffère selon l'ingénieur et le maître de l'ouvrage. Ce dernier n'accepte que la durabilité objectif : c'est à dire que l'ouvrage doit avoir une durée de vie indéterminée, alors que l'ingénieur vise ce qu'on appelle la durabilité performance, comme un objectif de qualité qui s'analyse en performance spécifique mesurables du comportement du béton [4].

P.C.Kregier définit la durabilité des matériaux en général comme la perte de performance en fonction du temps. D'autres définissent la durabilité du béton comme la capacité du matériau à conserver un comportement et une performance suffisamment satisfaisante dans les limites de la sécurité, lorsqu'il est soumis aux conditions réelles de service et pendant une durée prévue [34].

M.Sonebi voit que le terme de la durabilité se réfère à la capacité du matériau de résister aux conditions d'utilisation sans subir de dommages significatifs durant la vie (de service) de l'ouvrage. La détérioration du béton est souvent initialisée par un processus chimique, malgré les facteurs physiques et mécaniques qui peuvent causer des détériorations propres combinées ou non à un milieu chimiquement agressif [51].

1.5.2 Facteurs affectant la durabilité du béton

Une étude publiée dans la revue « ANNALES DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS » en septembre 2000 par [Bernard. Fargeot](#) sur les facteurs d'influence sur le vieillissement des ouvrages d'art met en évidence la prépondérance de trois facteurs principaux qui sont [14]:

- le facteur mise en œuvre ;
- le facteur défauts ou erreurs de conception ;
- le facteur défaut d'entretien.

[M.Sonebi \[51\]](#) regroupe les facteurs qui sont l'origine de dégradations en trois grandes familles :

- les facteurs climatiques et environnementaux; le type d'exposition face aux agents potentiellement agressifs;
- les facteurs liés à la conception et à la mise en œuvre de l'ouvrage;
- les facteurs liés aux caractéristiques des matériaux et du béton.

[Mehta et Gerwick \(1982\)](#), rapporté par [M.Sonebi](#), regroupent les principales causes physique de détériorations du béton en deux grandes catégories:

- dégradation de surface;
- fissuration interne.

On peut généralement regrouper les facteurs affectant la durabilité en quatre grandes familles [18] :

- les facteurs liés à la conception de l'ouvrage;
- les facteurs liés à la mise en œuvre de l'ouvrage;
- les facteurs liés aux caractéristiques des matériaux et du béton;
- les facteurs liés à l'entretien de la structure.

A- Facteurs liés à la conception de l'ouvrage

De nombreux critères de conception peuvent exercer une grande influence sur la durabilité de béton. Ainsi une structure mal conçue peut avoir une durabilité déficiente malgré l'utilisation d'un béton de bonne qualité.

Parmi les principaux critères de conception qui contrôlent la durabilité d'une structure, on cite:

- Les aspect reliées au système de drainage et d'évacuation des eaux ;

- Le calcul des armatures et le choix de leur épaisseur de recouvrement;
- Les choix des enduits protecteurs ou des imperméabilisants ;
- Le choix d'une géométrie particulière de la structure qui permet de diminuer le stress environnemental.

B- Facteurs reliés à la mise en oeuvre de l'ouvrage

Le béton est un des rares matériaux de construction où les composants sont rassemblés au site, ou près du site de construction, pour ensuite être dosés, malaxés et mis en place dans les coffrages pour obtenir un produit fini. Il existe un très grand nombre de variables qui contrôlent ce type de production. Les principaux défauts d'exécution rencontrés sont :

- 1) mauvaise exécution des coffrages ;
- 2) mauvaise disposition des armatures ;
- 3) mauvaise formulation du béton ;
- 4) mauvaise condition de transport du béton frais ;
- 5) mauvaise mise en oeuvre du béton ;
- 6) mauvaise technique de mûrissement du béton ;
- 7) mauvaise étanchéité.

C- Facteurs reliés aux caractéristiques des matériaux et du béton

Pour fabriquer un ouvrage durable, il faut donc utiliser un matériau durable, car les propriétés de ce dernier ont une influence directe sur la durabilité de l'ouvrage.

A cet effet, le choix du type de ciment en fonction des types d'ouvrages; ou en fonction du type de mise en oeuvre; ou bien en fonction de l'environnement; l'eau de gâchage, tant du point de vue de la quantité que de celui de la qualité, le rapport E/C, le choix des granulats et leurs qualités, le choix des ajouts minéraux et leurs quantités; le choix de tous ces paramètres utilisés dans la confection du béton est plus que nécessaire pour assurer sa qualité et sa durabilité.

D- Facteurs reliés à l'entretien de la structure

Des programmes d'entretien ou de protection sont généralement nécessaires pour éviter ou retarder certains types de dégradations des structures, ou au moins contribuer à prolonger très significativement leur vie utile. Parmi les méthodes d'entretien on peut citer :

- 1) Nettoyage régulier des joints de dilatation ;
- 2) Remplacement des membranes d'étanchéité ;
- 3) Nettoyage des conduits de drainage ;
- 4) Nettoyage des joints de dilatation.



Phot. 1.1- Mise à nu d'armature en sous face d'un pont à poutres. [8]

1.6 Réparation des ouvrages dégradés en béton

La réparation des ouvrages dégradés en béton est une opération qui fait intervenir deux matériaux, dont les propriétés physiques, chimiques et mécaniques sont différentes. Il s'agit d'une part, d'un matériau de base (substrat) dont l'hydratation est terminée et dont les propriétés mécaniques, notamment le module élastique, sont élevées. D'autre part, il y a le matériau de réparation, matériau encore jeune, qui va subir d'importants changements volumétriques au cours de ses premières années d'exposition à l'air libre.

D'après [O.Laurence \[35\]](#), deux types de réparation peuvent exister :

- une réparation superficielle (mince) qui fait référence à des réparations d'épaisseur inférieure à 100 mm, pour laquelle les aciers de renforcement n'ont pas été dégagés.
- Une réparation structurale dont l'épaisseur dépasse 100 mm et, qui sera alors dictée par les lois de la résistance des matériaux et de la mécanique, dont l'objectif est de restituer la capacité portante initiale de l'élément considéré.

1.6.1 Stratégie de la réparation

Il est parfois difficile de déterminer avec exactitude la cause des dégradations et a fortiori, les causes des dégradations des réparations. Une étude a été réalisée dans le cadre de REHABCON (Tilly, 2004) a montré que plus de 75% des dégâts étaient causés par une conception incorrecte (32%), un mauvais diagnostic (12%), une mauvaise mise en œuvre (16%) et le choix inadéquat du matériau de réparation (32%) [9].

A cet effet, et pour avoir une réparation durable, L.Molez [38] voit qu'il doit faire apparaître (03) trois étapes principales indissociables, pour une telle stratégie de réparation :

A- Analyses des causes de la détérioration

L'identification des causes des dégradations est une des étapes les plus importantes et les plus difficiles de tout le processus de réparation des structures endommagées, car il n'est généralement pas possible d'évaluer la nécessité de réparer une structure ou de choisir la ou les méthodes de réparation sans avoir, au préalable, bien identifié l'origine des dégradations.

B- Préparation de la zone à réparer

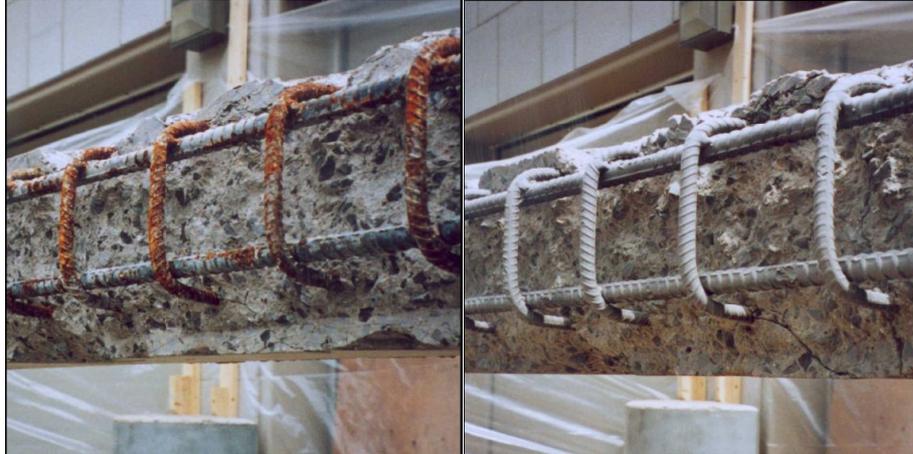
Cette phase exige une suppression du béton endommagé avec un soin particulier aux bords de la réparation, qui peut se faire avec plusieurs techniques.

Trois techniques sont le plus couramment employées [35], il s'agit du marteau pneumatique ; de l'hydro démolition et du sablage, ces techniques génèrent à la surface du support une rugosité plus ou moins importante, joue un rôle prépondérant pour l'assurance d'une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise.

Après l'enlèvement du béton détérioré, un nettoyage de la surface est nécessaire pour enlever les débris et permettre d'obtenir une surface propre et prête pour l'application d'une réparation. Cependant, il est important de protéger lors de la préparation des surfaces, les aciers d'armatures apparents ou de les remplacer si besoin.

C- Mise en place du béton de la réparation

C'est la phase finale de la stratégie de la réparation. Après avoir identifié les causes de dégradations, les méthodes et les matériaux de réparation, et après le nettoyage et l'humidification de la surface à réparer, le béton de réparation, alors sera mis en place selon les techniques exigées généralement par un cahier de charge afin d'obtenir une réparation de qualité.



Phot. 1.2 - Surface dégagée avant (à gauche) et après le jet de sable (à droite). [38]

1.6.2 Problèmes de la réparation

Lorsqu'un matériau de réparation est mis en place sur un support d'ancien béton (vieux béton), il se pose le problème de leur compatibilité. Cette compatibilité se définit comme un équilibre entre les propriétés physiques, chimiques et électrochimiques du matériau de réparation et du vieux béton existant.

Dans la littérature, plusieurs études nous ont conduit vers la constatation que l'incompatibilité déformationnelle peut se traduire par deux problèmes au niveau de la réparation, il s'agit de la fissuration du nouveau béton et, de la perte de l'adhésion avec le substrat.

1.6.2.1 Fissuration de la réparation

La fissuration à plus ou moins court terme des réparations effectuées sur les ouvrages en béton de ciment est malheureusement trop souvent présente et difficile à prédire. Les problèmes sont en bonne partie attribuable au fait que le retrait du matériau de réparation, phénomène inévitable, est empêché par le substrat [37].

Le séchage et le retrait qui en découle génèrent de façon inévitable la fissuration des réparations, au moins en surface. De plus la densité de fissuration est directement liée au retrait développé par le matériau. Un retrait important conduit en effet à une densité de fissuration plus importante [35].

Dans cette section essayons d'établir la corrélation entre le retrait et la fissuration.

A- Les différents types de retrait

Dès sa fabrication, et durant toute sa vie, le béton peut subir cinq formes de retrait. A la phase plastique, période s'écoulant entre la fabrication et le début de prise, pendant laquelle le béton ne présente pas de cohésion, il connaît sa première contraction volumique, c'est le retrait plastique, qui est défini de manière classique, comme la contraction du béton en phase plastique consécutive au séchage. Il se développe lorsque la quantité d'eau évaporée à la surface est supérieure à la quantité d'eau de ressuage [54].

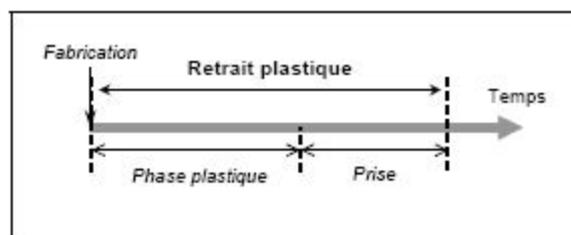


Fig. 1.1 - Définition du retrait plastique. [54]

Après la prise, le béton, qui est devenu un solide poreux, va encore subir quatre formes de retrait [2] :

Le retrait thermique : les réactions d'hydratation libèrent en fin de prise une certaine quantité de chaleur. Un élément en béton subit alors un échauffement, fonction des conditions d'échange avec le milieu extérieur. En découle une dilatation, suivie d'une contraction, qualifiée de retrait thermique, lorsque sa température diminue jusqu'à la température ambiante.

Le retrait endogène : l'hydratation du ciment s'accompagne d'une diminution de volume. Après la prise, l'hydratation se poursuit. Le retrait endogène est la conséquence macroscopique de la contraction d'origine chimique.

Le retrait de séchage : c'est la déformation volumique créée par le séchage à la surface du béton. Le moteur de la dessiccation est un déséquilibre hydrique : après la prise, l'humidité relative est plus élevée au sein du béton que dans l'air ambiant.

Le retrait de carbonatation : À la surface d'un béton, la pâte de ciment peut réagir avec l'eau et le gaz carbonique de l'air ambiant. Cette réaction, (la carbonatation) s'accompagne

d'une contraction volumique. La peau du béton peut en conséquence se fissurer : on parle de faïençage.

B- Corrélation retrait- fissuration

O.Laurence voit que La fissuration est souvent la conséquence du retrait évoqué en premier lieu [35]. Il ajoute aussi que l'ouverture des fissures induites par le séchage varie essentiellement suivant l'intensité du retrait et la géométrie de la structure. Les ouvertures peuvent atteindre plusieurs millimètres dans le cas des pièces massives. Tant qu'elles sont peu profondes, leur espacement est petit car leur zone d'influence, directement reliée en élasticité à leur profondeur, est faible [35].

Ainsi, L.Molez [38] a conçu six matériaux de réparation, adaptés à la géométrie et aux propriétés des éléments à réparer, réparties comme suit :

- Deux (02) bétons ordinaires, mis en place par gravité et vibration, le premier (BO) est un béton classique de bonne qualité, le second (BOarr) est quasiment similaire au premier, mais un agent réducteur de retrait a été utilisé.
- Deux (02) bétons autoplaçants, le premier (BAP) est un béton autoplaçant, dont les adjuvants utilisés sont en poudre, le second (BAPftc) est un béton autoplaçant à faible teneur en ciment (une partie de ciment est remplacée par des cendres volantes).
- Deux (02) types de béton projeté ont été utilisés, l'un projeté par voie sèche (BPs), l'autre projeté par voie humide (BPh).

La composition de ces six bétons est illustrée dans le tableau 1.2

TAB. 1.2 - Caractéristiques des compositions. [38]

Matériaux	Unité	BO	BOarr	BPh	BPs	BAP	BAPftc
Ciment T10	Kg/m ³	400	400		400	412	235
Ciment T10SF	Kg/m ³			475			
Fumée de silice	Kg/m ³				40	37	20
Cendres volantes	Kg/m ³						214
Gravillons 10-2.5	Kg/m ³	957	957	495	210	769	766
Sable 5-0	Kg/m ³	767	767	850	1450	677	672
Fibres	Kg/m ³			18	1		
Eau	Kg/m ³	162	158	190	176	180	188
Agent. E.A	ml/m ³	80	80	119	qsp	qsp	qsp
Superplastifiant	ml/m ³	1800	1200	1675		qsp	qsp
Agents colloïdaux	ml/m ³					qsp	qsp
Agent .R.R	ml/m ³		800				
Teneur en air	%	8	8	14		12	8
Affaissement/Etal	mm	110	130	200		650	680
E/C		0.41	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
S/G		0.44	0.44	0.62	0.87	0.46	0.46
Teneur en pâte	%	29	29	34	32	33	37
qsp : adjuvant en poudre. Quantité suffisante pour atteindre les propriétés souhaitées							

Les courbes de retrait total, de différents mélanges, mesuré sur des prismes scellés de dimension 100 mm x 100 mm x 300 mm, et conservé dans une salle à température et humidité contrôlées ($Hr=50\% \pm 5\%$ et $Te=20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$), sont représentées à la fig.1.2 où nous pouvons constater que les amplitudes de retrait total vont de 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les BO à 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les BAP, de même les cinétiques diffèrent de façon significative. Par exemple, nous pouvons voir que le taux de retrait des BAP est plus important au jeune âge que le BO. Par contre il semble se stabiliser plus rapidement.

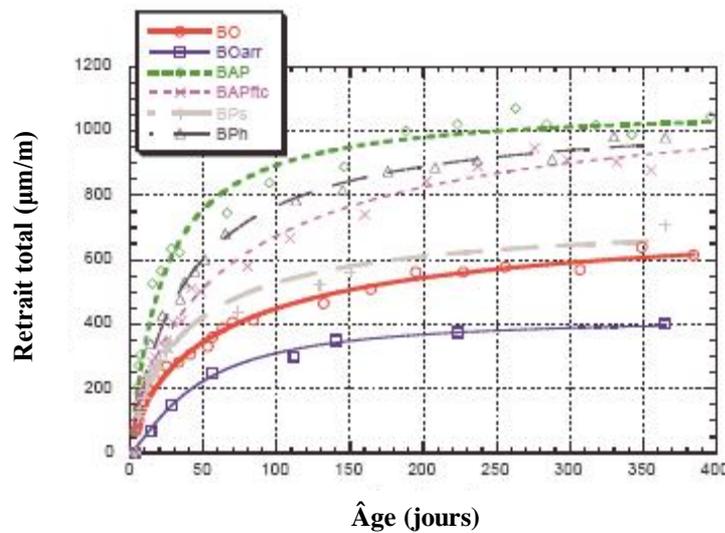


Fig. 1.2 - Retrait total de différents mélanges. [38]

Pour identifier la corrélation entre le retrait et la fissuration L.Molez [38] a effectué des essais sur des structures réparées. Les corps d'épreuves sont des poutres en béton armé de 4.1m de longueur et de section de 0.280x0.210. La fig.1.3 présente la coupe type des poutres. la zone foncée correspond à la zone réparée.

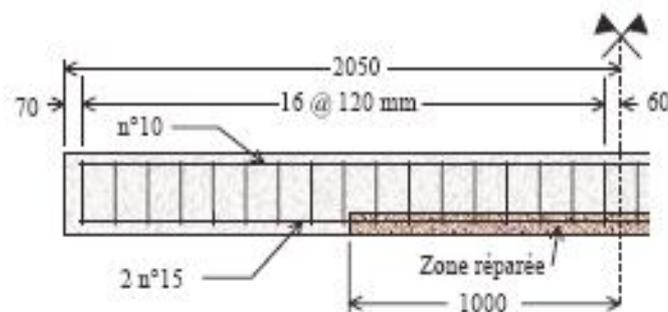


Fig. 1.3- Coupe type et armatures des poutres. [38]

Les poutres ont été exposées au séchage et conservées deux ans à l'extérieur, après une cure humide effectuée durant les sept premiers jours. Pour la préparation de la zone à réparer, les armatures ont été dégagées au marteau pneumatique.

Pour suivre l'évolution de la fissuration, douze poutres ont été réparées (deux poutres par mélange) et testées dans les conditions de séchage non couplé à un chargement mécanique.

Le faciès de fissuration de chaque poutre est observé pendant trois à six mois, où il a utilisé une lunette optique de grossissement 20X munie d'un vernier permettant de détecter les fissures de l'ordre de $5\mu\text{m}$ et de mesurer facilement les ouvertures des fissures supérieures à $25\mu\text{m}$. la figure 1.4, donne l'évolution de l'ouverture moyenne de fissure pour toutes les réparations en fonction du temps de séchage.

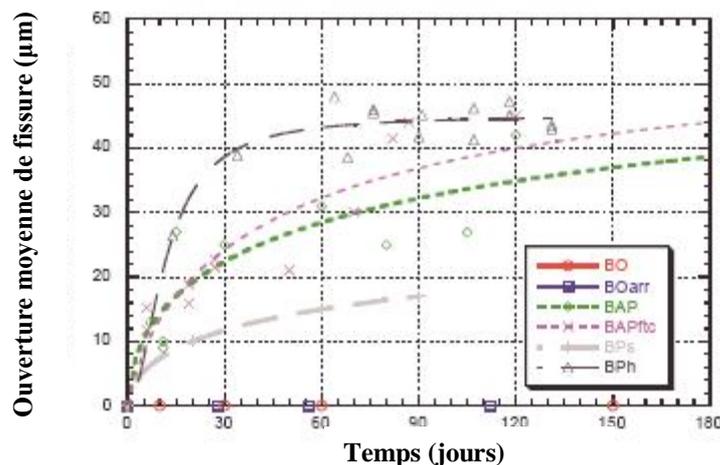


Fig. 1.4 - Evolution de l'ouverture moyenne de la fissure. [38]

Les courbes de cette figure, représentent les tendances générales suivies par chacune des compositions utilisées. Quatre tendances ressortent de ce graphique :

1. deux types de réparation (BO et BOarr) ne fissurent pas de tout ;
2. le BPs fissure très peu ;
3. les réparations effectuées avec les deux bétons auto-plaçants fissurent rapidement, mais le nombre de fissure est stable ;
4. le BPh fissure rapidement, et le nombre de fissures augmente.

Si nous pouvons relier ces quatre tendances au comportement en séchage et en retrait total des matériaux, nous constaterons les remarques suivantes :

1. les BO et BOarr font peu de retrait, mais ils n'ont pas fissuré ;
2. les BAP et BAPftc font beaucoup de retrait, mais la fissuration est importante.

La conclusion qu'on peut tirer de cette étude est que plus le retrait est faible, plus le risque de la fissuration est faible et réciproquement.

Dans le même but et, pour comprendre le lien entre le retrait et la fissuration, P.Turcry [54] a travaillé sur une gamme de douze formulations (sept BAP et cinq leurs dérivés en BO), il a constaté que le retrait plastique des BAP est systématiquement plus élevé que celui des BO, et l'amplitude passe au moins de 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les BO, à plus de 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les BAP. Ce résultat rejoint d'après lui les résultats de H.E Gram et coll. Ensuite, il a choisi quatre bétons (deux BAP et deux leurs dérivés en BO), ces bétons ont été testés à l'aide du dispositif de fissuration à l'état frais pour béton, l'essai s'est déroulé pour les trois ambiances suivantes :

- 20°C, 50%HR, sans ventilation ;
- 20°C, 50%HR, avec ventilation ;
- 40°C, 50%HR, avec ventilation.

Les résultats trouvés sont représentés dans les figures : 1.5 et 1.6 comme suit :

- aucun des bétons ne fissurent en l'absence de vent ;
- le BO40 fissure plus rapidement que le BAP40.
- La fissuration qui se forme est d'ailleurs plus large.

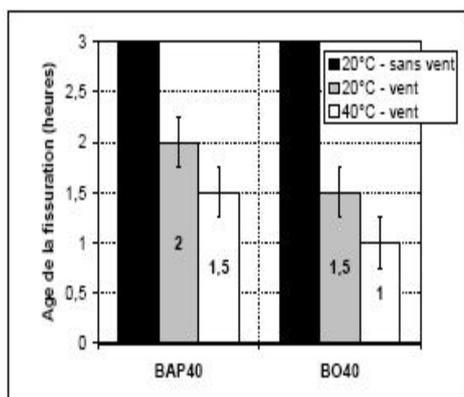


Fig. 1.5 - Age de la fissuration à l'état frais. [54]

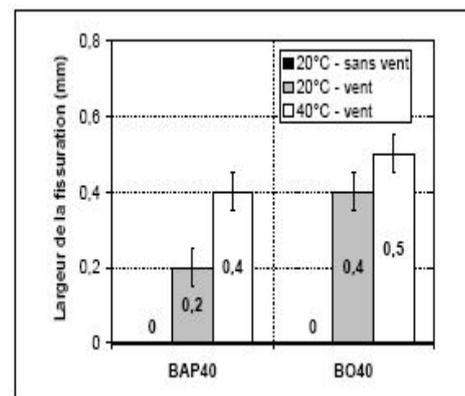


Fig.1.6 - Largeur de la fissure à 6 heures. [54]

A l'état durci, P.Turcry a testé les douze formulations de béton citées précédemment, où il a trouvé aussi que les retraits totaux des BAP sont toujours supérieurs aux retraits totaux des BO [54].

En ce qui concerne la fissuration, P.Turcry [54] a subi six formulations de béton (BAP40-BO40, BOPF5-BOF5, BAN1-BO1) au test de fissuration à l’anneau. Chaque béton a été testé sur un anneau équipé de jauges et sur un autre anneau sans jauge, ce qui lui donner une seconde mesure à l’âge de fissuration.

Les résultats de ce test sont groupés dans le tableau 1.3, où il a trouvé que les formules BAP40 et BAN1 se fissurent à la même échéance environs que les BO dérivés. Le BAPF5 se fissure en effet nettement plus tôt que le BOF5.

TAB. 1.3 - Âge de fissuration moyen mesuré sur deux anneaux. [54]

BAP40	BO40	BAPF5	BOF5	BAN1	BO1
27jours	27jours	21jours	56jours	25jours	28jours

Après ce test, P.Turcry [54] a issu à la conclusion suivante:

- le retrait total d’un BAP est proche du retrait total du BO dérivé de même résistance ;
- la fissurabilité (potentiel de la fissuration) ne se corrèle pas au retrait total à une échéance donné ;
- un BAP formulé au plus près des règles de l’art (recommandations AFGC) ne doit pas présenter de différence majeure en terme de fissurabilité avec un béton ordinaire de même résistance et formulé avec les mêmes constituants.

C- Le fluage

La relation entre la contrainte et la déformation du béton est une fonction du temps [38]. Lorsqu’un élément en béton est soumis à un chargement constant ou dont la vitesse est petite, il exhibe une déformation élastique instantanée mais également une déformation différée qui se poursuit dans le temps à taux décroissant tant aussi longtemps que le chargement est appliqué. Cette déformation supplémentaire, est appelée déformation de fluage [35].

A l’instar du retrait, il existe plusieurs formes de fluage : fluage propre et fluage de dessiccation. Leurs mécanismes sont complexes ; il n’y a, là non plus, pas de consensus général dans la littérature. C’est en tout cas la présence d’eau au sein du réseau poreux qui est au centre de toutes les explications [54].

- **le fluage propre ou endogène** : c'est lorsque le matériau ne subit pas d'échange hydrique avec l'extérieur, et le béton est en isolé de l'humidité en conditions isothermes [35] [54]. A long terme, le fluage peut être expliqué, du fait que les feuilles des hydrates (C-S-H), sous chargement, glissent progressivement les uns par rapport aux autres, alors au court terme, le chargement provoque une migration progressive de l'eau adsorbée dans ou entre les hydrates vers les pores capillaires, ce qui diminue globalement le volume du béton [5].
- **le fluage de dessiccation** : c'est le fluage qui vient s'ajouter au fluage propre lorsque le béton chargé est soumis à un séchage [54].

Le fluage est un phénomène fortement dépendant de la maturité du béton. L'amplitude des déformations différées décroît ainsi avec l'âge du chargement, et leurs mécanismes sont complexes [54], ils dépendent de plusieurs paramètres tels que : la teneur en pâte, la résistance et la contrainte appliquée, la finesse de ciment, l'humidité et la température [38].

D- Capacité d'adaptation par fluage

La bonne explication, que nous avons trouvée pour le phénomène de la capacité par adaptation, est celle d' O.Laurence [35], qu'on note intégralement :

Le retrait et le fluage des matériaux cimentaires sont deux phénomènes qui sont couplés tant sur le plan chronologique que sur le plan des mécanismes physiques mis en jeu. Le retrait de séchage additionné au retrait endogène engendre des contraintes importantes au sein de la couche de réparation, notamment en surface. Il y a alors deux possibilités. Soit le potentiel viscoélastique du matériau est suffisamment important pour permettre la relaxation des contraintes de retrait par fluage, soit la relaxation ne pourra se faire que par l'apparition de fissures. Il est fort probable que la réalité soit une combinaison de ces deux comportements.

Il ajoute : l'adaptation par fluage en situation de retrait résulte d'une compétition entre le retrait et le fluage d'une part, mais aussi entre les contraintes générées et la résistance en traction du matériau d'autre part.

Plusieurs comportements sont envisageables selon la capacité d'adaptation par fluage du matériau, soit le matériau ne développe pas assez de fluage pour relaxer les contraintes de retrait restreint et la fissuration apparaît alors au jeune âge de réparation (**cas 1**) figure 1.7, soit le matériau développe du fluage de telle façon que l'apparition de la fissuration est fortement retardée mais n'est pas empêchée (**cas 2**), enfin soit le matériau

développe une capacité d'adaptation parfaite et la relaxation des contraintes par fluage empêche totalement l'apparition de la fissuration (cas 3) .

L.Molez également a montré qu'une diminution du fluage tend à faire augmenter l'ouverture totale de fissure, alors qu'une augmentation du fluage provoque une décroissance. Avec un fluage important ($100 \mu\text{m}/\text{m}/\text{MP a}$) ajoute la fissuration est quasiment éliminée [38]. Peut être cette étude donne un avantage au BAN, qui se caractérise par un potentiel important de fluage, d'être utilisés d'une façon significative dans les travaux de réparation.

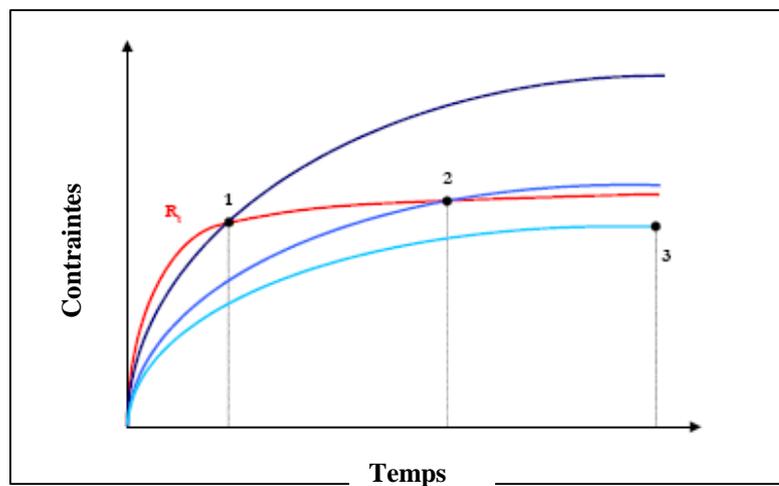


Fig.1.7 - Capacité d'adaptation par fluage. [35]

1.6.2.2 Perte d'adhésion avec le substrat

Dans le cas d'une réparation, l'interface béton vieux- béton jeune est un critère de durabilité capital [13]. Les phénomènes se déroulant à cette interface, sont complexes et dépendent d'un grand nombre de paramètres : caractéristiques du support, de la couche d'apport mais aussi de l'environnement climatique, chimique ou humain [9]. Comme aussi ils dépendent de la préparation et la rugosité de la surface [38].

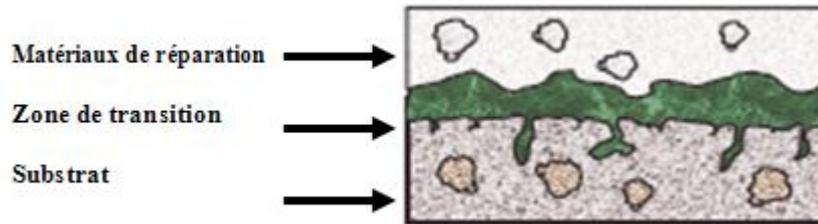


Fig.1.8 - Modèle d'interface dans un système réparation. [38]

L'obtention d'une bonne adhérence est la condition déterminante pour la tenue d'une réparation durable. De façon pragmatique une bonne adhérence est celle qui assure un lien efficace, uniforme et durable entre le matériau de réparation et son support. L'efficacité du lien réfère à sa capacité à unir les deux phases comme si elles n'étaient qu'une seule pièce monolithique [51].

A cet égard, une baisse d'adhérence est le gage d'une mauvaise durabilité car elle pourrait à long terme conduire au décollement de la réparation [35], ce décollement qui est en effet, généralement la conséquence de plusieurs causes de différents vieillissements comme le séchage, les cycles de mouillage- séchage ou de gel – dégel, ou encore la fissuration propagée dans la zone inter faciale, cette zone entre deux bétons, qui ont des propriétés différentes, constitue souvent la zone la plus faible dans la structure [38].

1.6.3 Durabilité de la réparation

1.6.3.1 Définition d'une réparation durable

Le principal objectif de toute opération de réparation durable est de prolonger la vie de la structure réparée, se prolongement peut être expliqué par le terme durabilité de la réparation, notion qui se traduit essentiellement par une fissuration minimisée ou évitée, et également par l'obtention d'une adhérence au support, qui soit suffisante et qui ne se détériore pas dans le temps.

Les deux notions : fissuration évitée, et adhérence au support, nous conduisent plus précisément vers le phénomène de la compatibilité, car nous constatons de nombreux cas de réparations déficientes sont dues à l'incompatibilité du matériau de réparation avec l'ancien béton. A cet effet, il est essentiel de développer des outils de caractérisation simples et accessibles, pour implanter la notion de la compatibilité dans la pratique des réparations [37].

1.6.3.2 Méthodes d'obtention de la compatibilité déformationnelle

Cinq principaux paramètres à considérer, pour caractériser la compatibilité déformationnelle, d'après F.Modjabi et coll. [37] : le retrait ; le module élastique ; le fluage ; le degré de restriction et la résistance à la traction.

O.Laurence [35] voit que l'obtention d'une bonne compatibilité déformationnelle, peut se faire de différentes façons. L'un des moyens consiste à utiliser un matériau dont le retrait est faible (utilisation d'un adjuvant réducteur de retrait, ou encore l'utilisation d'un ciment expansif). Bien sûr minimiser le retrait de séchage peut aussi se faire en utilisant des matériaux dont la microstructure est très dense et donc dans la porosité est très fine. Mais cela n'est pas possible qu'avec des bétons de faible rapport E/C et comportant souvent de la fumée de silice dans leur composition.

Un autre moyen d'obtenir une compatibilité déformationnelle adéquate, ajoute O.Laurence [35] est d'améliorer le comportement mécanique du matériau de réparation, cela peut se faire en utilisant des matériaux de forte résistance en traction (ce sont souvent des matériaux riches en ciment et de rapport E/C faible, et donc le retrait endogène va être élevé). Une autre possibilité consiste à utiliser des fibres d'acier qui donneront au matériau une meilleure capacité à contrôler la fissuration en le rendant plus diffuse et en minimisant les ouvertures de fissures.

En fin le dernier moyen, consiste à utiliser un matériau dont le potentiel de fluage est important comparativement au retrait qu'il développe au cours du temps [35].

Peut être ce dernier moyen donne l'avantage à l'utilisation des BAN dans les travaux de réparations, et ça ce que nous encourage de les formuler et les caractériser afin de les appliquer pour les travaux de réparation (thèse de notre recherche).

1.7 Les BAN dans les travaux de réparations

La technique du béton autocompactant ou autonivelant fait aujourd'hui l'objet de toutes les attentions que ce soit pour des travaux neufs, ou des travaux de réparation. En ce qui concerne les travaux de réparation, l'utilisation des BAN vise à garantir une bonne durabilité [45], peut être c'est l'objectif primordial de toute opération de réparation. Même la quantité et l'ouverture des fissures semblent se comparer avantageusement à celle, qui peut être typiquement rencontrée sur le même type de réparation au moyen de béton projeté [45].

Pour la construction d'un nouvel élément le béton doit fluer au minimum. Pour la réparation d'un élément de béton, lorsque l'on est en condition de retrait empêché non

structurale, on recherche un béton de réparation qui aura aussi une bonne capacité de fluage possible. C'est à cet égard, étant donné sa propension au fluage en tension au jeune âge, que l'utilisation d'un béton autonivelant présente un avantage marqué. Sous les contraintes internes de tension, le béton autonivelant flue, ce qui a pour effet de relaxer au fur et à mesure qu'elles se créent les efforts de tension causés principalement par le retrait du béton. Lorsque ce phénomène de relaxation permet au moment le plus critique d'avoir une résistance en tension du béton en tout temps supérieur aux contraintes internes en traction, il en résulte des surfaces exemptes de fissures [15].

Au Québec, les réparations les plus courantes d'ouvrages en béton sont réalisées soit avec du béton projeté par procédé à sec ou humide, soit plus récemment, avec du béton autonivelant [26].

Sa grande fluidité due à un dosage élevé de superplastifiant permet de combler toutes les vides, comme il s'avère aussi qu'il offre une excellente durabilité, une belle apparence des surfaces et une bonne adhérence au support, peu de fissuration et une mise en oeuvre adéquate [26][30].

1.8 Exemples de réparations avec le BAN

Il est envisageable que les domaines d'application des réparations avec le BAN, deviennent plus nombreux pour des raisons aussi bien économiques que techniques. Ils comprennent aujourd'hui des réparations des ouvrages d'arts, des bâtiments, et des constructions coulées sous l'eau.

Pour mettre en évidence la faisabilité de la réparation avec le BAN, on peut citer quelques exemples où ce type de béton a été la solution la plus adéquate pour plusieurs problèmes de réparation.

1- Réfection du passage inférieur Jarry/Querbes avec 420 m³ de béton auto nivelant fibré a été employé pour la réparation de 1700 m² de surface [15].

2- Réparation du Tunnel Notre-Dame de Grâce au cours de l'été 2000, Les réparations de sur près de 8000 m² de surface de plafond ont été réalisées sur une période de sept(07) mois au moyen du béton auto nivelant pendant les nuits tout en n'obstruant pas la circulation routière de jour[45].

3- Réfection du stationnement Webster à la ville de Sherbrooke en 1996 projet gagnant le prix du Ministère des Affaires municipales et de la métropole du Québec [17].

4- Réparation des piliers du pont d’Oakland (Californie), par du BAN fabriqué avec un agent colloïdal et de la fumée de silice. La densité du ferrailage et la présence de nombreuses installations temporaires nécessitaient l’utilisation d’un BAN [51].

5- Réfection de la centrale nucléaire de Sainte-Lucie avec un volume de 1530m³ de BAN coulé sous l’eau, contenant un agent colloïdal et un liant comportant (6% de fumée de silice et 12% de cendre volante) [51].

6- Réparation du barrage Red Rock (Etats-Unis) avec du BAN contenant un agent colloïdal coulé à une profondeur de 8m. Le ferrailage important et la profondeur rendaient difficile l’insertion du tuyau de pompage dans les coffrages [27].

Au Québec, une dizaine de réparations ont été faites avec du BAN, depuis 1997. Le tableau 1.4, illustre l’endroit, l’élément qui a été réparé et la formulation de mélanges.

TAB. 1.4 - Sites expérimentaux. [26]

ANNEE	ENDROIT	REPARATION	FORMULATION DE MELANGE/m ³
1997	Echangeur Blaise-Pascal (Québec)	Poutres précontraintes	580 kg de 10SF
1998	Autoroute 50(Gatineau) Autoroute Duplessis (Québec)	Extrémités de poutres Chevêtre	345kg de type10+30kgSF+161kg (LT) 500 kg de ciment ternaire
1999	Autoroute Dufferin-Montmoreney (Québec) Autoroute 10(Chambly) Autoroute 40(Trois- Rivières)	Poutres de rigidité Chevêtre Ponceau	475kg (50% type 10+50%type10SF) 500kg de ciment ternaire 500kg de type 10
2000	Autoroute20, rivière des Couture (Lévis) Deschambault (Portneuf) Autoroute5, boulevard Raymond (Hull)	Chevêtres Bases, colonnes et chevêtres Hauts des culées	480kg de ciment ternaire 510kg de ciment ternaire 394kg type 10SF+131kg de Laitier



Phot. 1.3 - Coffrage utilisé pour les travaux de réparation de la voûte au Tunnel Notre –Dame-grâce. [45]



Phot. 1.4 - Aspect final des réparations [45]



Phot. 1.5 - Passage inférieur Jarry/Querbes avant sa réfection [15]



Phot. 1.6 - Mise en place du BAN. [15]



Phot. 1.7 - Passage inférieur Jarry/Querbes tel que construit [15]

1.9 Bilan

Actuellement, la plupart des structures en génie civil, et surtout les ouvrages routiers, ont atteint un seuil de dégradation important. Alors il est temps de les réhabiliter ou les remplacer.

La dégradation de ces ouvrages peut se définir comme la perte de la performance du béton et qui se manifeste par déformation ou changement de ces propriétés suivant plusieurs causes: physiques; chimiques; ou bien techniques. A cet effet , dans la plupart des pays développés , les gouvernement ne cesse plus de dépenser des milliards de dollars pour la restauration et la réhabilitation , et de rendre durable leurs infrastructures.

La durabilité des ouvrages en béton qui forme une nouvelle exigence des maîtres des ouvrages du 21^{ème} siècle , peut être affectée par plusieurs facteurs liés aussi bien au défauts de conception qu’au défaut d’entretien et mise en oeuvre.

Afin de maintenir leurs états de service, la réparation constitue une solution primordiale pour les ouvrages dégradés. Cependant, lorsque un matériau de réparation est mis en place sur un support d’ancien béton, il se pose le problème de l’incompatibilité, qui se traduit par une fissuration évoluée et une perte d’adhésion avec le substrat, deux phénomènes conséquences du fait de retrait au sens large.

L’utilisation d’un matériau dont le potentiel de fluage est important comparativement au retrait qu’il développe, c’était l’un des moyens proposés pour obtenir une bonne compatibilité déformationnelle. Alors c’est peut être un avantage pour l’utilisation des BAN dans les travaux de réparation. Ces bétons qui constituent actuellement une innovation importante, liée essentiellement à la fluidité qui permet de remplir les formes les plus complexes, et de faire des réparations adéquates de surface de béton.

CHAPITRE 2

CONCEPT, CARACTERISATION ET FORMULATION

DES BETONS AUTONIVELANTS

2.1 Introduction

La technologie des matériaux hydrauliques a accompli au cours de ces vingt dernières années des progrès importants, qui ont abouti à de nouvelles générations de produits [24] : bétons à hautes performances, bétons compactés au rouleau, bétons autonivelants, etc....

Les termes comme « béton à haute performance » ou « béton compacté au rouleau » signifient ce qui peut être attendu comme caractéristiques. Dans le premier cas, la haute performance faite souvent référence à la résistance à la compression ou à la durabilité. Dans le second cas, c'est d'avoir un béton qui puisse être mis en place d'une façon particulière. Mais actuellement, avec l'avènement des bétons autonivelants, c'est la maniabilité qui attire l'attention [47].

Dans notre recherche bibliographique, présentée dans ce chapitre, essayons d'exposer un aperçu détaillé sur les BAN, en explorant tout ce qui touche leur maniabilité et leur résistance suivant l'hierarchie suivante :

- Concept des BAN ;
- Caractérisation des BAN ;
- Les principaux constituants des BAN ;
- Bétons autonivelants renforcés de fibres ;
- Bétons autonivelants avec résine ;
- Formulation des BAN.

2.2 Concept des bétons autonivelants

2.2.1 Historique des bétons autonivelants

Milieu des années huitante, des efforts importants ont été entrepris au Japon afin d'améliorer la durabilité des ouvrages en béton grâce à des mesures appropriées.

A l'origine d'une durabilité insuffisante on retrouvait souvent un compactage du béton non conforme aux règles de l'art. Ce constat fut le point de départ pour le développement du béton auto compactant ou SCC (de l'anglais Self Compacting Concrete). Le premier prototype d'un tel béton fut développé en 1988 par le professeur [Okamura](#) de l'Université de Kochi. Sa première utilisation pratique intervint deux années plus tard pour la construction d'un pont.

Cette découverte en matière de technologie du béton suscita un énorme intérêt au niveau mondial [25].

En Mai 1992, au 4^{ème} Congrès International CANMET & ACI à Istanbul, l'intervention du [K. Ozawa](#) a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération de béton [25].

A la fin des années nonante on vit apparaître les premières applications en Suède, en France et aux Pays-Bas. Peu après en Suisse, en fin le béton auto nivelant fut également envahi le monde entier.

2.2.2 Définition du béton autonivelant

On renvoie au comité scientifique et technique de l' [AFGC](#), on trouve par définition que les bétons autonivelants (BAN) constituent une famille des bétons autoplaçants (BAP), correspondant aux applications horizontales (dallage, plancher, etc.) [1].

Par béton autoplaçant (BAP) on désigne des bétons très fluides, homogènes et stables, mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuant par le seul effet gravitaire) et conférant à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration [1].

Dans les recommandations belges on trouve la définition suivante :

« Le béton autoplaçant (BAN) est un béton qui, à l'état frais, est caractérisé par une fluidité telle que, par le seul effet de son poids propre et sans énergie de compactage supplémentaire, il est capable de remplir complètement le coffrage, même à travers une

nappe d'armatures dense ou en présence d'autres obstacles, tout en ayant une résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène lors du transport, du pompage et de la mise en oeuvre. » [46].

L'Annexe Nationale NA de La norme Suisse SNEN206-1 donne la définition suivante :

Le béton frais est appelé autoplaçant lorsqu'il se compacte suffisamment grâce à son poids propre tout en ne présentant pas de ségrégation [25].

D'une façon générale, les BAN sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans des coffrages très ferrailés.

Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'autonivelant que si le matériau durci final présente des propriétés homogènes, c'est-à-dire s'il n'a pas subi de ségrégation.

À titre d'exemple, les bétons fluidifiés par ajout d'un excès d'eau, que l'on rencontre fréquemment dans l'industrie du bâtiment, ne rentrent pas dans cette catégorie, car une telle fluidification se fait au détriment de la résistance, de la durabilité et de la qualité de parements des bétons [49].



Phot. 2.1 - Les gravillons nagent sans aucune ségrégation. [24]

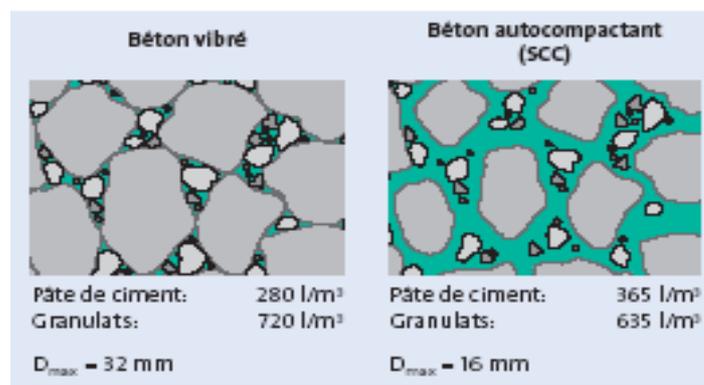
2.2.3 Particularité de la composition des BAN

La particularité des BAN, réside essentiellement dans leurs propriétés à l'état frais, de manière plus approfondie, cinq particularités peuvent caractériser les BAN [1] :

A -Un volume de pâte élevé

La composition d'un BAN doit offrir un rapport équilibré entre les propriétés recherchées sur béton frais ou durci et les coûts de fabrication.

Les principales propriétés recherchées sur béton frais sont l'auto compaction, la fluidité, la viscosité et la stabilité envers la ségrégation. La formulation du BAN repose sur les meilleures bases technologiques que celles d'un béton vibré. Dans le cas du béton vibré, il s'agit de remplir les vides entre les granulats avec la pâte de ciment composée de ciment, d'additions et d'eau, afin d'obtenir un béton offrant les qualités requises (ouvrabilité et compacité). Par contre dans le cas du BAN la pâte de ciment doit non seulement remplir les vides inter granulaires, mais il faut en plus prévoir un volume excédentaire d'environ 65 à 100 l/m³ [25], dont le rôle est d'écarter les gravillons les uns des autres [1].



Phot. 2.2 - volumes relatifs de pâte des ciments différents pour un béton vibré et un BAN. [24]

B -Une quantité de fines élevée

Les BAN sont caractérisés par une fluidité importante et surtout une diminution de la ségrégation et du ressuage (par rapport au béton ordinaire).

Pour obtenir ces propriétés et pour un meilleur arrangement granulaire on ajoute de fortes teneurs en additions minérales : fumé de silice, laitiers, additions calcaires cendres volantes... (Environ 200kg/m³ de c.v pour 300kg/m³ de ciment) [10].

C- Un fort dosage de superplastifiant

Afin d'obtenir la très grande fluidité requise d'un BAN, on utilise généralement un adjuvant fluidifiant(superplastifiant) [25], qui permet d'abaisser la teneur en eau de 10 à

30%, tout en maintenant une même maniabilité [47]. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et de ressuage [1].

D- L'utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (dit agent de viscosité)

Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales. Ces produits comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation de granulats en rendant la pâte plus épaisse. De façon schématique l'utilisation de ces produits semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Ils semblent par contre inutiles dans le cas de BAN ayant des rapports eau/liant faibles (BAN de résistance supérieure à 50 MPa) [1].

E- Un faible volume de gravillons

Comme les gravillons sont à l'origine du blocage de béton en milieu confiné, il faut en limiter leur volume. D'un autre côté la présence de gravillons permet de diminuer le volume de vides du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir la maniabilité et la résistance mécanique souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport massique (gravillons/sable) de l'ordre de 1 dans les BAN. Bien évidemment ce rapport peut être revu à la hausse si le confinement est faible (dans un ouvrage peu ferrailé par exemple) ou à la baisse dans le cas contraire [1].

2.3 Caractérisation des bétons autonivelants

Généralement, quand il est question des propriétés du béton, ce sont des propriétés à l'état durci qui sont évoquées. Cependant, avant de passer à l'état durci, le béton passe par une phase maniable durant laquelle il peut être mis en place.

Les propriétés du béton frais sont alors très importantes car si le béton ne peut être placé correctement, les propriétés désirées à l'état durci ne seront pas obtenues.

Avec leurs propriétés à l'état frais, les BAN qui se développent actuellement un peu partout dans le monde, se distinguent des bétons dits ordinaires.

Dans ce chapitre on essaye de présenter, tout d'abord une description critique sur les plus importants essais utilisés en pratique pour caractériser les BAN à l'état frais et à l'état durci.

2.3.1 Caractérisations des BAN à l'état frais

Les BAN sont des matériaux encore relativement nouveaux au monde de construction. Les formulateurs se trouvent confrontés à une autre difficulté lorsqu'ils s'intéressent à caractériser leurs propriétés à l'état frais, car il n'existe pas à l'heure actuelle d'essais normalisés ni de critères associés pour s'assurer qu'un béton est effectivement "autonivelant" [49].

En plus de sa capacité à se compacter de lui même, les caractéristiques les plus importantes pour la mise en œuvre du BAN sont la fluidité, la viscosité et la résistance envers la ségrégation.

Il existe de nombreux procédés pour effectuer le contrôle de ces propriétés sur béton frais. Ils vont du complexe et coûteux rhéomètre à béton, jusqu'au simple cône servant à la mesure de l'étalement (Slump Flow) [25].

En France, trois essais de caractérisation ont été préconisés en l'an 2000, pour l'Association Française de Génie Civil (AFGC) [1]. D'abord provisoires, ces recommandations sont devenues sur site les essais de références pour valider une formule de BAN. Ces trois essais sont : l'essai d'étalement, l'essai à la boîte en L et, l'essai de stabilité au tamis [51].

Le tableau 2.1 donne les valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAN

Tab. 2.1 - Valeurs préconisées pour les essais A.F.G.C [51]

Etalement	de 60cm à 75cm
H_2/H_1	≥ 0.8
Laitance	$\leq 15\%$

A- Essai d'étalement (essai évaluant la fluidité)

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow) on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante (≥ 800 par 800 mm), puis il est rempli de BAN. Le cône est ensuite soulevé et le BAN en sort en formant une

galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue qui devrait être comprise entre 600 et 800 mm [25].

Pour l'AFGC les valeurs ciblées d'étalement sont généralement fixées dans la fourchette 60 à 75 cm (tableau 2.1). Il est possible aussi de mesurer le temps d'écoulement du béton pour atteindre un étalement de 50 cm (noté $T50$) ce qui donne un indice sur la viscosité d'un mélange de béton.

Les figures suivantes représentent d'une façon claire l'essai de l'étalement.



Phot. 2.3 - Détermination de l'étalement. [24]

B- Essai de boîte en L (L-Box) : (essai évaluant la déformabilité)

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables. (Voir fig. 2.1 et phot.2.4).

Le mode opératoire est exprimé comme suit [1]:

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39 mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 (voir fig.2.5) et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1 .

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation.

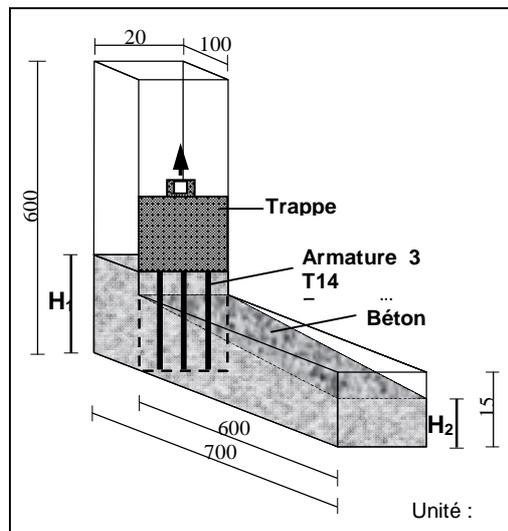


Fig. 2.1 - Représentation schématique de l'essai à la boîte en L. [24]



Phot. 2.4 - Représentation photographique de l'essai à la boîte en L. [24]

C- Essai de stabilité au tamis (essai évaluant la stabilité)

Cet essai vise à qualifier les bétons autonivelants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autonivelant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité[1].

Cet essai consiste l'utilisation d'un seau de 10l avec un couvercle ; un tamis de 5mm, de diamètre de 315mm plus fond et une bascule de portée minimale de 20kg et de précision de 20g.

Le mode opératoire d'après les recommandations de l'AFGC est la suivante : A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans le seau. Après quinze minutes, un échantillon de 4,8 kg est versé du seau sur le tamis (voir fig.2.2), deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon donne l'indice de ségrégation π La mesure de cet indice conduit à classer les formules de BAN de la façon suivante:

- $0 \leq \pi \leq 15 \%$ stabilité satisfaisante.
- $15 \% < \pi \leq 30 \%$ stabilité critique, l'essai à refaire in situ.
- $\pi > 30 \%$ stabilité très mauvaise, béton inutilisable.

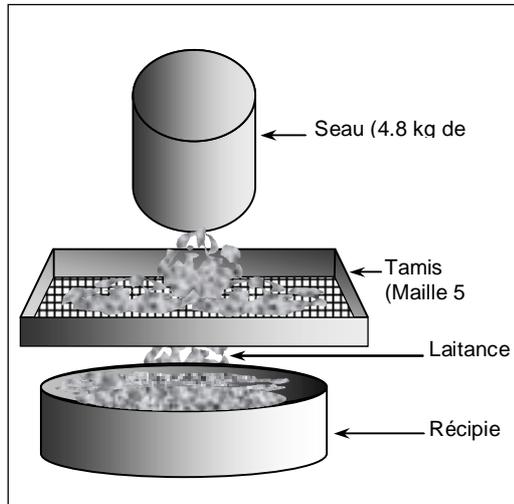


Fig. 2.2 - Représentation schématique de l'essai de stabilité au tamis.[40]



Phot. 2.5 - Dispositif de l'essai de stabilité au tamis.[40]

2.3.2 Caractérisation des BAN à l'état durci

Lorsque le béton autonivelant est formulé et mis en oeuvre de manière adéquate, ses propriétés à l'état durci (résistance, déformation, durabilité) ne se différencient guère de celles d'un béton ordinaire vibré. Généralement elles sont d'après plusieurs chercheurs même meilleures, en particulier lorsque le béton spécifié doit répondre à des exigences courantes, ce qui est généralement le cas dans le domaine du bâtiment [54].

A- La résistance mécanique

La mise au point d'une formule de béton consiste à rechercher à partir d'un composant donné (le plus souvent local), un mélange ayant à l'état frais une certaine maniabilité, à l'état durci une résistance en compression donnée, et ce au moindre coût. Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (proportion gravier / sable) [11].

D'une façon expérimentale les BAN impliquent un rapport E/C bas, donc de nature à fournir de bonnes résistances mécaniques.

Paultre et coll. 1996 ont faits des tests comparant les BAN aux traditionnels BHP, ils ont remarqué que les résistances en compression des BAN et BHP sont remarquables [43].

Gibbs et coll. 1999, rapporté par A.Daoud [10] ont fait des tests en comparant les BAN aux bétons de références sur des éléments standard, ils ont conclu qu'il y a une légère différence entre la résistance à la traction et en compression des BAN et du béton vibré.

Par contre M.Sonebi, 1999 [51] observe que la résistance à la traction à 28j pour les BAN conservés dans l'eau est supérieure à celle du béton de référence conservé dans les mêmes conditions.

L.Molez [38], comme nous avons vu au premier chapitre sur une série de six mélanges de béton, il a trouvé que la courbe de la résistance en compression du BAN, après le 10^{ème} jours se coïncide avec celle du BO (voir figure n°2.3), de même il a trouvé que la résistance en traction du BAN est supérieure à celle du BO.

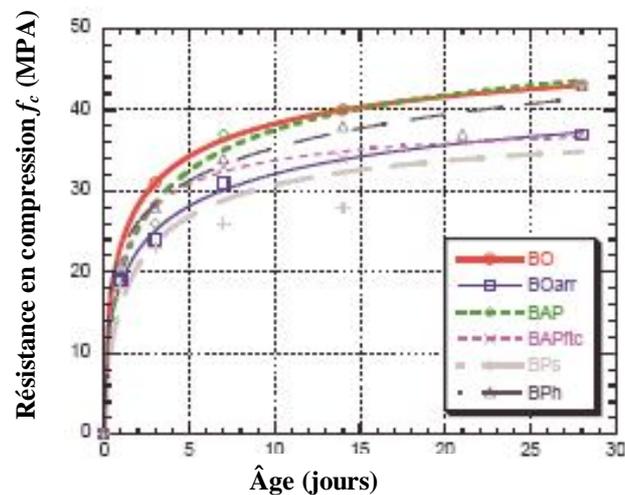


Fig. 2.3 - Résistance en compression de différents mélanges. [38]

B -Le module élastique

Comme les BAN renferment un faible volume de granulats, il faut prévoir des modules d'élasticité plus faibles que pour des bétons de mêmes résistances mais de rhéologie conventionnelle. Les travaux de Paultre et coll. précédemment cités, ont montré que les modules d'élasticité sont moins élevés pour les BAN, comparable- ment au BHP, ce qui confirme cette idée.

P.Turcry [54] a également trouvé que le module élastique d'un BAN est systématiquement inférieur à celui du BO dérivé. Mais la différence n'est pas très importantes, puisqu'elle se situe entre 2 et 8%.

Au contraire, [L.Molez](#) a trouvé que le module élastique du BAN est légèrement supérieur à celui du BO [\[38\]](#).

Rapporté par [P.Turcry](#) [\[54\]](#), [Person et Prousset](#) trouvent que le module élastique des deux types de béton (BO et BAN) est très proche.

De manière plus précise, pour expliquer ce fait, on peut imaginer le béton comme un composite à deux phases composées d'une matrice, la pâte de liant durcie, et en second lieu, d'inclusion des granulats. Sachant que le module d'élasticité est principalement affecté par les granulats, les BAN sont donc susceptibles d'être plus déformables que les BO. Néanmoins, plusieurs recherches concernant le module d'élasticité des BAN montrent qu'il est souvent proche à celui de BO, lorsque les deux types de béton ont la même résistance [\[40\]](#).

C- Le retrait

L'affirmation la plus répandue, est que les BAN se caractérisent par un retrait plus important comparable ment aux bétons ordinaires en raison de leurs dosages en eau , en fines et , en liant forcément plus élevés.

Les travaux de [P. Turcry et coll.2003](#) ont montré que L'amplitude maximale du retrait plastique des BAN est environ cinq fois supérieure à celle des bétons ordinaires[\[55\]](#).

Cette tendance est confirmée par d'autres résultats de la littérature [Gram et coll. 1999](#) rapporté par [P.Turcry](#) [\[54\]](#), toujours, mais le retrait total d'un BAN reste proche à celui d'un BO dérivé d'après lui, c'est tout à fait contraire à ce qu'il a trouvé [L.Molez](#) [\[35\]](#) que le retrait total d'un BAN est supérieur à celui du BO. (Voir figure n°2.4).

Néanmoins, il y en a d'autres chercheurs considèrent que le retrait des BAN avec le temps est à peu près le même au béton vibré [\[28\]](#).

Une autre explication a été prononcée par l'[AFGC](#) affirme que l'influence du volume de la matrice de la pâte sur le retrait total du béton conduit à penser que ce type de déformation sera augmenté pour les BAN par rapport aux bétons ordinaires, et ce d'autant plus que la proportion granulaire s'éloigne des valeurs courantes des bétons ordinaires [\[1\]](#).

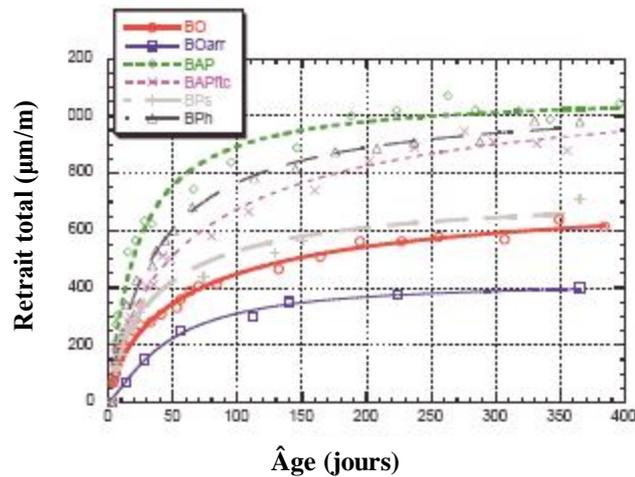


Fig. 2.4 - Retrait total de différents mélanges. [38]

D- Le fluage

En ce qui concerne le fluage, il est difficile de donner des indications fiables sur la différence existant entre le béton autonivelant et le béton vibré [25].

A cet effet on trouve que P.Turcry voit que le fluage du BAN est proche à celui du BO [54], par contre B.Bissonette et coll. [37] d'après des résultats au laboratoire confirment que le BAN se caractérise par un fort potentiel de fluage, c'est également ce qu'il a noté L.Molez que les matériaux qui présentent un retrait total important, montrent aussi un fluage total élevé, comme les BAN et les bétons projetés à voie humide [38] (Voir figure 2.5).

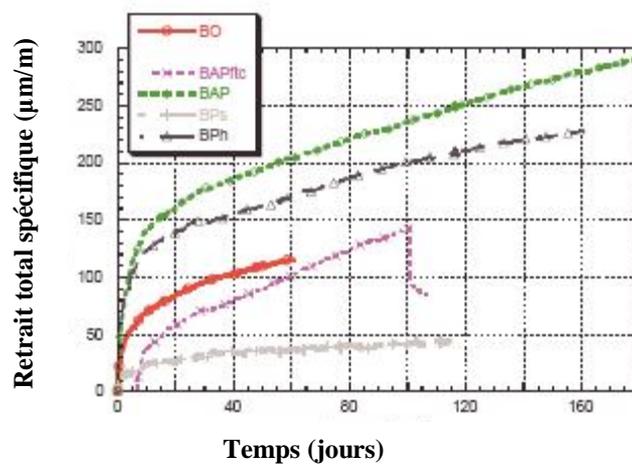


Fig. 2.5 - Fluage total spécifique de différents mélanges. [38]

E- La durabilité

Les quantités de ciment et de farines ainsi que le rapport eau sur ciment équivalent sont des facteurs décisifs pour la durabilité d'un béton, qu'il s'agisse d'un béton vibré ou autonivelant [25].

Lacombe, 1997 rapporté par Yanéric R ,2000 [47] rapporte qu'en général les BAN avec air entraîné montrent un très bon comportement à l'écaillage et au gel dégel. Plusieurs tests normalisés donnent des indices qui permettent de juger de la durabilité des bétons, plusieurs de ces tests sont directement applicables aux bétons autonivelants.

Frank Jacobs, 1999 [28] prouve que la durabilité des BAN avec un rapport de E/C=0.4 correspond à celle des bétons de haute performance.

Compte tenu d'un rapport E/Céq généralement inférieur, la perméabilité du béton auto compactant est environ 30 à 50% plus faible que celle d'un béton vibré courant du bâtiment, affirme une recommandation éditée par la société Suisse Holcim [25].

Cette recommandation rapporte qu'avec un ciment spécial (Flexremo) par exemple ,à l'âge de 28j la résistance au gel d'un béton autonivelant en présence de sel est généralement suffisante , lorsque le rapport E/C est $\leq 0,45$,et elle est bonne lorsque le rapport E/C est $\leq 0,42$.

2.4 Les principaux constituants des bétons autonivelants

Les constituants des BAN peuvent être assez différents de ceux des BO. Ils peuvent différer tant par leurs proportions que par leur choix. Etant donné le mode de mise en place des BAN, il convient de porter une attention particulière au type de liant ainsi qu'à la granulométrie des gravillons si l'on désire obtenir de meilleures qualités de béton [40].

Les constituants entrant dans la fabrication du BAN, peuvent être divisés en trois grandes familles : les constituants de base, les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques.

2.4.1 Les constituants de base

A- L'eau de gâchage

Pour convenir à la confection de bétons, les eaux ne doivent contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles [11]. Alors, une analyse chimique de l'eau non potable peut être plus que nécessaire pour

détecter toute teneur trop élevée en ces impuretés. Tandis que toute eau de réseau public d'eau potable convient à la fabrication de béton auto compactant [25].



Phot. 2.6 - L'eau potable convient comme eau de gâchage. [24]

B- Le ciment

L'invasion et le développement du béton autonivelant, dans le monde entier, conduisent vers le développement de ciments portlands composés spécialement adaptés à la confection sûr et stable de ce type de béton. Néanmoins, en principe tous les ciments normalisés conviennent pour la fabrication des bétons autonivelants.

Cependant, l'utilisation du ciment portland (contenant seulement le clinker) peut donner toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales.

C- Les granulats

Les granulats se divisent principalement en deux catégories soient les gravillons ($\Phi > 5$ mm) et le sable ($\Phi \leq 5$ mm).

Les granulats roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. Les granulats roulés en vrac présentent un plus petit volume de vide inter granulaire, ce qui nécessite une plus faible quantité de pâte de ciment pour le remplir. La flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est cependant meilleure, en raison de leur plus grande surface spécifique à masse identique. Afin d'empêcher tout risque de blocage du BAN par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm. L'expérience a néanmoins montré qu'il était également possible d'utiliser des granulats de diamètre maximal différent [27].

M. Sonebi a utilisé des granulats de 14mm pour la formulation des BAN coulés sous l'eau [51]. Généralement, on ne doit pas dépasser le 1/5 de la plus faible dimensions de l'élément de béton ou le 3/4 de l'espacement des aciers des armatures ou de leur distances aux coffrages [22].

En outre, les BAN se caractérisent par une teneur élevée en sable et en éléments fins peut aller jusqu'à un rapport de S/G de 42.5% à 52.5% pour améliorer la pâte de ciment.

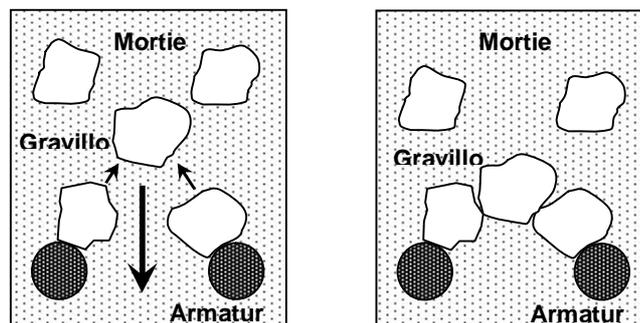


Fig. 2.6 - Phénomène de blocage des gravillons au droit d'un obstacle. [49]

2.4.2 Effet des constituants de base sur la maniabilité et la résistance du BAN

A –Granulométrie, forme et volume des gravillons

- Effet sur la maniabilité

La granulométrie des gravillons a des influences directes sur la maniabilité, soit par leur dimension maximale ou par leurs proportions des grains de même dimension. La dimension maximale affecte essentiellement la capacité de remplissage des BAN, et elle demeure toujours inversement proportionnelle à cette propriété. La figure (2.7) montre que la capacité de remplissage diminue de 72 % lorsqu'on augmente la taille maximale des gravillons de Ø12.5 à Ø20 mm [49].

Néanmoins, une dimension maximale plus faible engendre systématiquement une augmentation de leur surface spécifique, laquelle détermine la quantité d'eau nécessaire pour humidifier tous les solides. Cet inconvénient n'a pas d'importance du fait que le fort dosage en super plastifiant permet de conserver le rapport E/L désiré.

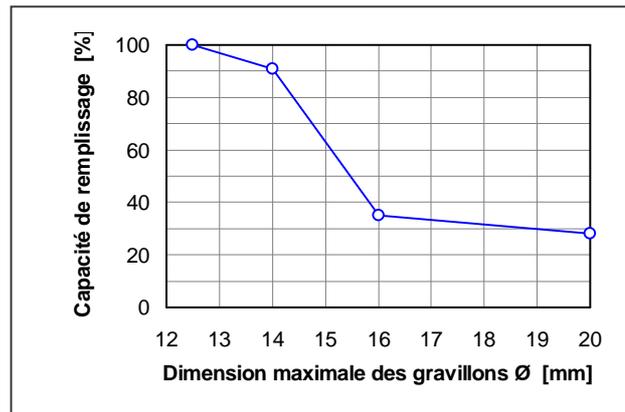


Fig. 2.7 - Effet de la taille maximale des gravillons sur la capacité de remplissage. [49]

Des études ont aussi montré l'importance des gros granulats sur la fluidité des bétons autonivelants, c'est pourquoi certains chercheurs à l'instar de [K.Khayat](#) conseillent d'utiliser en autres, des granulats roulés [32].

De même aussi, un faible volume de gravillons joue un rôle essentiel sur la rhéologie des BAN. En effet un volume important de ceux-ci, dépassant 350 l, peut détériorer toutes les performances à l'état frais. La figure (2.8) reproduite d'après [M. Sonebi](#) [51] montre que les développements de l'étalement et la capacité de remplissage des BAN sont des fonctions décroissantes du volume des gravillons.

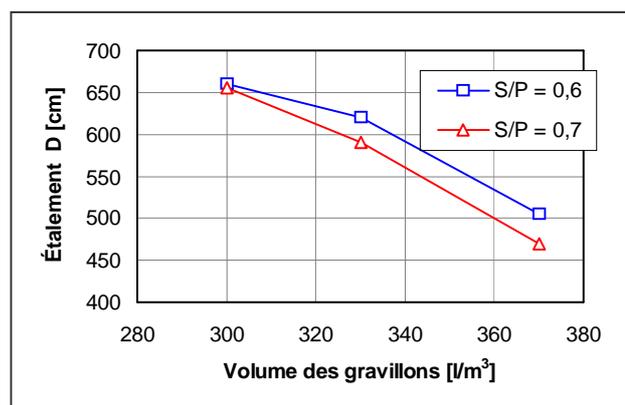


Fig. 2.8 - Effet du volume des gravillons sur l'étalement pour différents rapports S/Pt. [51]

- Effet sur la résistance

Un béton est un mélange de granulats (sable, graviers et éventuellement cailloux) liés entre eux par une pâte de ciment (ciment+eau).

Il ne faut pas perdre de vue qu'un béton tire du granulat une bonne part de sa résistance et plus particulièrement du gros granulat [11].

A cet effet, A.M. Neville [41] a affirmé que lorsque le rapport massique de (granulats/ciment) s'accroissait, il y avait une amélioration de résistance.

M.Sonebi [51] a également, montré qu'avec des granulats de dimensions de 14mm et avec un volume de 30%, des bétons autonivelants de rapport massique E/L de 0.41 et 0.47 ont développés leurs résistances aussi.

B –Rapport massique E/C

- Effet sur la maniabilité

Le principal paramètre affectant les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons est sans aucun doute le rapport E/L ou E/C (dans le cas où le liant contient le ciment seulement). Généralement, le rapport E/L utilisé dans le BAN est situé dans une large plage de 0.25 à 0.5 dépend bien sûr du type d'application et des performances visées [40].

Avec un dosage de superplastifiant donné, l'étalement des BAN est absolument augmenté avec un rapport E/L élevé. La figure 2.9 reproduite de l'article « Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants » Kharchi.F [31] illustre significativement cette idée, en constatant que la diminution du rapport E/L a influé directement sur les caractéristiques à l'état frais d'un BAN.

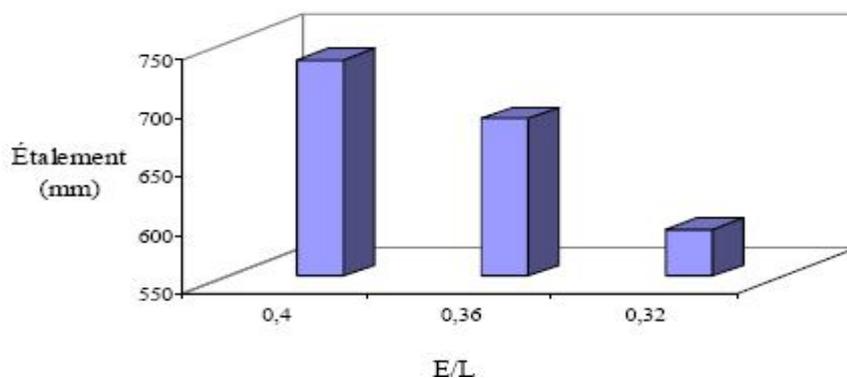


Fig. 2.9 - Effet du rapport E/L sur la maniabilité. [31]

- Effet sur la résistance

Il existe pour chaque béton et pour une mise en œuvre donnée une teneur en eau optimale donnant les résistance maximales [56]. Ainsi, il est très évident que les résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation du rapport E/C. au contraire, un faible rapport E/C améliore absolument les résistances. La figure 2.10 montre que la diminution du rapport E/L influe sur la résistance à la compression.

On constate qu'avec un rapport E/L=0.32 la résistance à la compression à sept jour d'un BAN a dépassé les 45MPa alors qu'avec un rapport E/L=0.4 elle est moins de 38MPa.

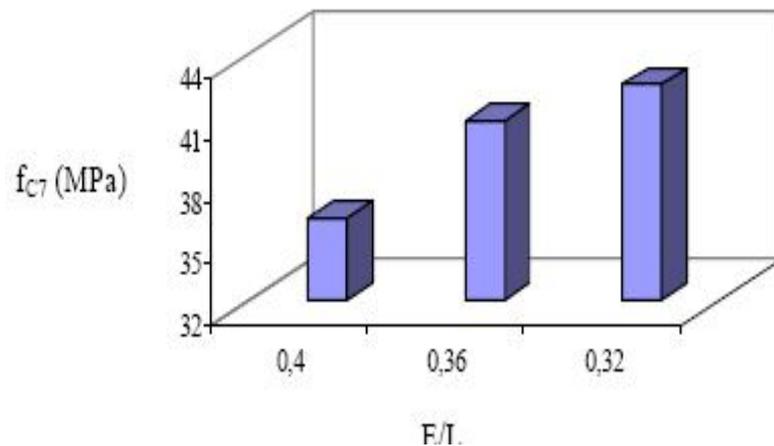


Fig. 2.10 Effet du rapport E/L sur la résistance. [31]

C –Rapport volumique S/Pt

- Effet sur la maniabilité

K.Khayat [32] voit qu'avec un faible volume des gravillons de 300 à 330 l/m³, l'effet de la variation du rapport S/P semble être plus efficace pour l'amélioration de l'étalement des BAN. Par contre, cet effet est très réduit si le volume des gravillons est important (370 l/m³). Par ailleurs, pour un BAN ayant un étalement de 60 à 70 cm et une bonne capacité de remplissage, M. Yurugi et coll. Rapporté par B.Necira [40] ont trouvé que le rapport S/P doit être compris entre 0.65 à 0.75, mais lorsque ce rapport est de 0.85, ils ont montré qu'il est très difficile d'obtenir un BAN.

C'est également ce qu'il a trouvé Y.Roussel [47] qu'il a noté que le rhéomètre peut détecter le changement de comportement rhéologique lorsque le rapport S/Pt passe de 0.6 à 0.75. De même M. Sonebi [51] a trouvé que le rapport S/Pt =0.6 offre la meilleure fluidité et la bonne déformabilité pour les bétons coulés sous l'eau.

- *Effet sur la résistance*

La réduction du rapport S/P signifie une augmentation des quantités du liant et de l'eau. Cette augmentation entraîne une montée en hydrate formé plus importante et par conséquent elle augmente les résistances mécaniques des BAN [40].

Cependant, avec un volume de sable faible par rapport au volume de pâte, le module élastique a tendance de diminuer (les granulats sont en général 3 à 15 fois plus rigide que la pâte) [1].

2.4.3 Les additions minérales

Pour les BAN, des additions minérales sont habituellement utilisées en remplacement d'une fraction de la quantité de ciment pour améliorer d'une façon principale la rhéologie et la stabilité. De plus, l'utilisation des additions minérales comporte des avantages non négligeables comme une baisse de la chaleur d'hydratation et une baisse du coût global du béton [47].

A- les pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25%), d'alumine et d'oxyde de fer [11].

B- Le laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau. Après le broyage, il se présente sous forme de nodules dont les diamètres sont compris entre 10 et 45 μm . La composition chimique de laitier comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker [11].

C-La fumée de silice

Les fumées de silice sont des résidus de la chambre de combustion d'un four destiné à produire des silicium ou des alliages contenant du silicium. Elles ont la forme de petites particules sphériques d'un diamètre moyen d'environ 0.1µm. Leur surface spécifique est de l'ordre de 20 à 25m²/g. Leur grande finesse et leur structure vitreuse en font un produit très réactif [47].

La proportion de fumée de silice est de l'ordre de 5 à 10% du poids de ciment[11].

D--Les cendres volantes

Les cendres volantes, produits pulvérulents proviennent du dépoussiérage des gaz de la combustion du charbon dans les centrales thermiques et peuvent être [11] :

- Siliceuses (V) ; auquel cas elles présentent des propriétés pouzzolaniques c'est-à-dire qu'elles sont capables de fixer la chaux à température ambiante faisant prise et durcissant par hydratation ;
- ou calciques (W) ; auquel cas, outre leurs propriétés pouzzolaniques, elles peuvent présenter des propriétés hydrauliques.

E- Les fillers calcaires

Les fillers calcaires, matériaux fins dont les plus gros grains ne dépassent pas 80µm, sont obtenus par broyage ou par pulvérisation des roches calcaires naturelles ou non. Ils sont généralement considérés comme une addition inerte, mais le fait qu'ils présentent certaines propriétés hydrauliques n'est pas en soi désavantageux, de même que s'ils présentent une réaction avec certains composés développés au cours de l'hydratation[56].

2.4.4. Effet des additions minérales sur la maniabilité et la résistance du BAN

- Effet sur la maniabilité

La maniabilité des BAN est une caractéristique très importante, elle peut se définir selon M. Sonebi[51] comme étant la facilité de mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage sans avoir de ségrégation ni de ressuage. Cette importante caractéristique peut s'améliorer pour les BAN en substituant une fraction de la quantité de ciment par des additions minérales allant jusqu'à 30% de fillers calcaires [39] ; [47] ; 20% de cendres volante [47] ; ou bien 20% de CV combinés avec 8% ou 6%

de fumée de silice [51] ou 40% de laitier de haut fourneau [47] ou 50 % LT pour les travaux de réparations sous l'eau d'après M.Sonebi [51].

Le tableau ci-dessous représente l'effet des ajouts minéraux sur l'étalement d'un béton autonivelant qui est l'indice principal de la maniabilité.

On remarque que les BAN confectionnés avec des fractions d'additions minérales : (cendres volantes ; fillers calcaires ou bien laitiers) marquent des bons résultats d'étalement comparable ment au BAN sans ajouts (40HSFN).

L'effet des cendres volantes sur la maniabilité des BAN est dû à la forme de leurs particules et de sa finesse qui permet d'augmenter la quantité d'eau libre dans les mélanges de béton ,ou qui permet à maniabilité égale ,de diminuer quelque peut le rapport E/L [47] .

Tab. 2.2 - Résultats des tests de maniabilité, (essai d'étalement). [47]

Béton	Quantité de SP (l/m ³)	Etalement (mm)	Cap. de remp. (%)	Temp. (C)
40CVN	14.4	665	78	20
40CVP	19.2	690	86	20
45CVN	9.9	690	82	20
40FCN	14.5	680	61	-
40FCP	16.0	680	82	26
45FCN	10.7	680	76	25
40LTN	9.1	680	84	23
40HSFN	15.2	640	82	26

En ce qui concerne les fillers calcaires leur effet sur l'ouvrabilité dépend surtout de leur finesse. Quand ils sont finement broyés, il y aura une augmentation de la maniabilité ou une réduction de la quantité d'eau requise pour obtenir un étalement donné.

Elles peuvent également augmenter le seuil de cisaillement mais ne modifie pas la viscosité plastique (l'effet s'oriente vers un effet fluidifiant) [48].

Pour le Laitier de haut fourneau ; comme pour les cendres volantes, il permet d'augmenter l'ouvrabilité des bétons et diminuer la ségrégation et le ressuage [47] ; [41] ; [40].

Pour les pouzzolanes naturelles, l'incorporation d'une quantité peut aller jusqu'à 50% dans les bétons ordinaires du quantité du ciment, cette substitution peut retarder la prise de la pâte, ce retard des temps de prise pourrait être dû à la diminution de la vitesse du processus d'hydratation ce qui peut être une qualité recherchée pour les gâchages en temps froid [36].

B. Necira [40] a également utilisé 40% d'ajout de pouzzolanes naturelles, comme substitution, ce qui lui permet d'améliorer la fluidité de ses BAN. (Voir la figure suivante)

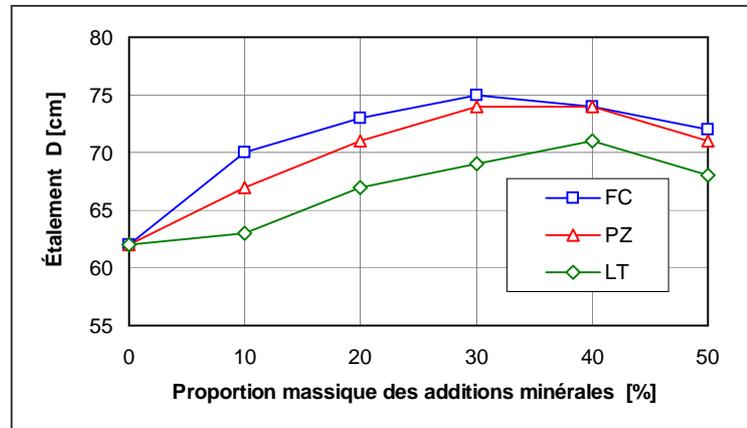


Fig. 2.11- Effet des additions minérales (FC, PZ, LT) sur la fluidité. [40]

Au contraire, des fillers calcaires, pouzzolanes naturelles, cendres volantes, laitier de haut fourneau, la grande finesse et surface spécifique des fumées de silice tendent à augmenter la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la même maniabilité qu'un béton sans fumé de silice. Cependant, en présence d'un super plastifiant et utilisées en petite quantité pour des bétons ayant un faible rapport E/C, les fumées de silice peuvent augmenter quelque peu la quantité d'eau libre dans le mélange de béton et accroître sensiblement la maniabilité [33] [47].

-- Effet sur la résistance

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton [11]. Cependant pour des raisons économiques on substitue des matières plus ou moins hydrauliques à une partie du ciment. L'utilisation de ces additions minérales et la forte adjuvantation conduisent à une modification de la cinétique d'hydratation des BAN [21], ce qui peut s'influencer sur leurs comportements mécaniques.

La résistance est généralement variable en fonction du type d'addition utilisée, mais d'une façon claire tous les ajouts à part les fumées de silice ont un effet clair de diminution de la résistance. La figure 2.12 suivante montre la diminution des résistances mécaniques des BAN en fonction de l'augmentation de la proportion massique du fillers dans le liant.

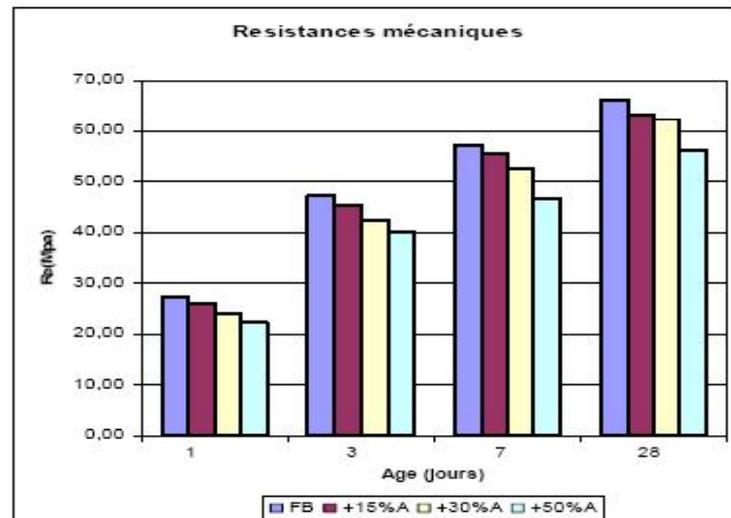


Fig. 2.12 - Effet des différentes proportions de fillers calcaires sur la résistance mécanique d'un BAN. [21]

Cependant, les résistances mécaniques, à court terme des bétons présentent une diminution en fonction de l'augmentation de la proportion massique de pouzzolanes, de laitier ou de cendres volantes dans le liant, mais ses résistances peuvent s'améliorer à long terme, comme il est indiqué dans la figure 2.13 où ces résistances sous l'effet d'un pourcentage de pouzzolanes seront comparables et même plus au résistances à 100% de ciment [36].

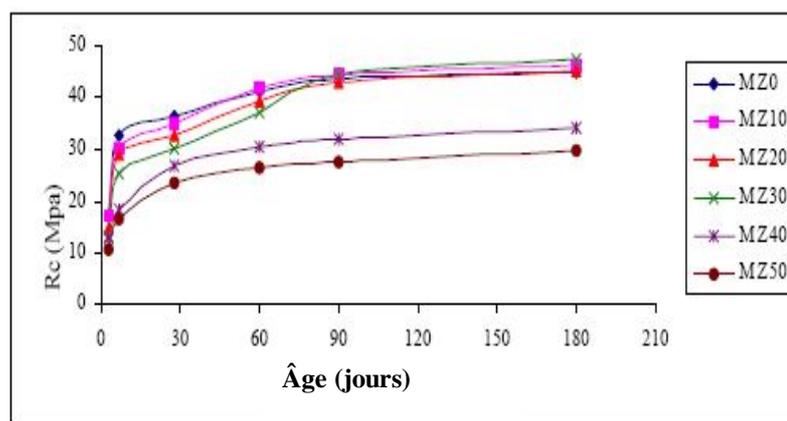


Fig. 2.13 - Effet de la pouzzolane sur l'évolution des résistances à la compression des mortiers. [36]

Au contraire, des pouzzolanes, du laitier, des cendres volantes ou des fillers calcaires, l'ajout de la fumée de silice en remplacement partiel au ciment (10%) se traduit par un accroissement de la résistance en compression par rapport à un béton de référence pendant le premier mois d'hydratation. A plus long terme cependant, le gain de résistance tend à s'annuler [29] (voir la figure 2.14).

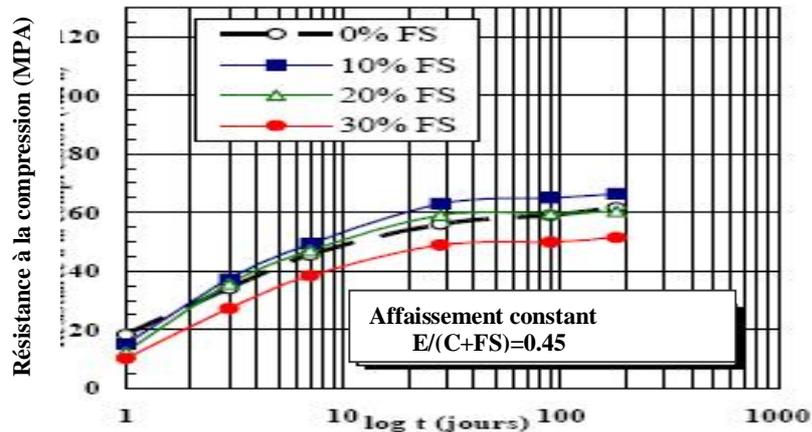


Fig. 2.14 - Evolution de la résistance à la compression des bétons contenant de différents pourcentages de fumée de silice en fonction de temps. [29]

2.4.5 Les adjuvants

ce sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci [11].

Il existe beaucoup de type d'adjuvants, dans cette section on essaye d'expliquer simplement ceux qui seront utilisés dans notre projet de recherche.

A- Les superplastifiants

Les superplastifiants sont des réducteurs d'eau à haute efficacité. Leur mode d'action principale est d'augmenter la maniabilité des bétons par le phénomène de dispersion en brisant la dynamique des forces électrostatiques qui existe entre les particules de ciment présentant des charges électriques différentes [47].

Ils sont généralement composés de longues molécules organiques de masse élevée.

On distingue quatre familles chimiques [51] : soit les condensés de formaldéhyde et de naphthalène sulfonés (Naph), les condensés de formaldéhyde de mélamine sulfonés (Mel), les lignosulfonates modifiés (Ligno), ainsi une quatrième catégorie incluant les autres types de substances (dont les esters d'acide sulfonés et les esters carbohydratés). En général les doses recommandées varient entre 0.5 et 2% du poids de ciment.

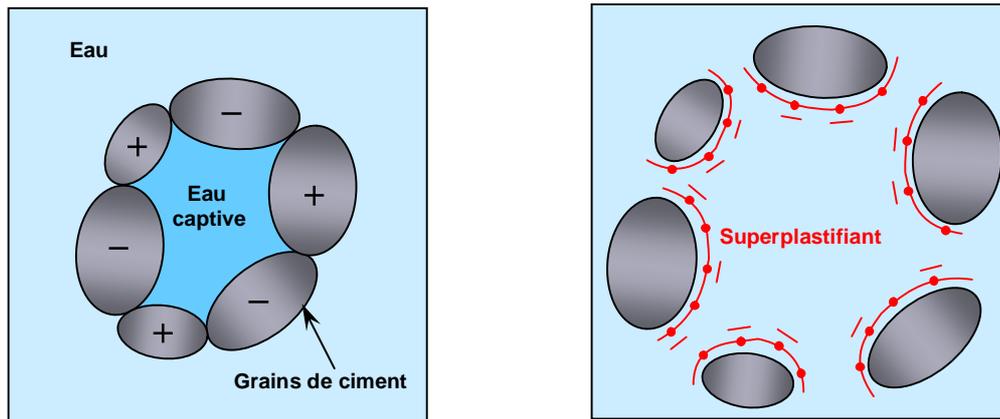


Fig. 2.15- Effet du super plastifiant sur les grains de ciment par le phénomène de dispersion. [40]

B- Les agents colloïdaux

Les agents colloïdaux sont utilisés essentiellement pour améliorer la cohésion et la stabilité des mélanges de béton. Leur utilisation principale est pour les BAN et les bétons coulés sous l'eau [47].

Ils ont été développés en Allemagne en 1977, leur utilisation commence à être populaire. Cependant, ils sont actuellement chers comparés aux autres adjuvants [51], la plupart des agents colloïdaux sont composés d'éther de cellulose ou de polymères de type acrylique qui sont soluble dans l'eau.

Ils peuvent être sous forme de poudre ou de liquide, les dosages sont exprimés en fonction de la quantité de ciment ou d'eau dans le mélange de béton [47].

Leur mode d'action est fonction du type et de la concentration des polymères, K.Khayat [32] rapporte que pour les dérivés de cellulose et les welan gum le mode d'action peut être divisé en trois catégories :

- a- **Adsorption** : les longues chaînes de polymères adhèrent aux molécules d'eau. Ceci piège une partie de l'eau et augmente sa viscosité.
- b- **Association** : les molécules de polymères adjacentes peuvent développer des forces d'attraction qui provoquent la formation d'un gel et conséquemment une augmentation de la viscosité.
- c- **Entrelacement** : Les chaînes de polymères peuvent s'entrelacer et s'emmêler spécialement dans des mélanges à forte concentration d'agent de viscosité et où le taux de cisaillement est faible. Cet entrelacement augmente la viscosité apparente.

Cependant, à des taux de cisaillement élevé, les chaînes de polymères peuvent s'aligner ce qui affecte le comportement en cisaillement du matériau.

2.4.6 Effet des adjuvants sur la maniabilité et la résistance du BAN

- Effet sur la maniabilité

D'après M.Sonebi [51], se réfère à (JSCE, 1991) [Japan Society of Civil Engineers] l'utilisation d'un agent de viscosité au BAN est fréquemment combinée avec celle d'un super plastifiant, ce qu'il peut paraître paradoxal, puisque d'un côté on augmente la viscosité plastique et le seuil de cisaillement, et de l'autre côté on cherche à fluidifier le mélange avec un super plastifiant [49].

L'effet des superplastifiants sur la maniabilité des BAN est évident, ils requièrent habituellement une quantité peut varier entre 3 l/m³ à près de 20 l/m³ pour les mélanges de béton dont la courbe granulométrique est médiocre.

Le tableau 2.3 montre leur influence sur la maniabilité du béton. Cependant, l'utilisation importante de super plastifiant pour les BAN n'est pas la seule explication de leur grande maniabilité. En effet, à concentration très élevée de super plastifiant, différents problèmes surviennent comme un retard excessif de la prise du béton, de la ségrégation, du ressuage et un réseau de bulles d'air instable [47].

Tab. 2.3 - Comparaison des effets sur la maniabilité des plastifiants et super plastifiants. [47]

Type	Dosage typique (%ciment)	Augmentation typique de l'aff. (mm)	Réduction d'eau typique (%)	Variation typique de E/C
Plastifiants	0.1	50-75	5-10	-0.05
Superplastifiants	0.2-0.5	125-150	20-30	-0.15

Par contre les agents colloïdaux affectent grandement la fluidité des bétons en les rendant plus collants et visqueux. L'intérêt principal de leur utilisation apparaît sur la figure 2.16 qui représente les propriétés de béton ayant le même squelette granulaire, mais dont la teneur en superplastifiant a été ajustée pour chaque dosage en agent colloïdal afin d'avoir la plus grande hauteur de remplissage au test du «U».

On voit très bien que, pour un jeu de constituants donné, on améliore les propriétés du béton frais en combinant agent colloïdal et superplastifiant à des dosages respectifs de 0.6 et 1.4 % [49].

De plus, les agents colloïdaux augmentent la stabilité des mélanges et évitent l'apparition d'eau de ressuage.

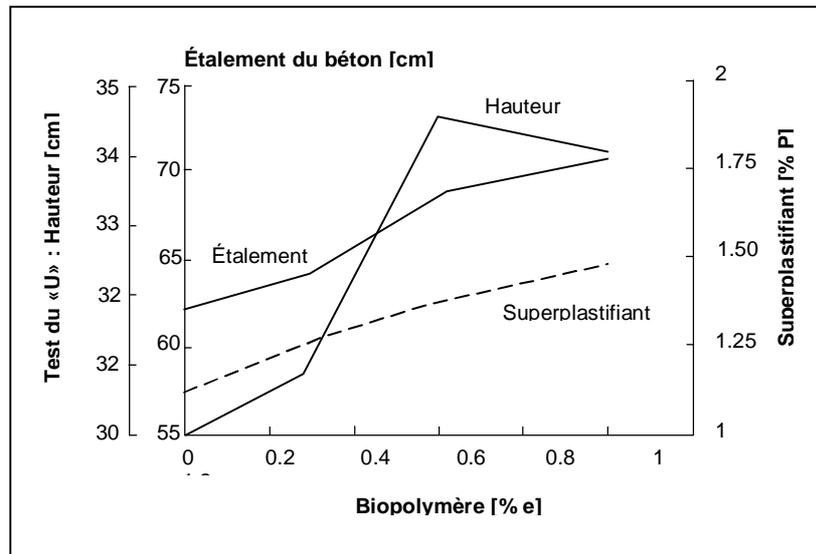


Fig. 2.16 - Propriétés du béton optimisé pour différentes teneurs en agent de viscosité. [49]

-- Effet sur la résistance

L'utilisation de super plastifiant permet de s'abaisser la teneur en eau de 10 à 30% [33] ce qui provoque automatiquement l'augmentation des résistances.

Lorsqu'ils sont utilisés comme réducteurs d'eau, Y.Roussel [47] affirme que les super plastifiants ont un effet plus que bénéfique sur la résistance du béton et sa durabilité. Ceci s'explique facilement étant donné l'abaissement substantiel du rapport E/L que permet l'utilisation de super plastifiant. Il est bien connu que le rapport E/L a un lien direct avec la résistance mécanique du béton et sa durabilité.

Toute fois, dans les cas où le super plastifiant n'est pas utilisé comme réducteur d'eau, son effet reste bénéfique mais dans un ordre de grandeur moindre. Ceci s'explique par le fait qu'une meilleure dispersion des grains de ciments peut diminuer la porosité capillaire et ainsi augmenter la résistance [31].

En ce qui concerne les agents colloïdaux, à des rapports E/L de l'ordre de 0.40, ils ne semblent pas affecter la résistance à la compression. Cependant, pour de faibles rapports E/L, ils peuvent la diminuer légèrement [47].

K.Khayat a également montré aussi que les bétons contenant des agents colloïdaux ont des modules d'élasticité plus faibles de 0 à 20 % que ceux des bétons sans agents colloïdaux [32].

2.5 Bétons autonivelants renforcés de fibres

Il y a longtemps que l'on cherche à améliorer la résistance à la traction des bétons de ciment (ou des mortiers) en y incorporant des fibres résistantes ; les plaques de « fibrociment » sont un exemple bien connu de mortier de ciment comprimé et armé de fibres d'amiante qui ont une forte résistance à la traction [11].

En plus de la résistance à la traction ,diverses applications où l'utilisation des fibres sert principalement à contrôler la densité et la largeur de la fissuration du béton plastique, la fissuration de retrait par séchage ainsi qu'à augmenter la ténacité et accroître la résistance mécanique du béton [47].

Cependant , la mise en place des bétons ordinaires avec fibres, nécessite beaucoup de vibration pour assurer la bonne compacité de béton, ce qui entraîne des coûts plus élevés de main d'œuvres. De plus dans certains cas où la densité des armatures est grande, il est difficile d'assurer le bon remplissage des coffrages car les armatures interfèrent avec l'écoulement du béton. A cet effet, il paraît que l'utilisation des BAN avec fibres, est plus facile comparativement aux bétons ordinaires, car d'une part, la grande maniabilité des BAN assure la fabrication d'ouvrages dont la finition est toujours d'une qualité acceptable et d'autre part , la confection des BAN (avec fibres) pourrait faciliter largement la mise en place qui serait plus rapide et de baisser les couts de main d'œuvre nécessaire.

Nous rappelons que Le BAN renforcé de fibres est un matériau relativement jeune, et l'utilisation des fibres actuellement fait l'objet de pas mal de recherches ;que ce soit des fibres métalliques ou bien synthétiques ou les qualités indispensables qu'elles doivent présenter sont les suivantes [11] :

- pouvoir adhérer parfaitement à la pate de ciment ;
- avoir une bonne résistance à la traction ;
- ne pas risquer d'être attaquées par le milieu basique du ciment ;
- ne pas se dégrader dans le temps et conserver leurs qualités propres ;
- ne présenter aucun danger pour la main d'œuvre qui les manipules ;
- ne pas avoir d'incidence excessive sur le coût de béton.

2.5.1 Les fibres de polypropylène [11]

Les fibres se présentent le plus souvent en faisceaux qui, une fois dans le malaxeur se séparent et se répartissent dans la masse du béton. Leurs longueurs les plus courantes varient de 10 à 50mm pour des diamètres compris entre 15 et 250 microns.

Les fibres polypropylènes améliorent la résistance aux chocs, à l'écaillage et limitent les risques de fissuration dus au retrait dans les premiers âges du béton. Par ailleurs leur ajout ne diminue pas la maniabilité du béton mais au contraire aurait tendance à l'améliorer.

Le type de fibres à utiliser dépend essentiellement de la dimension des granulats, les fibres les plus courtes étant choisies pour des micros- bétons, les plus longues pour ceux dont le « D » est important. Les quantités à mettre en œuvre sont de l'ordre de 0.5 Kg jusqu'à un maximum de 2 Kg par m³ de béton, soit entre 0.05 et 0.2% en volume. Dans la majorité des cas les dosages habituels sont de 600 g/m³ ou 900g/m³ et très rarement 1200 g/m³.

2.5.2 Les fibres métalliques en acier [11]

En fils d'acier étirés et coupés, elles peuvent être de section circulaire ou carrée, souvent ondulées sur toute leur longueur, ou torsadée ou seulement crantées à leurs extrémités pour améliorer leurs qualités d'adhérence. Les plus courantes ont des longueurs de 30 à 60 mm avec des diamètres de 0.4 à 1 mm ; quelquefois elles sont traitées contre la corrosion ou sont en acier inoxydable. certaines d'entre elles, en acier doux écroui, d'une longueur de 25 à 60mm , sont encollées par paquets de 10 à 30, leur dispersion dans le malaxeur s'opérant aisément et rapidement en évitant la formation d'oursins (ou boules de fibres), due au fait que les fibres ont naturellement tendance à s'agglomérer pendant le malaxage par suite des frottements réciproques, d'où la nécessité de prendre des précautions pour bien les répartir dans toute la masse du béton en évitant de les déverser d'un seul coup.

Les principaux avantages obtenus sont : une amélioration des résistances à la traction et à la flexion, une augmentation de la ductilité donc une bonne tenue aux chocs ainsi qu'à l'usure.

La quantité de fibres à incorporer doit faire l'objet d'une étude, mais si théoriquement elle est comprise entre 0.3 et 2% en volume, soit approximativement entre 30 et 160kg/m³, les dosages courants sont de l'ordre de 30 kg, éventuellement 50kg/m³.



Phot. 2.7 - Différentes types de fibres. [6]

2.5.3 Effet des fibres sur la maniabilité et la résistance du BAN

- Effet sur la maniabilité

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

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

Y .Roussel [47] a montré que l'apport en fibres diminue la précision de l'indice d'ouvrabilité qu'apporte l'essai d'étalement, et la maniabilité semble devenir moins bonne lorsque le volume de fibres dépasse le 1% du volume de mélange.

D'autres chercheurs ont montré que l'association des fibres synthétiques et des fibres métalliques peut donner aux BAN des comportements plus ductiles que dans le cas des bétons fibrés seulement avec des fibres métalliques [42].

Hocine Ouceif et coll.[42] ont montré aussi, que pour une même composition de béton, une teneur de 0.5% de fibres courtes (métalliques) a la même efficacité que l'utilisation de plus de 1% de fibres plus longues (synthétiques). Ils ajoutent également, que pour un BAN bi fibré de différentes dimensions et propriétés (fibres métalliques de fonte

amorphe adhérente de 20mm et 30mm, et fibres synthétiques glissantes de 40mm et 50mm), ils ont pu formuler des BAN répondants aux critères rhéologique fixés.

-- Effet sur la résistance

Les fibres ont habituellement un faible effet sur la résistance à la compression. Leur effet le plus significatif a trait au comportement en flexion (traction), ainsi dans plusieurs applications, les bétons renforcés de fibres sont utilisés dans des endroits où ils sont soumis à de tels efforts [47].

Les fibres métalliques utilisées essentiellement en dallages industriels, dallages de parking, les pistes, les pieux, les déversoirs de barrage, les silos [11], présentent une bonne résistance à la traction et à la flexion, une augmentation de la ductilité et une réduction du nombre de joints de retrait [6].

Egalement, les fibres polypropylènes n'assurent pas un renforcement structural du béton, elles s'opposent aux effets du retrait plastique et peuvent se substituer pour cette fonction au treillis antifissuration [50].

2.6 Bétons autonivelants à base de résines

A notre connaissance, aucune étude n'a fait l'objet d'utilisation des résines dans la confection des BAN. Cependant, pour les bétons ordinaires leur utilisation est très répandue en formant des bétons à base de résines, ces bétons qui présentent d'après G.Dreux et J.Festa [11] en général des modules d'élasticité deux fois plus faibles que ceux des bétons de ciment et dont la valeur avoisine 17500 MPa, quant au fluage, il est de même ordre lorsque la température ne dépasse pas 20 °C mais il est très influencé par les températures plus élevées. Parmi ces bétons on trouve les bétons et mortiers au latex.

2.6.1 Les résines [11]

Ce sont des produits synthétiques qui présentent, entre autres propriétés, une remarquable adhésivité. Par ailleurs, en présence d'un catalyseur, elles durcissent plus ou moins rapidement par polymérisation (association de molécules identiques engendrant la formation de molécules plus grosse). On peut donc penser les employer comme « liant » pour la confection de certains bétons. Parmi les résines qui sont le mieux adaptées à ce rôle, on distingue :

❖ *les résines poly stères*

Provenant de l'industrie charbonnière et dont la polymérisation est déclenchée par addition d'un catalyseur en très faible quantité (rarement plus de 1%) ; leur vitesse de durcissement est très influencée par la température.

❖ *les résines époxydes*

Issues de la chimie du pétrole ; leur polymérisation s'effectue par addition d'un « durcisseur » (une partie pour une à quatre parties de résine). Le dosage du mélange et l'homogénéisation sont donc plus faciles que pour les polyesters. Le choix et le dosage judicieux du catalyseur ou du durcisseur permettent, en général, de provoquer la prise au bout de 2 à 3 heures.

2.6.2 Bétons et mortiers au latex

Le latex est une émulsion aqueuse de caoutchou synthétique obtenue par polymérisation. Il remplace l'eau dans les bétons ou mortiers modifiés au latex employés comme matériau de réparation dans les projets de réhabilitation ou comme chape. En raison de son prix élevé, le latex n'est pas utilisé dans les bétons pour dalles. Les bétons ou bien les mortiers au latex sont fréquemment utilisés pour réparer des défauts de surface des murs, des trottoirs, des dalles, etc. Ils sont reconnus pour leur très grande durabilité [19].

Les latex sont généralement utilisés à des dosages inférieurs à 20%(solides /à la masse de ciment), ou bien un mélange d'eau et de latex(50% d'eau et 50% latex). Les mortiers au latex peuvent être mis en place en couches de 12 à 50mm d'épaisseur (horizontalement ou verticalement) [19].

2.6.3 Effet du latex sur la maniabilité et la résistance des bétons

Sans doute, les béton à bases de résines peuvent présenter plus grande cohésion ; meilleure maniabilité ; facilité d'application ; meilleure adhérence au vieux béton ; perméabilité très faible [19]. Comme ils peuvent présenter des résistances élevées en particulier en traction et elles sont atteintes en quelques jours, [19] [11] (voir le tableau2.4).

Tab. 2.4 - Résistances mécaniques des bétons de résines. [11]

	Type de résine	
	polysters	époxyde
Résistance en comp	75 à 85 MPa	80 à 120 MPa
Résistance en traction	10 MPa	12 à 17 MPa

2.7 Formulation des bétons autonivelants

2.7.1 Formuler un béton autonivelant

Formuler un béton, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants, le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, c'est-à-dire l'affaissement au cône d'Abrams [54]. Tandis que les différentes propriétés des BAN (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, etc....) rendent leur formulation relativement compliquée [10].

Même si de nombreuses études ont été effectuées, pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieu confiné, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton autonivelant à partir de données de base sur les matériaux et un cahier de charges précis [49].

2.7.2 Pratique actuelle de la formulation des BAN

La plupart des formules de BAN sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années [54].

Avec le temps et le retour d'expérience, la formulation se fait par tâtonnement sur la base de certaines plages dessinées pour chaque constituant facilitant un peu le travail du formulateur. Ces plages seront présentées selon P.Turcry [54] comme suit :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport massique gravillons/sable proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par les normes de formulation des bétons, soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

2.7.3 Exemples des méthodes de formulations des BAN

Dans la littérature, différentes formulations sont rapportées, essayons de présenter en résumé quelques unes, d'après une étude a été faite par [A.Daoud][10].

A-Méthode Japonaise

Méthode proposée par Okamura et coll. et Ouch et coll. le principe de cette méthode est le suivant :

- La teneur volumique en gravillons du béton est fixée à 50% du volume de solide ;
- Le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier ;
- L'optimisation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%.
- L'eau, le super plastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante et une fluidité importante.

Les auteurs définissent deux grandeurs : étalement relatif et vitesse relative d'écoulement.

La fluidité du mortier est donnée par : $\Gamma_m = (r_1 r_2 - r_0^2) / r_0^2$

Avec r_1 et r_2 les diamètres d'étalement selon deux médianes

La viscosité du mortier est donnée aussi par : $R_m = 10 / t$

Avec t le temps d'écoulement à l'entonnoir exprimé en seconde.

Pour obtenir un BAN acceptable, il faut avoir simultanément :

$$\Gamma_m = 5 \quad \text{et} \quad R_m = 1 \text{s}^{-1}$$

Cette méthode est généralement simple, mais une attention particulière doit être faite aux risques de blocages.

B- Méthode Suédoise

Cette méthode est proposée par [Peterson et coll,1996](#), basée sur l'étude effectuée par [Tangtermsirikul et coll.](#) à l'aide de l'équation de risque de blocage suivante :

$$R_b = (1 - V_p) \sum Y_i / V_{cri,i}$$

Avec :

Y_i : proportion volumique de grains de taille i rapporté au volume de granulat ;

V_p : proportion volumique de la pâte dans le béton ;

$V_{cri,i}$: fraction en grain de taille i induisant un blocage .

Où ils estiment pour un confinement donné et pour chaque rapport G/S, le volume de la pâte critique pour le blocage. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le super plastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée . Pour éviter le blocage en écrivant $R_b=1$ (en fait, le risque de blocage a lieu si R_b est inférieur ou égal à 1).

C- Méthode Française

Cette méthode est proposée par [De Larrad et coll,1994](#), basée sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- les distributions granulaires ;
- les proportions du mélange ;
- la compacité propre ;
- la densité apparente.

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est le suivant :

- la proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment et 30% d'addition par exemple) ;
- le dosage à saturation du super plastifiant est déterminé. Selon l'expérience du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), la moitié de ce dosage serait plus pertinente ;

- Le besoin en eau de ce mélange est déterminé ;
- Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement.

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.10^4 . la teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autonivelant est donc proposée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autonivelant sont atteintes.

2.8 Bilan

Les BAN, nouvelle innovation technologique dans le domaine des matériaux de construction. Ce sont des bétons très fluides, se mettent en œuvre sous le seul effet de la gravité, sans apport de vibration.

La formulation des BAN, doit renfermer une forte teneur en pâte au détriment de celle des gravillons, comme il est nécessaire de substituer une fraction de ciment par une addition minérale et un superplastifiant en proportions bien précises.

Malgré que les BAN possèdent des bonnes résistances mécaniques et bonne durabilité, plusieurs paramètres peuvent avoir une influence significative sur leurs performance rhéologiques et mécaniques, notamment : forme, granulométrie et volume de gravier, rapport massique E/L, rapport volumique S/Pt, nature et dosage d'additions minérales, et finalement la concentration en superplastifiant et en agent colloïdal.

La mise au point d'une formule de BAN, est beaucoup plus complexe, parce que d'une part, il n'existe pas à l'heure une méthode de formulation généralisée, et la plus part des formules sont conçues actuellement de manière empirique [54], et d'autre part, le cahier des charges d'un BAN, comporte plus de clauses en particulièrement à l'état frais.

A cet effet l'AFGC, a émis des recommandations qui se limitent en trois essais : mesure d'étalement ; essai de la boîte en « L » ; et l'essai de stabilité au tamis [1].

CHAPITRE 3

NORMES, MATERIAUX, MELANGES ET ESSAIS UTILISES

3.1 Introduction

La connaissance des divers propriétés : physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques des matériaux, est une exigence primordiale dans toute opération de construction ou de réparation, dont le but tout d’abord l’emploi judicieux de ces matériaux, ensuite pour faire un choix répondant à leur destination, et en fin pour que ces matériaux soient malaxés d’une façon correcte afin de produire un mélange homogène à grande échelle et possédant par conséquent des propriétés uniformes.

A cet effet, essayons dans ce chapitre de présenter les normes, les caractéristiques des différents matériaux utilisés, les procédures de malaxage pour confectionner nos mélanges, bétons et mortiers ainsi que les différents essais expérimentaux pour les caractériser à l’état frais et à l’état durci.

3.2 Normes

A--Préparation des matériaux

- *Analyse granulométrique*: EN 933-1
- *Equivalent de sable* : NFP 18-597
- *Essai Los Angeles* : NFP 18-573
- *Eau de gâchage* : EN 1008
- *Confection des bétons* : EN 12390-2
- *Confection des mortiers* : EN 196-1

B-- Normes utilisées à l’état frais

A l’état frais, nous nous sommes basés dans notre étude sur les essais recommandés par l’AFGC, essais non normalisés, maintenant devenus sur site les essais de référence pour valider une formule de BAN [54].

C-- Normes utilisées à l’état durci

- *Essai de compression* : NFP 18-406.
- *Essai de traction par flexion* : NFP 18-407.
- *Mesure de retrait* : NFP 15 -433.
- *Module élastique* : Essai non normalisé.

➤ *Calcul d'adhérence :*

- a. sur des éprouvettes cylindriques (essai de traction par fendage) NFP 18-408.
- b. sur des prismes, nous avons utilisé une méthode inspirée de la norme CRD C 85.

3.3 Matériaux utilisés

3.3.1 Matériaux de base

A- Sable

Dans tous les mélanges de notre étude, nous avons utilisé un sable local prélevé d'Oued jedi situé à 35 Km de la ville de Biskra, il s'agit d'un sable siliceux de classe granulaire (0/5 mm) et utilisé couramment dans la confection du béton dans cette région.

Sa courbe granulométrique représentée dans la figure (3.1) est comprise dans le fuseau de contrôle pour le sable à béton selon la norme (EN933-2), ses caractéristiques physiques sont représentées dans le tableau (3.1).

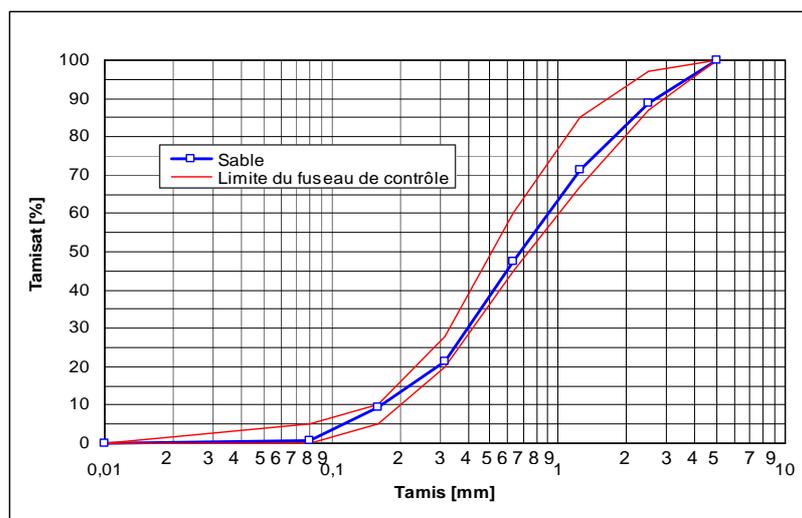


Fig. 3.1 - Courbe granulométrique du sable utilisé.

Tab. 3.1- Caractéristiques physiques du sable employé.

Caractéristiques physiques	Valeurs
Densité apparente	1.68
Densité absolue	2.54
Module de finesse	2.04
Equivalent de sable (ESV)	77
Equivalent de sable (piston)	72

B- Gravier

Pour assurer une bonne maniabilité (fluidité) à notre béton, nous avons choisi, à l'instar de ce qu'il est indiqué dans la partie bibliographique, l'utilisation d'un seul type de gravier, il s'agit de gravier de type (7/15). Gravier concassé, de nature calcaire, disponible dans le marché algérien, provenant pour notre région du gisement de Ain-Touta situé à 80km au nord de Biskra.

Afin d'obtenir une bonne adhérence entre la pâte du liant et les graviers, nous avons procédé à leur lavage et qui, une fois séchés, ont été conservés dans des sacs bien fermés. L'analyse granulométrique et les caractéristiques physiques de ces gravillons sont représentées dans la figure (3.2) et le tableau (3.2) respectivement.

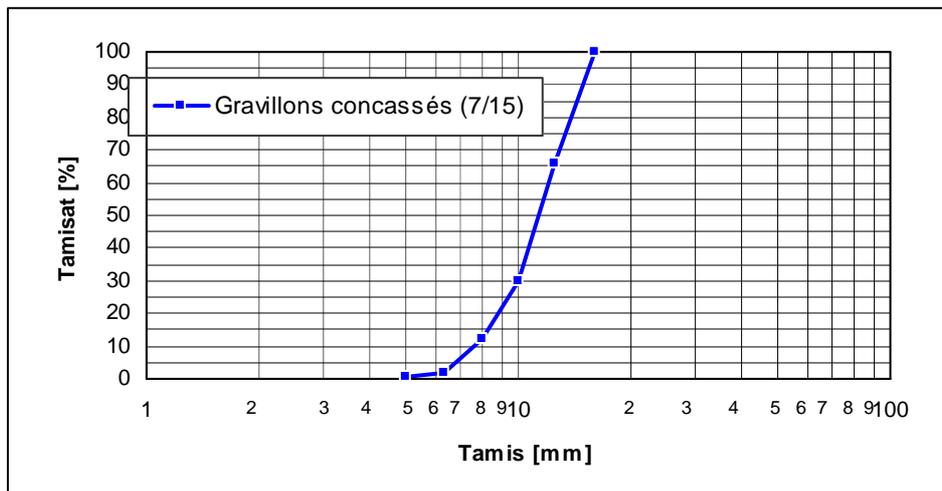


Fig. 3.2 - Courbe granulométrique du gravier utilisé.

Tab. 3.2 - Caractéristiques physiques du gravier employé (7/15).

Caractéristiques physiques	Valeurs
Densité apparente	1.39
Densité absolue	2.62
Coeff. Los. Angeles [%]	23

C - Ciment

Pour tous les mélanges on a utilisé un seul type de ciment (CPJ-CEM II/42.5A) provenant d'une unique livraison de la cimenterie (SCIMAT) à Ain-Touta. Ainsi, la qualité de ce ciment constitue une constante au niveau des paramètres d'étude.

Ses analyses physiques, chimiques et minéralogiques communiquées par le producteur sont représentées respectivement dans les tableaux (3.3), (3.4) et (3.5).

Tab. 3.3 - Caractéristiques physiques du ciment employé.

Caractéristiques physiques	Valeurs
Densité absolue	3.15
Densité apparente	1.09
Surface spécifique Blaine [cm ² /g]	3371
Consistance normale [% H ₂ O]	25.6
Début de prise [min]	123
Fin de prise [min]	180
Expansion à Chaud [mm]	1.80
Refus au tamis 45 µm [%]	17.40

Tab. 3.4 - Caractéristiques chimiques du ciment employé.

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P.A.F	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Résidu insoluble
Teneur (%)	61.69	20.34	5.37	5.03	3.00	2.20	1.80	1.12

Tab. 3.5 - Composition minéralogique du ciment.

Eléments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneur (%)	58.3	14.6	8.7	11.26

D- Eau de gâchage

Il s'agit de l'eau du robinet de l'Université de Biskra, nous supposons qu'elle répond à toutes les prescriptions de la norme (EN 1008) en matière de béton.

3.3.2 Les additions minérales

Dans notre étude, nous avons utilisé trois types d'additions minérales, présentées ci-dessous. Rappelons, simplement à titre d'indicatif que les informations techniques relatives à ces types d'utilisation ainsi que l'expérience pratique demeurent assez limitées.

A-- Fillers calcaires

Il s'agit de roches calcaires broyées, disponibles dans la majorité des carrières de Biskra. Ils possèdent selon le fournisseur les caractéristiques physiques suivantes ; (densité absolue = 2.50, densité apparente = 1.09 et surface spécifique = 3070 cm²/g).



Phot. 3.1- Fillers calcaires utilisés dans notre étude.

B-- Laitier de haut fourneau

C'est un produit granulé et broyé, qui provient du complexe sidérurgique d'El-Hadjar - Annaba- dans l'Est Algérien.

Ses caractéristiques physiques et sa composition chimique sont représentées respectivement dans les tableaux (2.5) et (2.6):

Tab. 3.6 - Caractéristiques physiques du laitier employé.

Caractéristiques physiques	Valeurs
Densité absolue	2.73
Densité apparente	1.08
Surface spécifique	3000 cm ² /g.

Tab. 3.7 - La composition chimique du laitier employé.

Élément	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	S	Fe ₂ O ₃
Proportion [%]	40.8	43.0	6.4	5.2	3.0	0.8	0.5

**Phot.3.2- Laitier de haut fourneau utilisé dans notre étude**

C-- Fumée de silice

Il s'agit d'une fumée de silice, désignée par le nom «MEDAPLAST HP», à base de micro silice provenant de la société «GRANITEX» sous forme de poudre grise. Ces caractéristiques physiques sont représentées dans le tableau (3.7) :

Tab. 3.8 - Caractéristiques physiques de la fumée de silice employée.

Caractéristiques physiques	Valeurs
Densité absolue	1.87
Densité apparente	0.5
Surface spécifique	20470 cm ² /g



Phot.3.3- Fumée de silice utilisée dans notre étude.

3.3.3. Adjuvants chimiques

Nous avons utilisé deux types d'adjuvants, présentés ci-dessous, produisant par la même société «GRANITEX», et pour des raisons de confidentialité, le producteur ne fournit pas la composition chimique de ces adjuvants.

A-- Super plastifiant

Il se présente sous forme de liquide jaunâtre et est conçu à base de poly carboxylates, appelé «MEDAFLOW 30». Sa densité absolue est de 1.07 et sa concentration en particule solide est de 30 %. Le contenant de super plastifiant a été agité avant chaque utilisation afin de bien homogénéiser la solution.



Phot.3.4- Superplastifiant utilisé dans notre étude.

B-- Agent colloïdal

Il se présente sous forme de poudre blanche soluble dans l'eau et est destiné normalement à la confection de bétons et mortiers coulés sous l'eau, désigné par le nom «MEDACOL BSE» et possède une densité absolue de 0.5.



Phot.3.5- Agent colloïdal utilisé dans notre étude.

3.3.4. Les fibres polypropylènes

Il s'agit des fibres de polypropylène (synthétiques) produisant de « RESIKLON/FRANCE », ce sont des fibres blanches, emballées dans des sacs de 600 g (68 millions de fibres de 12 mm par sac), elles se dispersent très facilement dans les bétons et mortiers, et créent (selon le producteur) un réseau fibré de haute densité et qui a pour conséquence :

- l'amélioration de la cohésion à l'état frais ;
- la limitation du faïençage et des fissurations dues au retrait plastique ;
- l'augmentation de la résistance aux chocs ;
- une meilleure imperméabilité à l'état durci ;
- une réduction des risques de ségrégation et de ressuage.

Les principales caractéristiques fournis par le fabriquant sont :

Longueur : 12mm - Densité : 0,9Kg/m³.

Les fibres seront ajoutées à un dosage de 600g/ m³, directement dans le malaxeur sur le béton déjà mélangé, ensuite on malaxe à nouveau (1à 2 minutes), pour obtenir une bonne répartition de ces fibres.



Phot. 3.6- Fibres polypropylènes utilisées dans notre étude.

3.3.5 La résine

Il s'agit d'une dispersion aqueuse qui se présente sous la forme d'un liquide blanchâtre. Produit par la même société « GRANITEX », appelé « MEDALATEX ». On l'utilise avec de l'eau de gâchage. Elle est compatible avec tous les types de ciment.



Phot. 3.7- Résine (latex) utilisée dans notre étude.

3.4 Confection des mélanges

Avant de présenter le mode opératoire, de chaque mélange (béton ou mortier), nous rappelons que nous sommes passés dans notre étude par les étapes suivantes :

1. l'optimisation et la formulation de notre BAN.
2. l'introduction des ajouts minéraux (fillers calcaires, laitier, et fumée de silice) où nous avons étudié l'effet de ces ajouts sur la maniabilité et la résistance de notre BAN.
3. l'incorporation des fibres polypropylènes et l'étude de ses effets sur la maniabilité et la résistance aussi.
4. l'utilisation de la résine et l'évaluation aussi de son effet sur la maniabilité et la résistance.
5. l'application de différents bétons à la réparation, où nous avons évalué l'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton.

3.4.1 Confection des bétons

Afin d'assurer un mélange homogène, dont la répartition de différents constituants de nos bétons est plus régulière, nous avons choisi d'effectuer nos travaux au laboratoire dans un malaxeur à cuve verticale tournante d'une capacité de 100l. La séquence d'introduction des différents matériaux est faite selon la norme (EN 12390-2), sauf dans le cas de l'ajout de l'agent colloïdal comme suit :

1. On verse d'abord le sable dans le malaxeur pour l'homogénéiser pendant environ 30 s.
2. On ajoute le liant (ciment seulement ou ciment et addition minérale) et on malaxe pendant 1 min.
3. On additionne les gravillons et on malaxe à sec durant 1 min.
4. On introduit ensuite les trois quarts de la quantité d'eau et l'agent colloïdal, s'il est utilisé, et on malaxe pendant 2 min.
5. On ajoute, au fur et à mesure, le reste de l'eau et le super plastifiant et on malaxe durant 2 min environ jusqu'à l'homogénéisation de l'ensemble.
6. On arrête enfin le malaxeur et on commence les essais à l'état frais immédiatement.

Remarque :

Dans le cas d'utilisation des fibres, comme nous avons indiqué précédemment, on les introduit dans le béton à la fin et ensuite on reprend le malaxage entre 1 et 2 minutes.

3.4.2 Confection des mortiers

Pour les mortiers, le malaxage a été effectué à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 5 l. la pale de malaxeur pouvant tourner à deux vitesses (lente et rapide). La séquence du malaxage est conforme à la norme (EN 196-1) sauf dans le cas de l'ajout de l'agent colloïdal. Cette introduction se fait comme suit :

1. On introduit l'eau et le super plastifiant en premier dans le malaxeur et on verse ensuite le ciment et l'agent colloïdal, s'il est utilisé.
2. Aussitôt après, on met le malaxeur en marche à vitesse lente.

3. Après 30 s de malaxage, on introduit régulièrement le sable normalisé pendant les 30 s suivantes.
4. On met alors le malaxeur à sa vitesse rapide et on continue le malaxage pendant 30s supplémentaires.
5. On arrête le malaxeur pendant 1 min et 30 s. Durant les 15 premières secondes, on enlève au moyen d'une raclette de caoutchouc le mélange adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
6. On reprend ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.
7. On arrête enfin le malaxeur et on commence les essais à l'état frais immédiatement.

3.5 Essais réalisés

Avant de passer, à l'état final de notre étude (l'utilisation des BAN dans les travaux de réparation), on a procédé à deux familles d'essais, pour formuler et caractériser nos mélanges. Il s'agit des essais à l'état frais pour évaluer la maniabilité, et des essais à l'état durci pour déterminer les performances mécaniques.

3.5.1 Essais réalisés à l'état frais

Dans notre étude, nous nous sommes basés sur les essais recommandés par l'[AFGC](#) seulement, [1] car ils sont devenus sur site comme nous avons présenté dans la section 2.3.1, les essais de références pour valider une formule de BAN.

Ces essais sont : mesure d'étalement, essai de la boîte en «L» et l'essai de stabilité au tamis.



Phot. 3.8- Essai d'étalement [40]



Phot. 3.9- Essai à la boîte en « L » [40]



Phot. 3.10- Essai de stabilité au tamis. [40]

3.5.2- Essais réalisés à l'état durci

Pour déterminer les performances mécaniques de nos mélanges, on a procédé aux différents essais détaillés ci-dessous :

A- Essai de compression

La caractérisation du comportement en compression est effectuée conformément à la norme (NFP 18-406), sur des éprouvettes cylindriques et cubiques de dimensions (16 x 32 cm²) et (10 x 10 x 10 cm³) respectivement, mûries à l'eau. Les résultats de la résistance à la compression f_{cj} obtenus à 14, 28 et 90 jours représentent la moyenne de trois échantillons. La machine utilisée pour l'écrasement uni axial des cylindres et des cubes est une presse hydraulique dont la capacité maximale est de 1500kN en compression.

L'expression des résultats sera donnée par la relation $f_{cj} = F/S$ (en MPa) où F est la charge maximale et S la surface de compression de l'éprouvette [11].



Phot. 3.11- Dispositif pour mesurer la résistance à la compression.

B- Essais de traction par flexion

Pour effectuer nos essais de traction par flexion, on a procédé à l'essai sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (10 x 10 x 40 cm³) mûries à l'eau, conformément à la norme (NFP 18-406). La résistance à la traction f_{t28} obtenue à 28 jours provient de la moyenne des résultats sur trois échantillons. L'appareil utilisé est une presse hydraulique de flexion dont la capacité maximale est de 150kN en cisaillement.

L'expression des résultats pour exprimer la contrainte de rupture en traction par flexion, sera donnée par la relation $f_t = 1.8F/axa$ (en MPa), où F est la charge de rupture, et a le coté de la base en mm [11].



Phot. 3.12- Dispositif pour mesurer la résistance à la traction par flexion.

C- Mesure du module élastique

On détermine le module élastique à 28 jours sur des éprouvettes cylindriques de (16 x 32 cm²) mûries à l'eau, et équipées d'extensomètre axial d'un seul capteur permettant de mesurer les déformations longitudinales de l'échantillon sous des chargements croissants jusqu'à une contrainte maximale égale à :

$$\sigma_c = 0.6f_c$$

A partir de l'équation $\sigma_c = E_c \varepsilon_c$, il est possible d'après [12] de tracer la courbe $\sigma_c = f(\varepsilon_c)$, pour σ_c variant entre 0 et $0.6f_c$.

Sur cette courbe on peut mesurer la pente de la tangente à l'origine (module tangent) et la pente de la droite passant par l'origine et le point de coordonnées ϵ_c et $0.6f_c$ (E module sécant), avec : $E = 0.6f_c / \epsilon_c$

Les résultats sont obtenus par la moyenne de deux essais.



Phot. 3.13- Dispositif pour mesurer le module élastique.

D- Mesure du retrait

Pour faciliter le travail expérimental, nous avons choisi d'effectuer l'étude de retrait sur des mortiers. Où nous avons utilisé des éprouvettes prismatiques de dimensions $(4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3)$, selon la norme (NFP 15 -433). Ces éprouvettes sont équipées de plots métalliques à chaque extrémité et placées verticalement dans le déformètre, qui permet le suivi de la variation de la longueur de l'échantillon.

Les mesures se font chaque trois jours après le démoulage et durant 28 jours.



Phot. 3.14- Dispositif pour mesurer le retrait.

3.6 Etude de l'adhérence entre ancien et nouveau béton

La question de la durabilité de l'adhérence des réparations en béton doit être abordée non seulement d'un point de vue purement scientifique, mais aussi d'un point de vue pratique, car les ouvrages à réparer sont bien réels. En ce sens, il est intéressant de considérer les conclusions des études sur les moyens de mise en œuvre pour réaliser une réparation durable (enlèvement du béton détérioré, nettoyage, matériau de réparation, etc...). L'obtention d'une bonne adhérence est la condition déterminante pour la tenue d'une réparation durable. De façon pragmatique, une bonne adhérence est celle qui assure un lien efficace, uniforme et durable entre le matériau de réparation et son support.

L'efficacité du lien réfère à sa capacité à unir les deux parties (nouveau et ancien béton) comme si elles n'étaient qu'une pièce monolithique [51].

3.6.1 Procédure de préparation et réparation des éprouvettes

Pour évaluer l'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton, nous avons choisi de travailler sur des simulations de réparations.

Il s'agit des éprouvettes prismatiques et cylindriques de dimensions (10 x 10 x 10 cm³) et (16 x 32 cm²) respectivement. Ces éprouvettes ont été fabriquées avec du béton ordinaire, et après 28 jours elles étaient soumises à l'essai de traction par flexion (pour les prismes), et traction par fendage (pour les cylindres), de façon à obtenir des demies éprouvettes, en y exposant les granulats de manière à avoir des surfaces plus rugueuses.

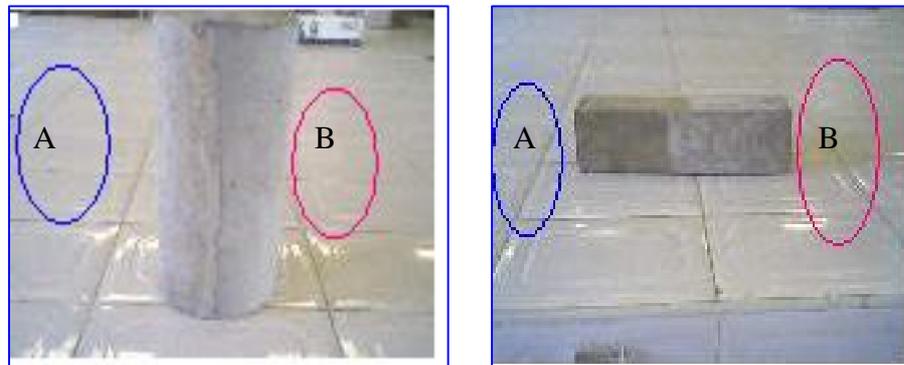


Phot. 3.15- Représentation d'une surface rugueuse.

A l'âge de trois (03) mois, ces demies éprouvettes ont été préparées pour recevoir les réparations avec du BAN, en les nettoyant avec un pinceau et au jet d'eau (tuyau branché au robinet avec pression), de façon à supprimer le plus possible les défauts et les particules lâches.

Avant l'application de la réparation, les surfaces rugueuses des demies éprouvettes (prismatiques et cylindriques), ont été humidifiées pendant 24h, pour obtenir la condition « Saturée Surface Sèche » dite SSS [35]. Ensuite, les demies éprouvettes, ont été placées dans les moules qui conviennent, et on déverse le béton de réparation (BAN), à l'exception d'une seule éprouvette où nous avons utilisé le BO pour la réparation comme témoin, afin d'avoir après démoulage des éprouvettes composites formées en deux parties collées à l'interface, la première partie forme le béton de base ou l'ancien béton (béton ordinaire), et la deuxième forme le béton de réparation ou le nouveau béton.

Enfin, ces éprouvettes ont été conservées dans l'eau, avant de les passer à l'âge de 28 jours dans la presse pour évaluer la résistance d'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton.



Phot. 3.16- Eprouvettes composites A : ancien béton, B : réparation.

3.6.2 Description de l'essai d'adhérence entre ancien et nouveau béton

Pour déterminer l'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton, nous avons procédé à deux méthodes :

La première méthode (essai d'adhérence en traction indirecte) :

Il s'agit de soumettre les éprouvettes composites prismatiques à l'essai de traction indirecte, cette méthode est inspirée de la norme CRD C85, la procédure consiste à appliquer une charge de compression parallèle au plan de l'interface de réparation entre le béton de base et le béton de réparation, voir la figure 3.3.

La contrainte d'adhérence dans cette méthode, est 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.

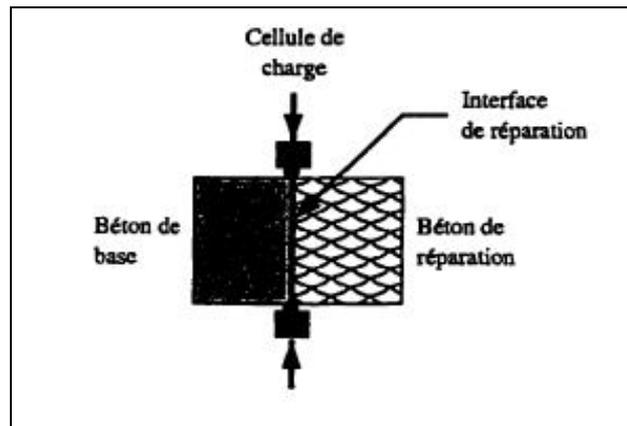


Fig. 3.3 - Schéma descriptif de l'essai en traction indirecte [47].

La deuxième méthode (essai d'adhérence en traction par fendage) :

Les éprouvettes cylindriques (composites) sont soumises à l'essai de traction par fendage pour évaluer la qualité de l'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton.

Avec cette méthode, la contrainte d'adhérence n'est que celle de la traction par fendage, qui sera calculée par la formule suivante : $f_i = 2P/\pi DL$,

Avec : P, c'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.

Enfin, nous avons essayé de faire la comparaison entre les deux méthodes.

3.7 Bilan

La qualité des matériaux utilisés dans notre recherche, est parmi les meilleurs matériaux dans le marché algérien, ce qui nous permet de considérer leurs caractéristiques comme suffisantes pour réaliser notre étude. Nous avons procédé à plusieurs essais, allant de la formulation de nos bétons autonivelants, et ses caractéristiques rhéologiques et mécaniques, jusqu'à leur application comme matériau de réparation, et la vérification de l'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton.

CHAPITRE 4

PRESENTATION, 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 destiner 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).

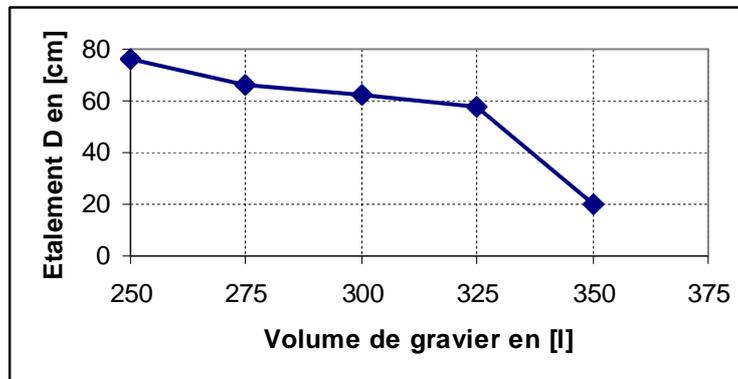


Fig.4.1 - Effet du volume de gravier sur la fluidité.

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.

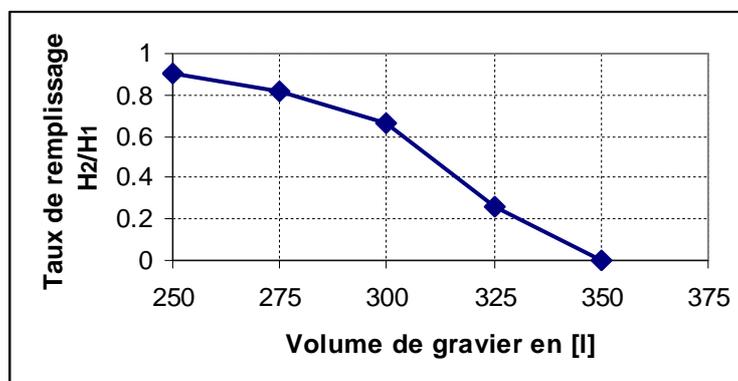


Fig.4.2 - Effet du volume de gravier sur la déformabilité

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.

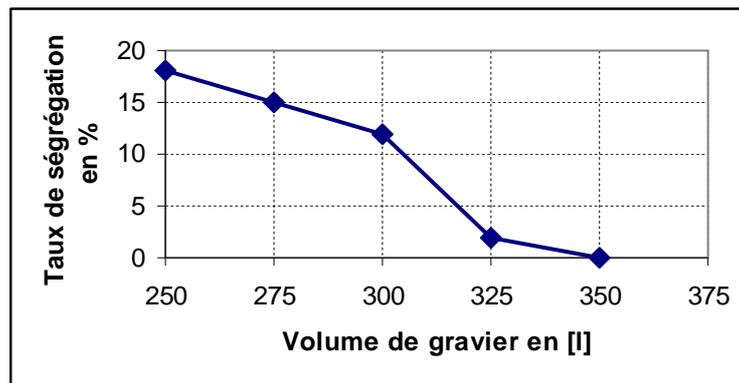


Fig.4.3 - Effet du volume de gravier sur la stabilité.

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.

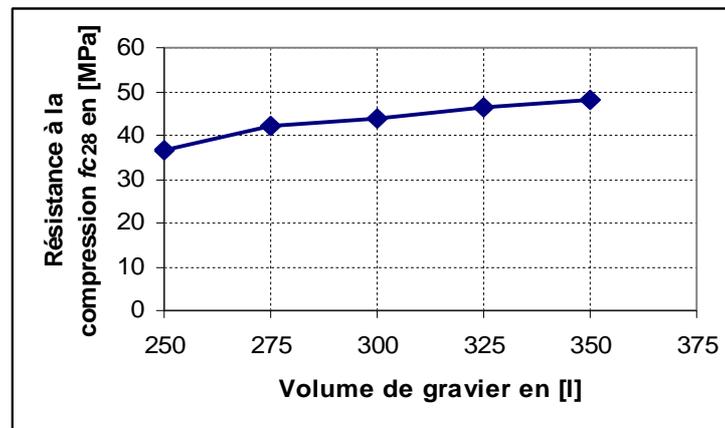


Fig.4.4 - Effet du volume de gravier sur la résistance à la compression.

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.

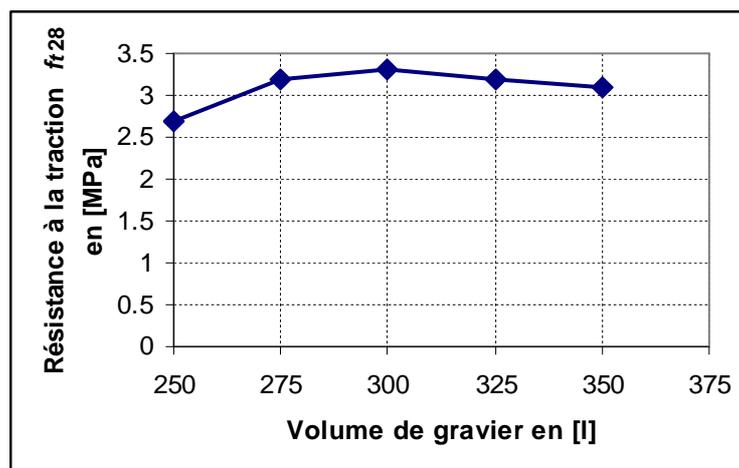


Fig.4.5 - Effet du volume de gravier sur la résistance à la traction.

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].

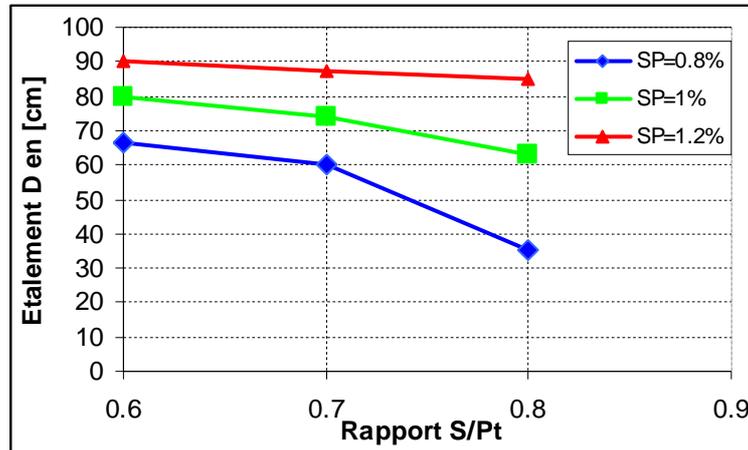


Fig. 4.6 - Effet du dosage en SP sur la fluidité.

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.

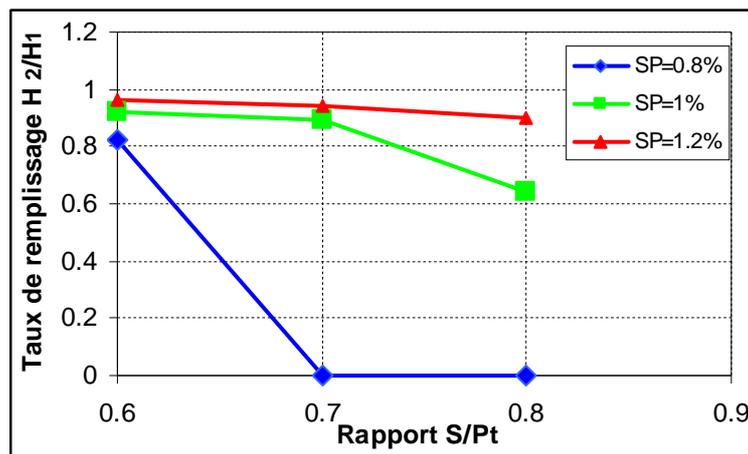


Fig. 4.7 - Effet du dosage en SP sur la déformabilité.

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%.

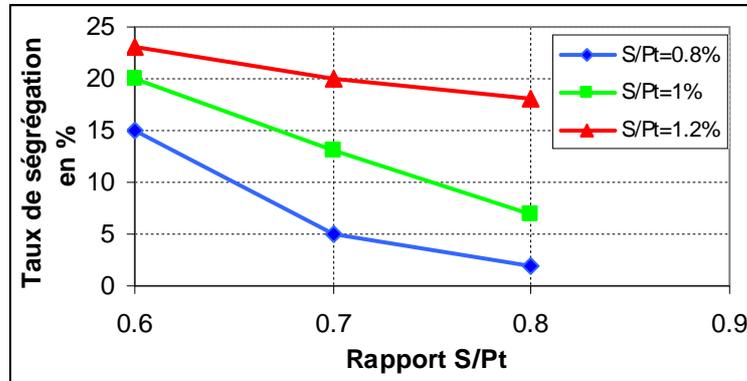


Fig. 4.8 - Effet du dosage en SP sur la stabilité.

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.

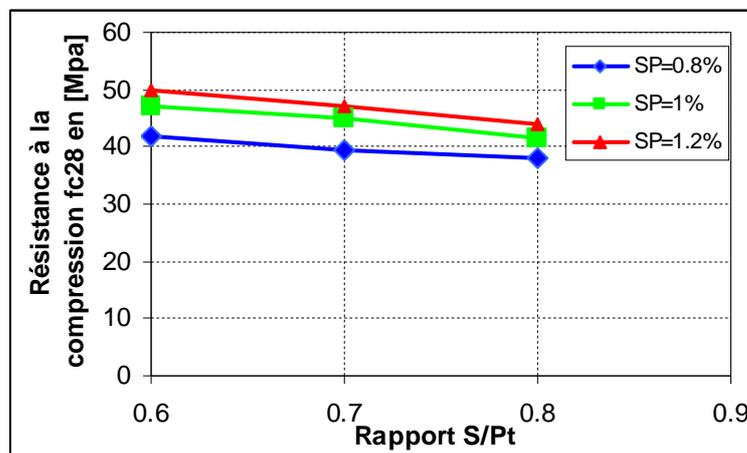
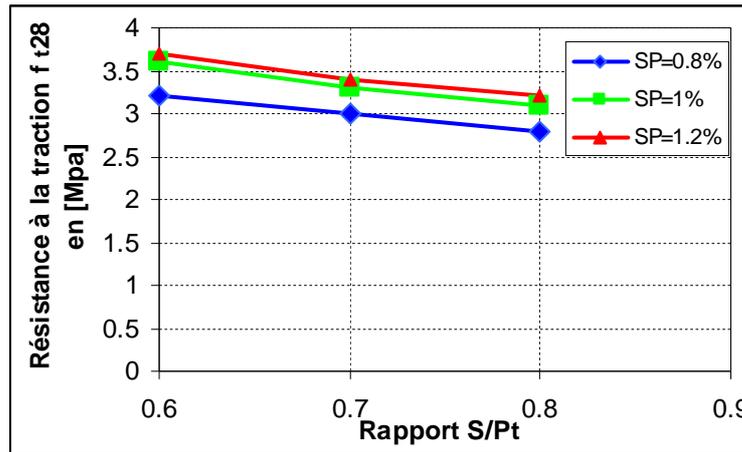


Fig. 4.9 Effet du dosage en SP sur la résistance à la compression f_{c28} .

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).

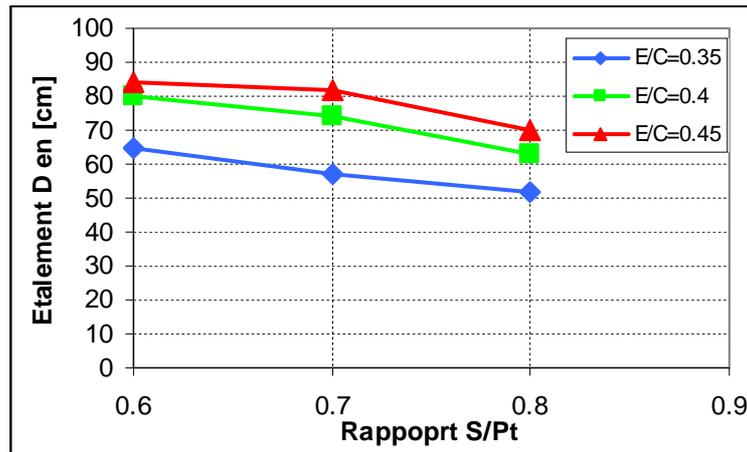


Fig. 4.11 - Effet des rapports S/Pt et E/C sur la fluidité.

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.

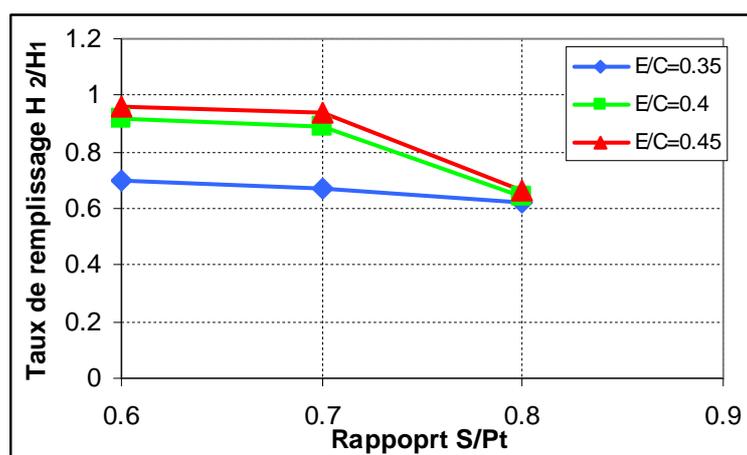


Fig. 4.12 - Effet des rapports S/Pt et E/C sur la déformabilité.

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.

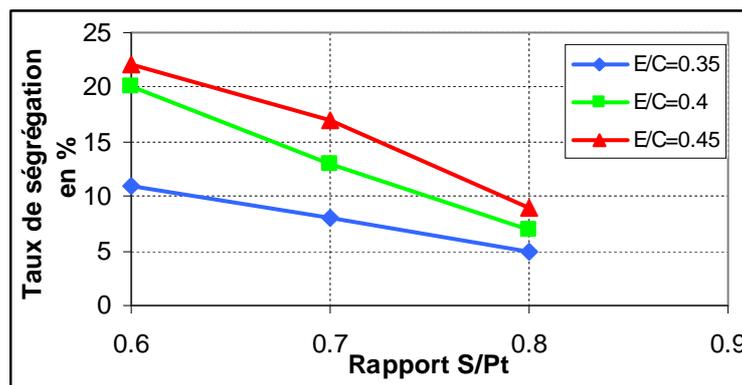


Fig. 4.13 - Effet des rapports S/Pt et E/C sur la stabilité.

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].

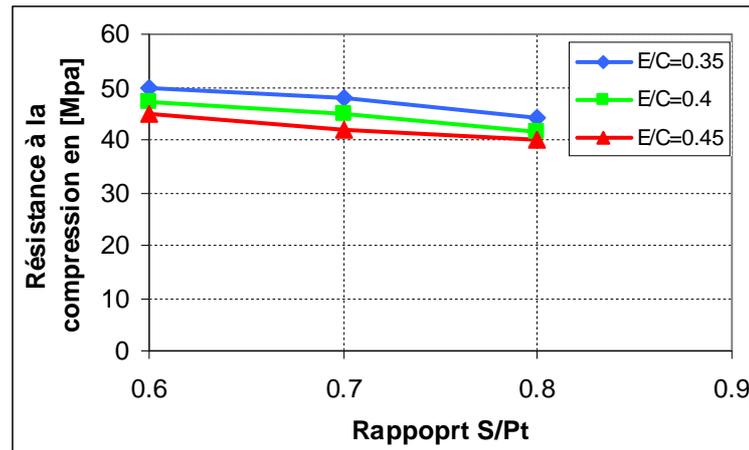


Fig. 4.14 - Effet des rapports S/Pt et E/C sur la résistance à la compression.

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.

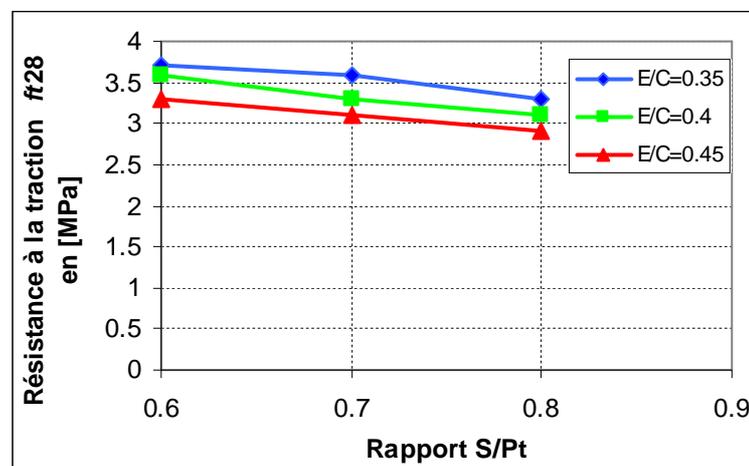


Fig. 4.15 - Effet des rapports S/Pt et E/C sur la résistance à la traction.

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%.

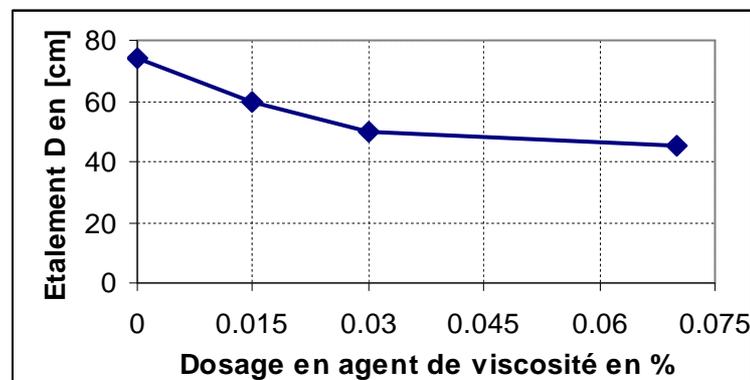


Fig. 4.16 - Effet du dosage en AC sur la fluidité.

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%.

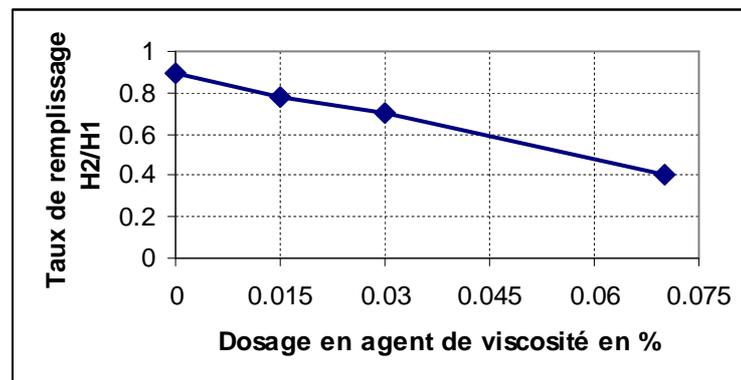


Fig. 4.17 - Effet du dosage en AC sur la déformabilité.

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%.

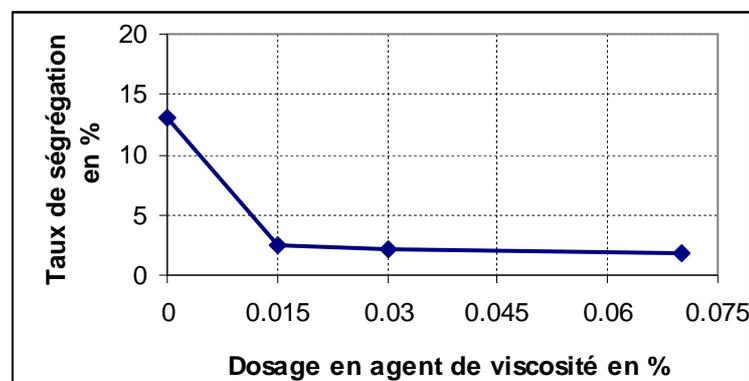


Fig. 4.18 - Effet du dosage en AC sur la stabilité.

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.

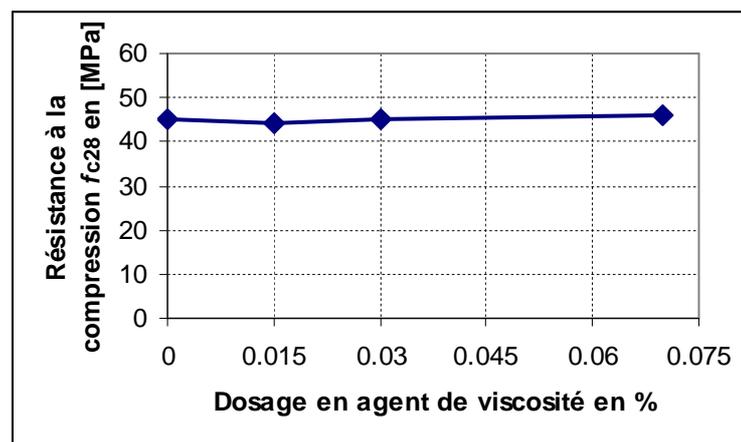


Fig. 4.19 - Effet du dosage en AC sur la résistance à la compression.

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).

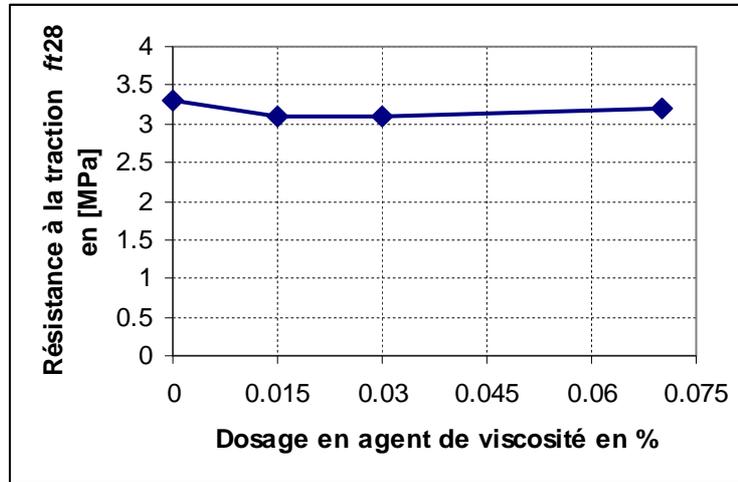


Fig. 4.20 - Effet du dosage en AC sur la résistance à la traction.

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].

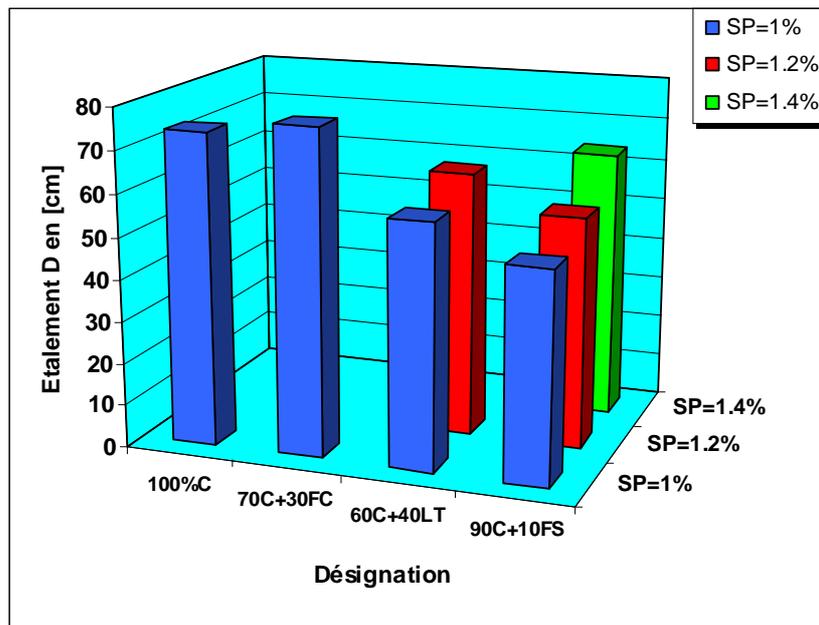


Fig. 4.21 - Effet des additions minérales sur la fluidité.

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.

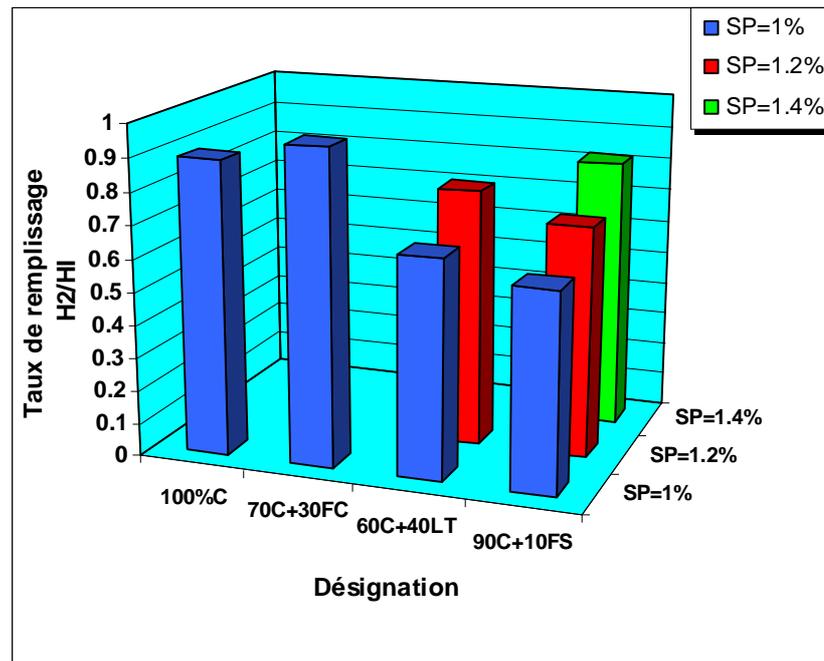


Fig. 4.22 - Effet des additions minérales sur la déformabilité.

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.

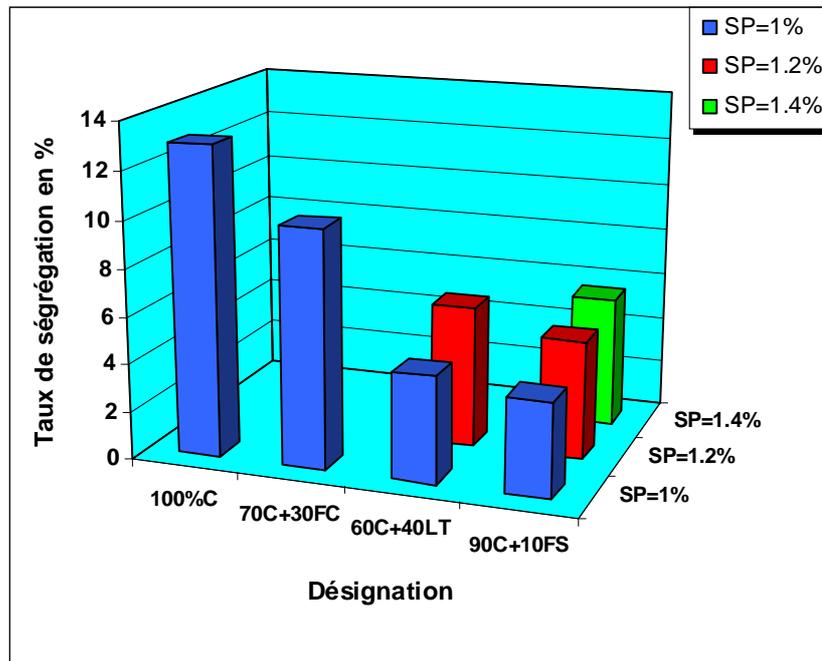


Fig. 4.23 - Effet des additions minérales sur la stabilité.

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).

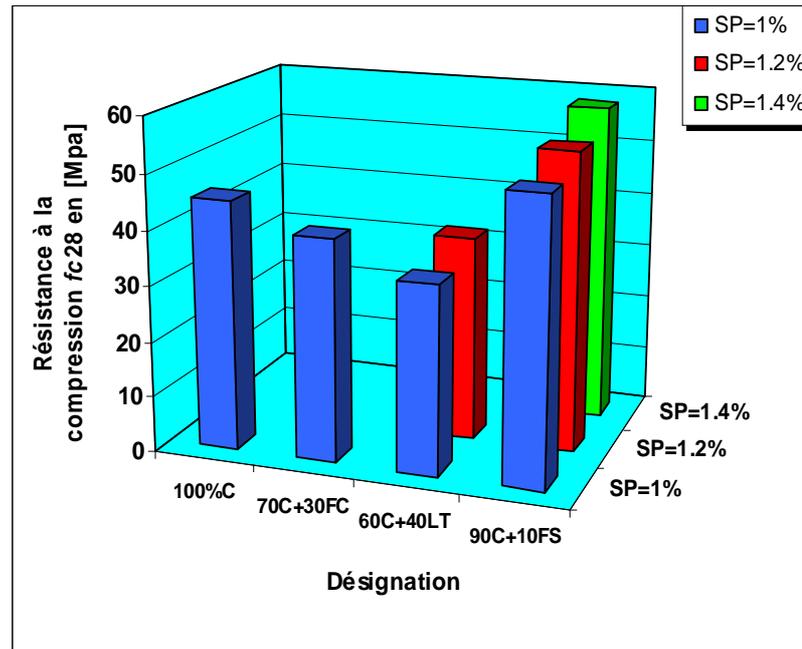


Fig. 4.24 - Effet des additions minérales sur la résistance à la compression.

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).

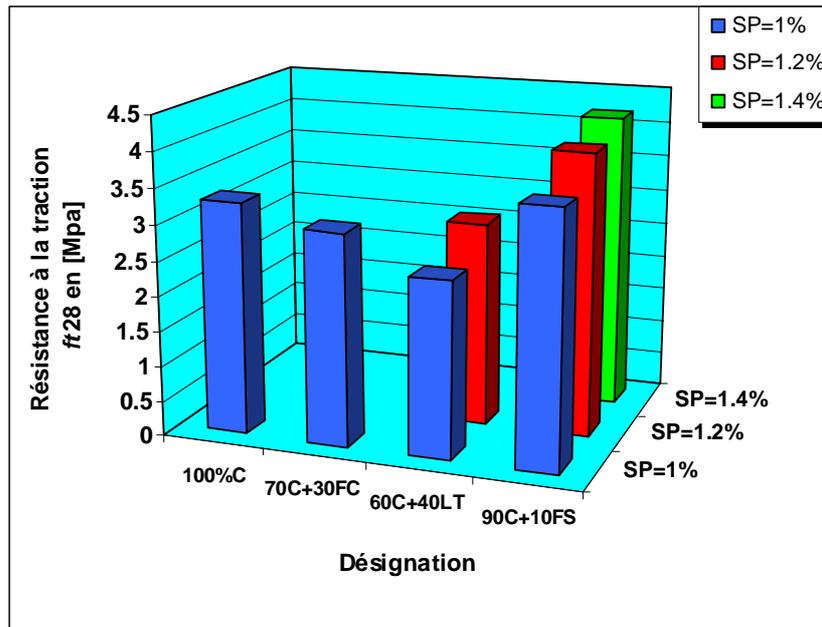


Fig. 4.25 - Effet des additions minérales sur la résistance à la traction.

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.

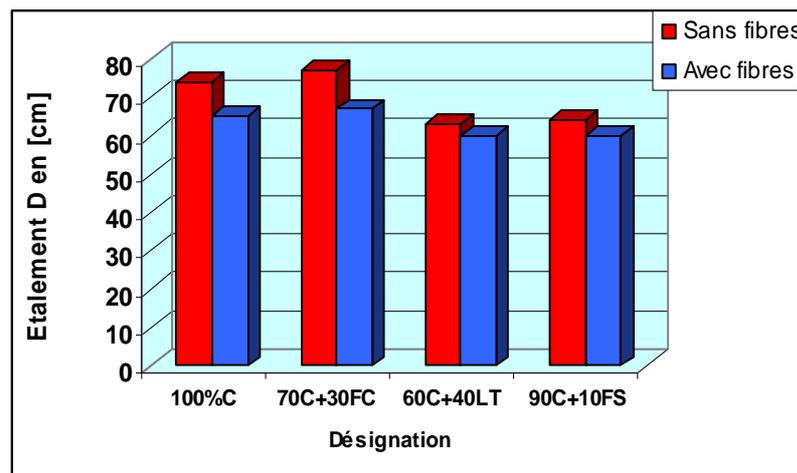


Fig. 4.26 - Effet des fibres polypropylènes sur la fluidité.

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.

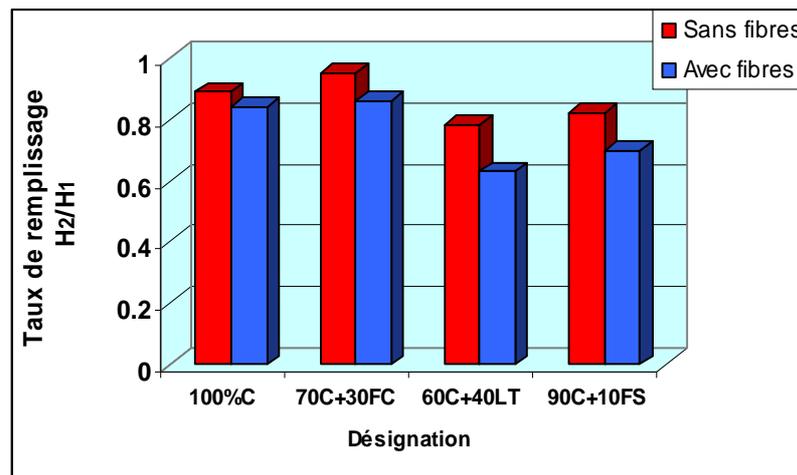


Fig. 4.27 - Effet des fibres polypropylènes sur la déformabilité.

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.

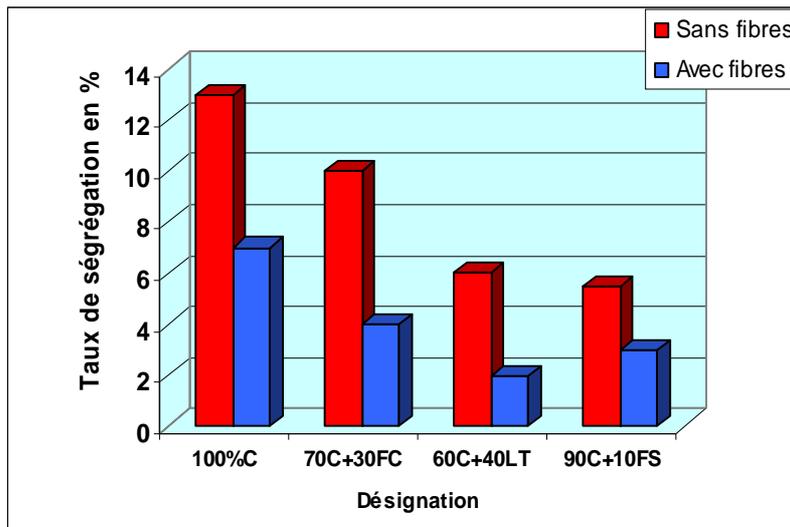


Fig. 4.28 - Effet des fibres polypropylènes sur la stabilité.

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.

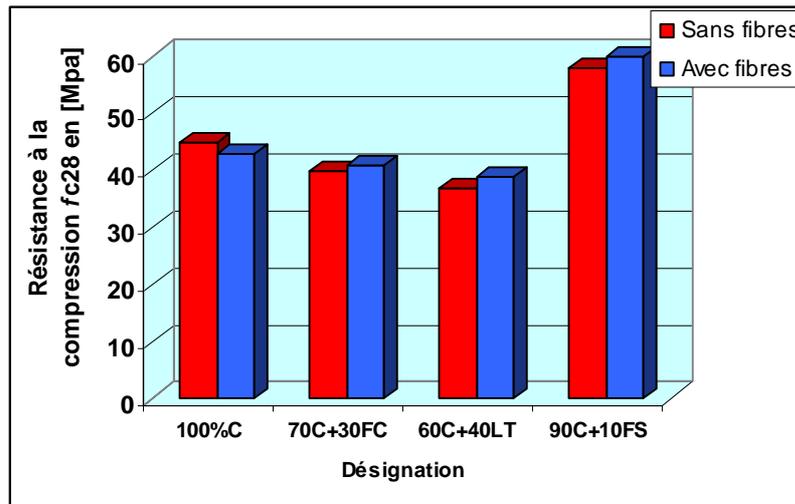


Fig. 4.29 - Effet des fibres polypropylènes sur la résistance à la compression.

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 rompt 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).

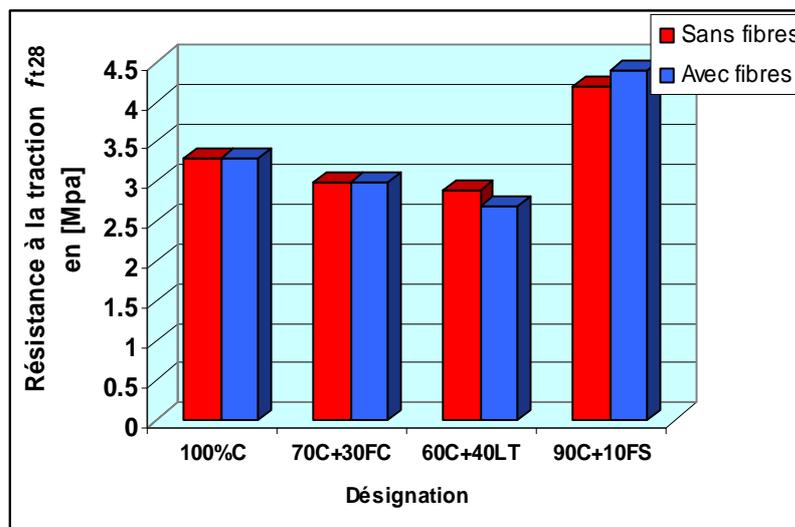


Fig. 4.30 - Effet des fibres polypropylènes sur la résistance à la traction.

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.

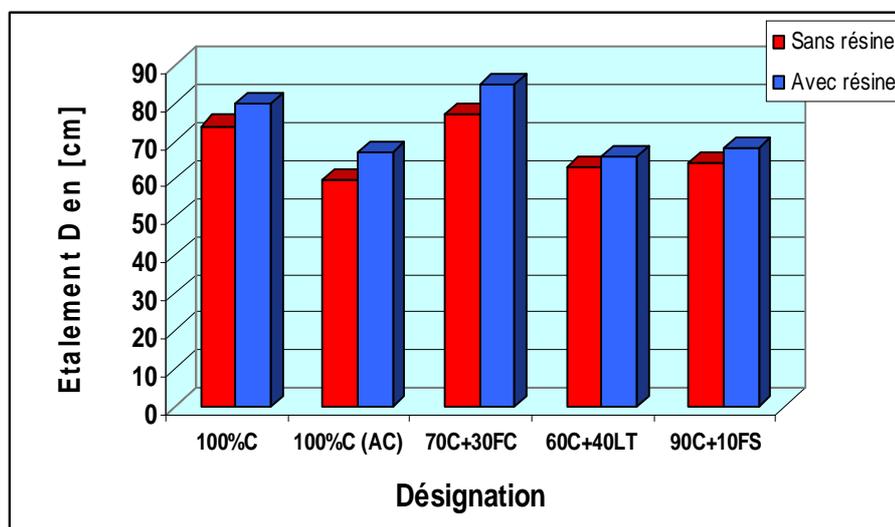


Fig. 4.31- Effet de la résine sur la fluidité.

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.

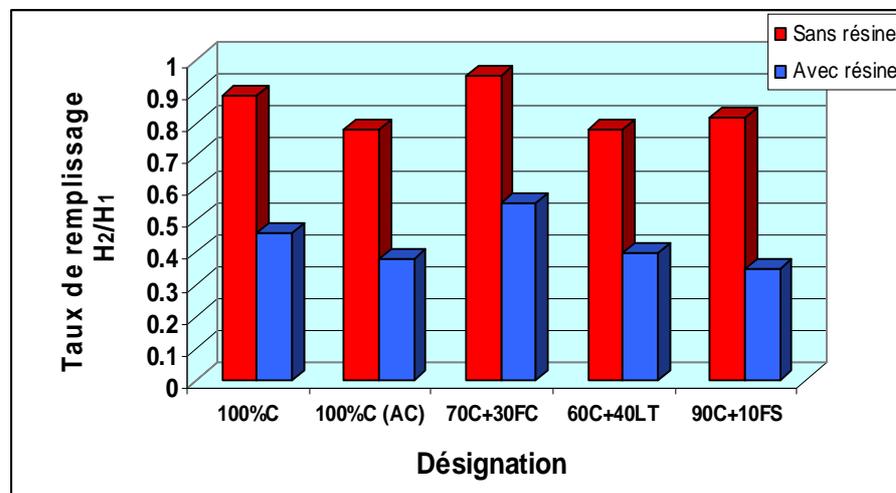


Fig. 4.32 - Effet de la résine sur la déformabilité.

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.

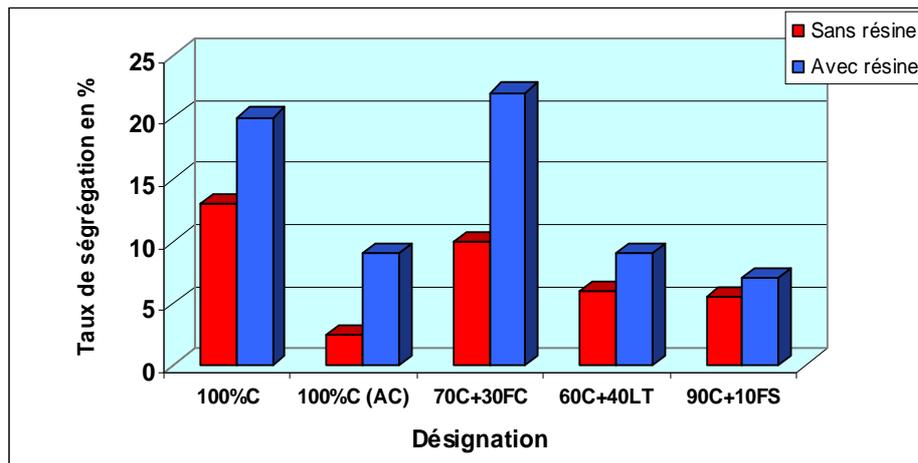


Fig. 4.33 - Effet de la résine sur la stabilité.

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.

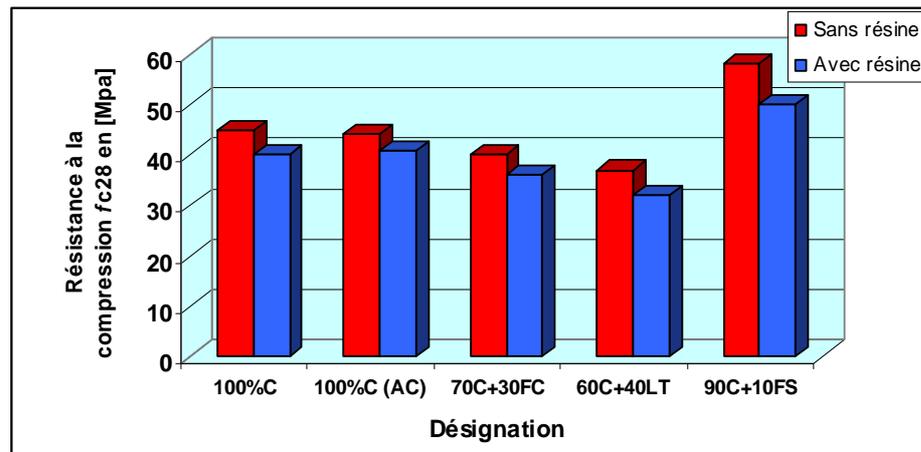


Fig. 4.34 - Effet de la résine sur la résistance à la compression.

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).

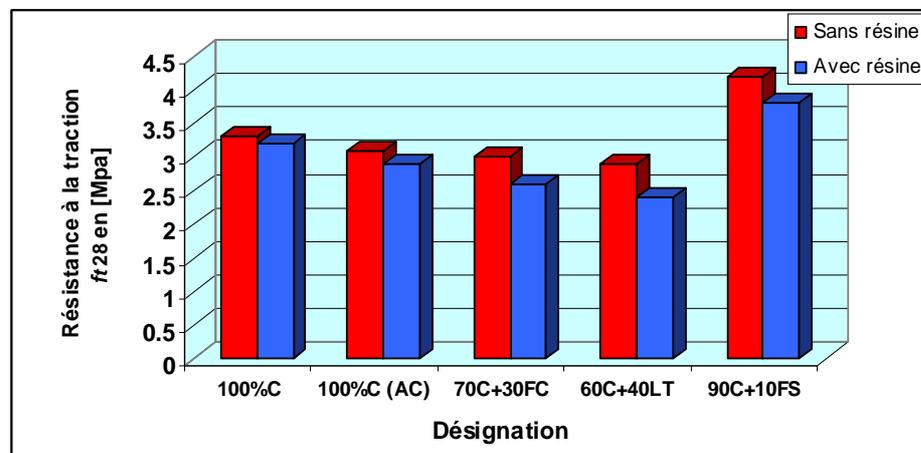


Fig. 4.35 - Effet de la résine sur la résistance à la traction.

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.

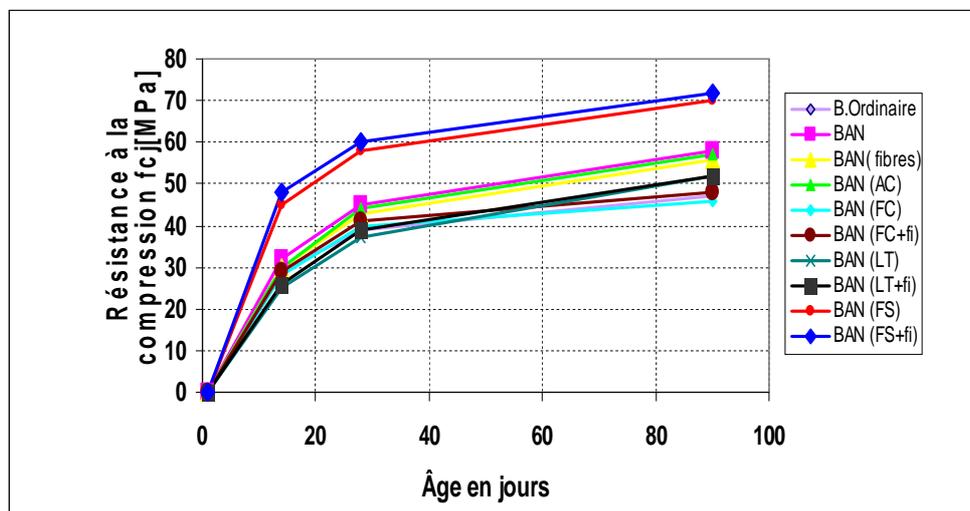


Fig. 4.36 - Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps.

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].

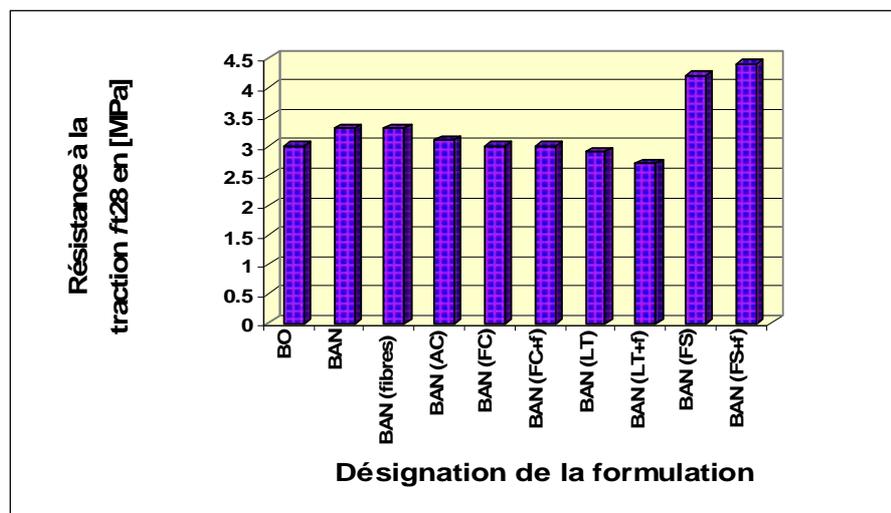


Fig. 4.37 - Résistance à la traction à 28j des BAN optimisés et du BO.

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].

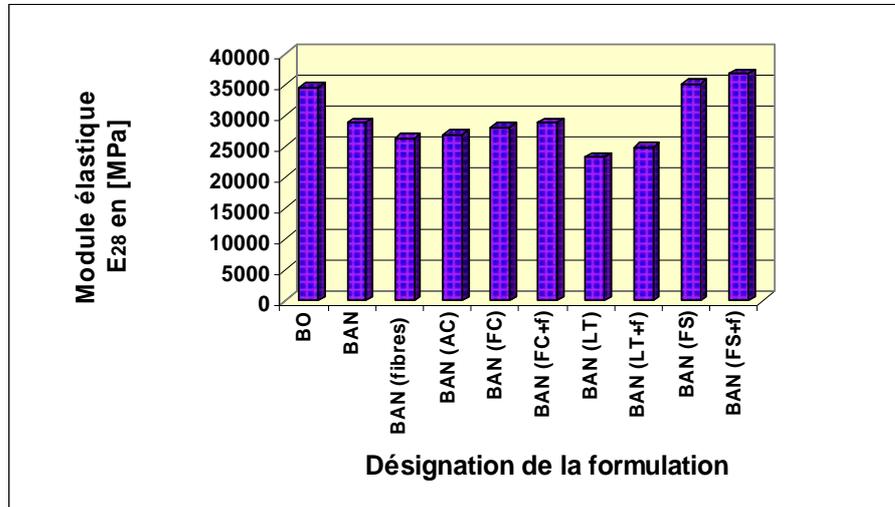


Fig. 4.38 - Module élastique à 28j des BAN optimisés et du BO.

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].

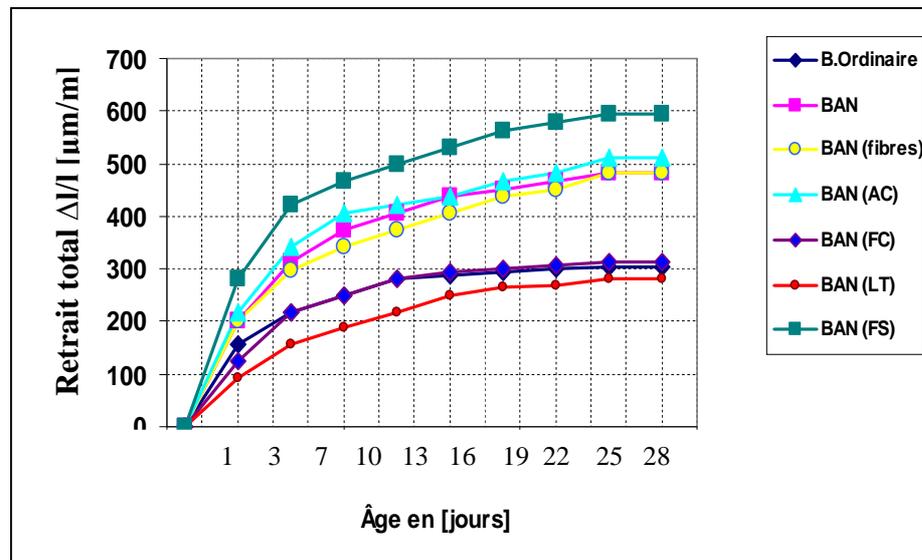


Fig.4.39 : Retrait total de dérivés des BAN optimisés et du BO.

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.

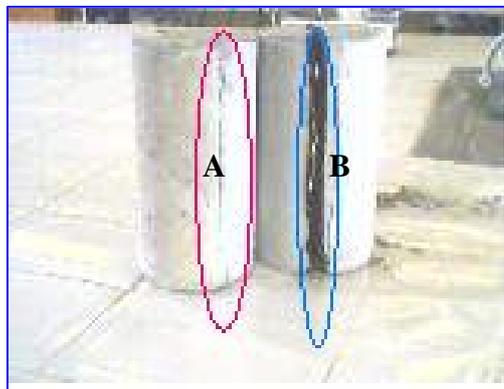
4.7.1 Examen visuel des surfaces de rupture

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 côté 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.

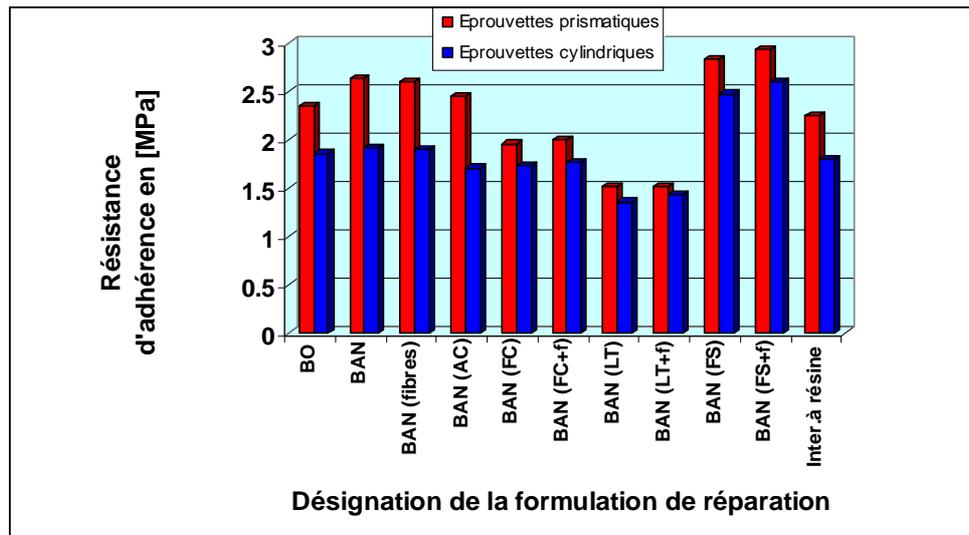


Fig. 4.40 - Résistance à l'adhérence pour les différents mélanges de réparation.

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.

A- Résultats des essais pour l'optimisation du volume de gravier.

N°	Gravier [l]	Essais à l'état frais			Essais à l'état durci	
		Etalement D en [cm]	Déformabilité H ₂ /H ₁	Stabilité π %	f _{c28} en [MPa]	f _{t28} en [MPa]
01	250	76	0.9	18	36.5	2.7
02	275	66.5	0.82	15	42	3.2
03	300	62	0.66	12	44	3.3
04	325	58	0.26	2	46.5	3.2
05	350	20	0	0	48	3.1
		E/C=0.4	S/Pt=0.6	SP=0.8%		

B- Résultats des essais pour l'optimisation du dosage en super plastifiant

N°	SP%	S/Pt	Essais à l'état frais			Essais à l'état durci	
			Etalement D en [cm]	Déformabilité H ₂ /H ₁	Stabilité π %	f _{c28} en [MPa]	f _{t28} en [MPa]
01	0.8	0.6	66.5	0.82	15	42	3.2
02		0.7	60	blocage	5	39.5	3
03		0.8	35	blocage	2	38	2.8
04	1	0.6	80	0.92	20	47	3.6
05		0.7	74	0.89	13	45	3.3
06		0.8	63	0.64	7	41.5	3.1
07	1.2	0.6	90	0.96	23	50	3.7
08		0.7	87	0.94	20	47	3.4
09		0.8	85	0.9	18	44	3.2
			G=275l	E/C=0.4			

C- Résultats des essais pour l'optimisation des rapports S/Pt et E/C

N°	E/C	S/Pt	Essais à l'état frais			Essais à l'état durci	
			Etalement D en [cm]	Déformabilité H ₂ /H ₁	Stabilité π %	fc28 en [MPa]	ft28 en [MPa]
01	0.35	0.6	65	0.7	11	50	3.7
02		0.7	57	0.67	8	48	3.6
03		0.8	52	0.62	5	44	3.3
04	0.4	0.6	80	0.92	20	47	3.6
05		0.7	74	0.89	13	45	3.3
06		0.8	63	0.64	7	41.5	3.1
07	0.45	0.6	84	0.96	22	45	3.3
08		0.7	82	0.94	17	42	3.1
09		0.8	70	0.66	9	40	2.9
G=275l SP=1%							

D- Résultats des essais pour l'optimisation du dosage en agent colloïdal

N°	AC%	Essais à l'état frais			Essais à l'état durci	
		Etalement D en [cm]	Déformabilité H ₂ /H ₁	Stabilité π %	fc28 en [MPa]	ft28 en [MPa]
01	0	74	0.89	13	45	3.3
02	0.015	60	0.78	2.5	44	3.1
03	0.03	50	0.7	2.2	45	3.1
04	0.07	45	0.4	1.8	46	3.2
G=275l E/C=0.4 S/Pt=0.7 SP=1%						

E- Résultats des essais pour l'effet des additions minérales

N°	Désignation	SP%	Essais à l'état frais			Essais à l'état durci	
			Etalement D en [cm]	Déformabilité H ₂ /H ₁	Stabilité π %	fc28 en [MPa]	ft28 en [MPa]
01	100%C	1	74	0.89	13	45	33
02	70C+30FC	1	77	0.95	10	40	3
03	60C+40LT	1	58	0.66	4.5	34	2.5
04	60C+40LT	1.2	63	0.78	6	37	2.9
05	90C+10FS	1	50	0.6	4	51	3.6
06	90C+10FS	1.2	55	0.7	5	54	4
07	90C+10FS	1.4	64	0.82	5.5	58	4.2
G=275l E/L=0.4 S/Pt=0.7							

F- Résultats des essais pour l'effet des fibres polypropylènes

N°	Désignation	SP%	Essais à l'état frais			Essais à l'état durci	
			Etalement D en [cm]	Déformabilité H ₂ /H ₁	Stabilité π %	fc28 en [MPa]	ft28 en [MPa]
01	100%C	1%	65	0.84	7	43	3.3
02	70C+30FC	1%	67	0.86	4	41	3
03	60C+40LT	1.2%	60	0.63	2	39	2.7
04	90C+10FS	1.4%	60	0.7	3	60	4.4
G=720.5 kg E/L=0.4 S/Pt=0.7 Fibres=0.6 kg							

G- Résultats des essais pour l'effet de la résine

N°	Désignation	SP %	Essais à l'état frais			Essais à l'état durci	
			Etalement D en [cm]	Déformabilité H_2/H_1	Stabilité π %	f_{c28} en [MPa]	f_{t28} en [MPa]
01	Béton à résine	1	80	0.46	20	40	3.3
02	B. résine (AC)	1	67	0.38	9	41	2.9
03	B. résine (FC)	1	85	0.55	22	36	2.6
04	B. résine (LT)	1.2	66	0.4	9	32	2.4
05	B. résine (FS)	1.4	58	0.35	7	50	3.8
G=720.5 kg E/L=0.4 S/Pt=0.7, résine 25% du poids d'eau							

H- Evaluation des propriétés mécaniques des BAN et celles d'un BO.

N°	Désignation	Résistances mécaniques en [MPa]				M. élastique	Retrait
		f_{c14}	f_{c28}	f_{c90}	f_{t28}	[MPa]	[$\mu\text{m/m}$]
01	B ordinaire	29	39	47	3	34500	305
02	BAN	32	45	58	3.3	28800	484
03	BAN (fibres)	30	43	56	3.3	26250	484
04	BAN (AC)	30	44	57	3.1	27000	510
05	BAN (FC)	28	40	46	3	28200	312
06	BAN (FC+f)	29	41	48	3	28800	*
07	BAN (LT)	25	37	52	2.9	23250	281
08	BAN (LT+f)	26	39	52	2.7	24750	*
09	BAN (FS)	45	58	70	4.2	35250	593
10	BAN (FS+f)	48	60	72	4.4	36750	*
Retrait mesuré à 28 j, f : désigne fibres.							

I- Evaluation de la résistance à l'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton.

N°	Désignation	Résistance d'adhérence en [MPa]	
		Eprouvettes prismatiques	Eprouvettes cylindriques
01	B ordinaire	2.35	1.86
02	BAN	2.64	1.92
03	BAN (fibres)	2.6	1.9
04	BAN (AC)	2.45	1.71
05	BAN (FC)	1.96	1.74
06	BAN (FC+f)	2	1.77
07	BAN (LT)	1.52	1.36
08	BAN (LT+f)	1.52	1.43
09	BAN (FS)	2.84	2.48
10	BAN (FS+f)	2.94	2.61
11	Interface résine	2.25	1.8