

## **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<sup>ème</sup> 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]

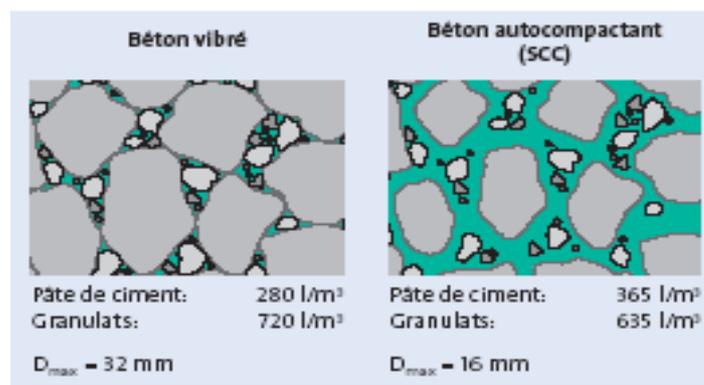
### 2.2.3 Particularité de la composition des BAN

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/m<sup>3</sup> [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/m<sup>3</sup> de c.v pour 300kg/m<sup>3</sup> 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 celluloseux, 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
$H_2/H_1$	$\geq 0.8$
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 ( $\geq 800$  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  $T_{50}$ ) 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.

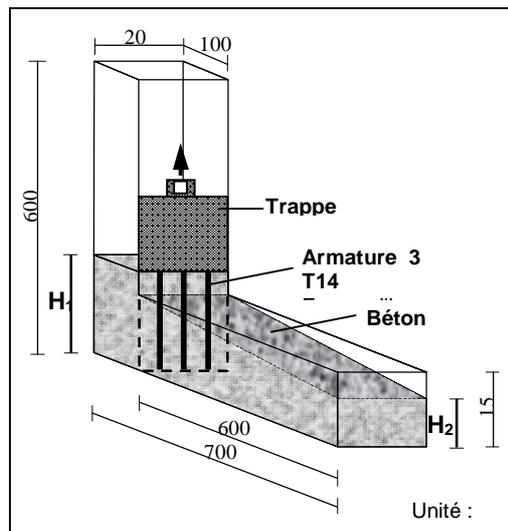


Fig. 2.1 - Représentation schématique de l'essai à la boîte en L. [24]



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

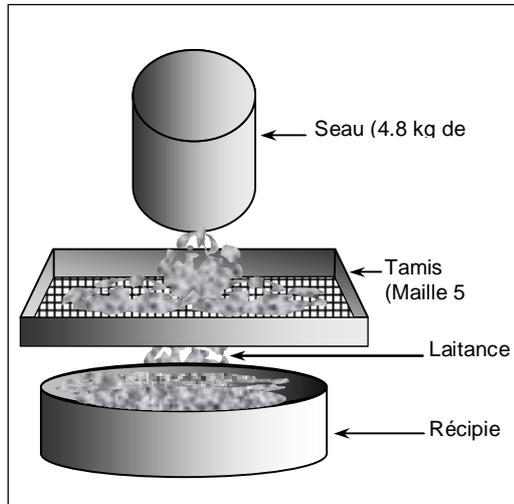
### C- Essai de stabilité au tamis (essai évaluant la stabilité)

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  $\pi$  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<sup>ème</sup> 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.

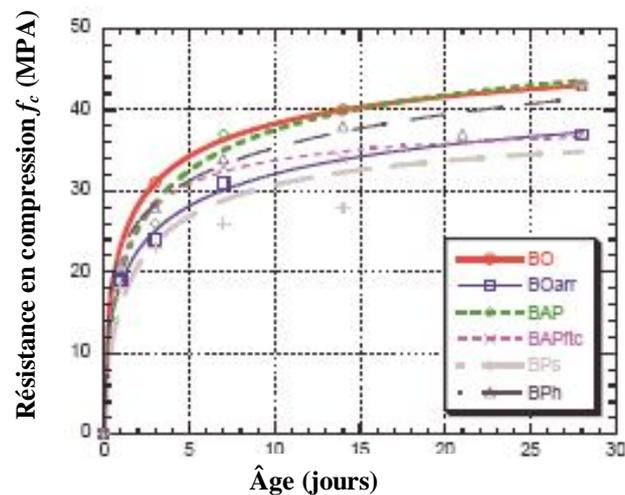


Fig. 2.3 - Résistance en compression de différents mélanges. [38]

### ***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 [\[1\]](#).

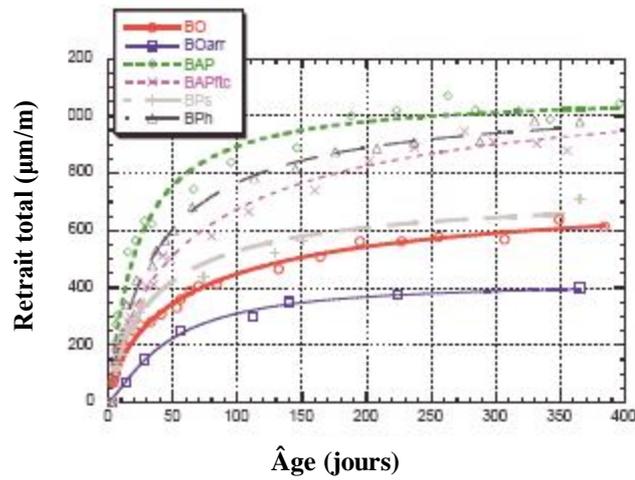


Fig. 2.4 - Retrait total de différents mélanges. [38]

#### 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).

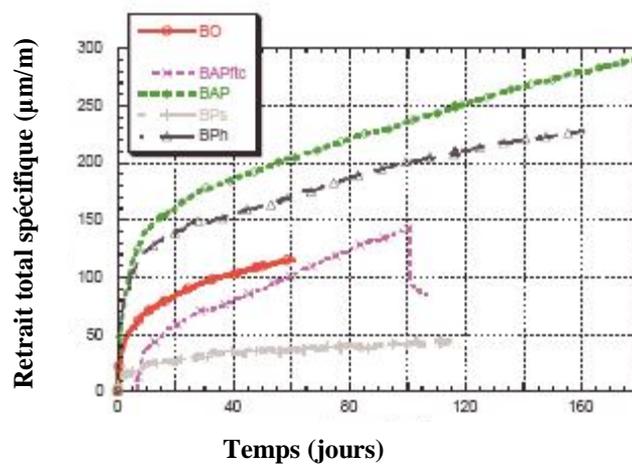


Fig. 2.5 - Fluage total spécifique de différents mélanges. [38]

### ***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.

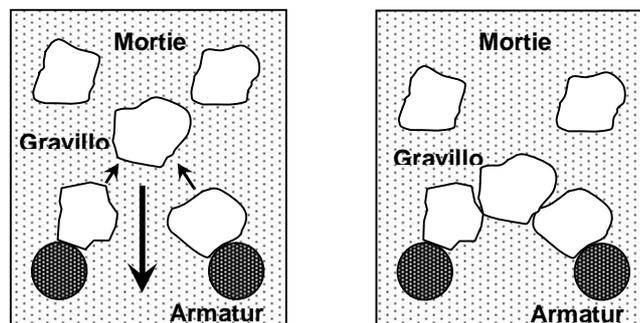


Fig. 2.6 - Phénomène de blocage des gravillons au droit d'un obstacle. [49]

## 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.

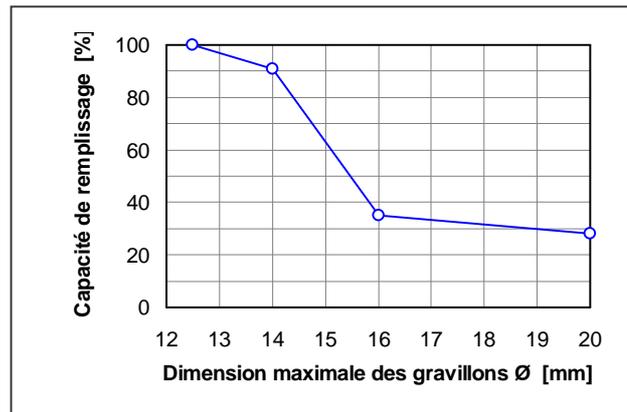


Fig. 2.7 - Effet de la taille maximale des gravillons sur la capacité de remplissage. [49]

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.

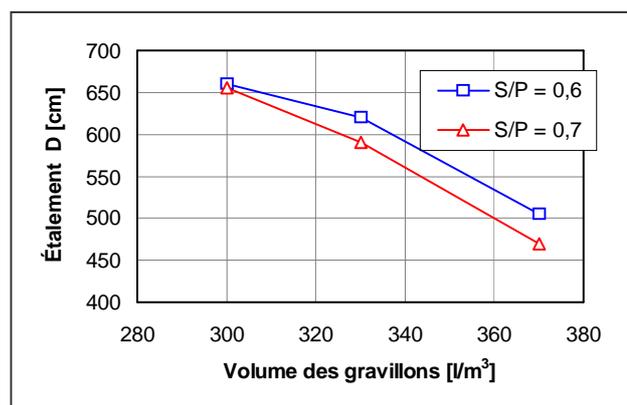


Fig. 2.8 - Effet du volume des gravillons sur l'étalement pour différents rapports S/Pt. [51]

### - 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.

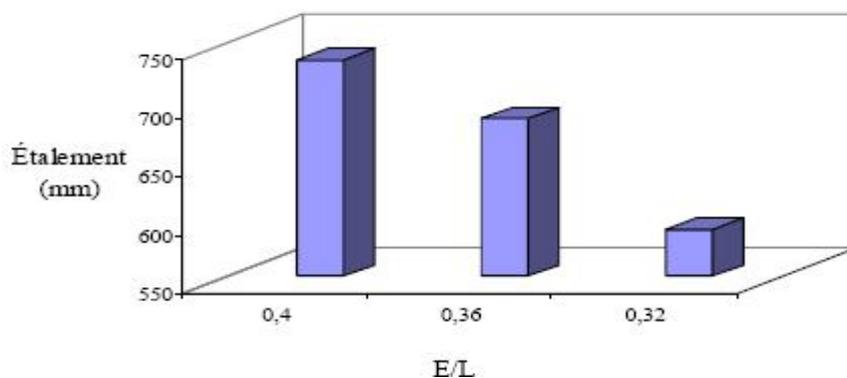


Fig. 2.9 - Effet du rapport E/L sur la maniabilité. [31]

### - 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.

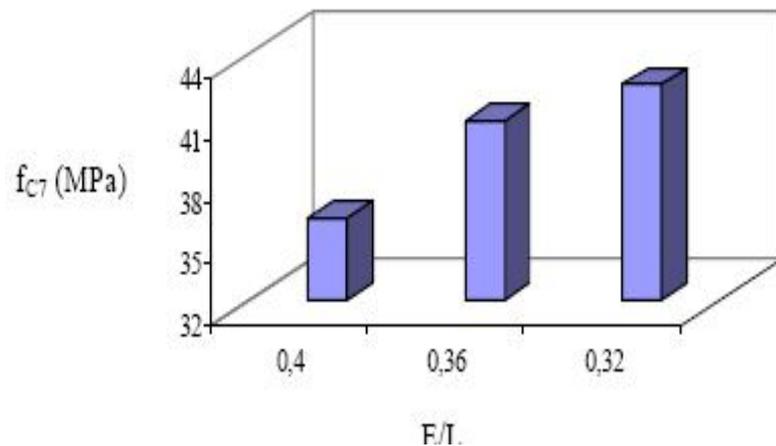


Fig. 2.10 Effet du rapport E/L sur la résistance. [31]

### 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/m<sup>3</sup>, 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/m<sup>3</sup>). 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  $\mu\text{m}$ . 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  $0.1\mu\text{m}$ . Leur surface spécifique est de l'ordre de 20 à  $25\text{m}^2/\text{g}$ . 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  $80\mu\text{m}$ , 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 <sup>3</sup> )	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)

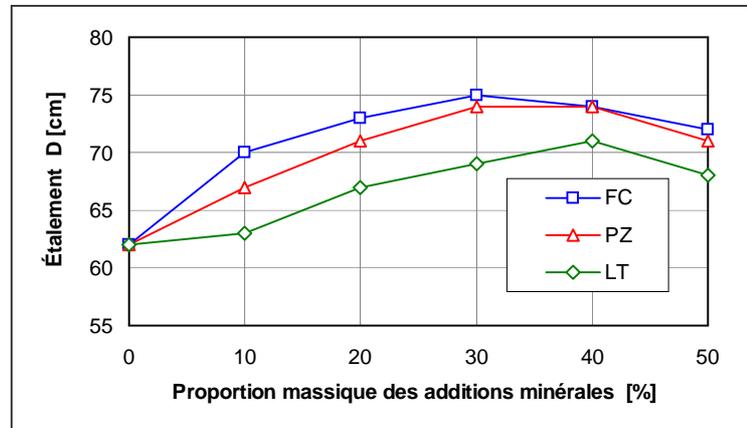


Fig. 2.11- Effet des additions minérales (FC, PZ, LT) sur la fluidité. [40]

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.

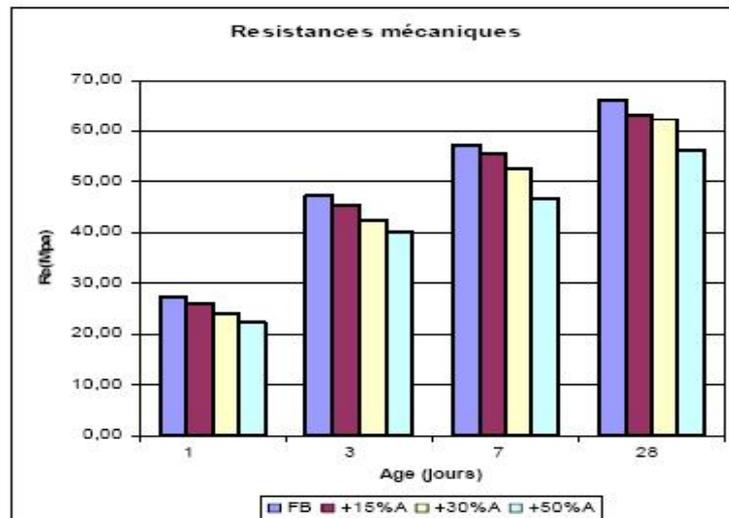


Fig. 2.12 - Effet des différentes proportions de fillers calcaires sur la résistance mécanique d'un BAN. [21]

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].

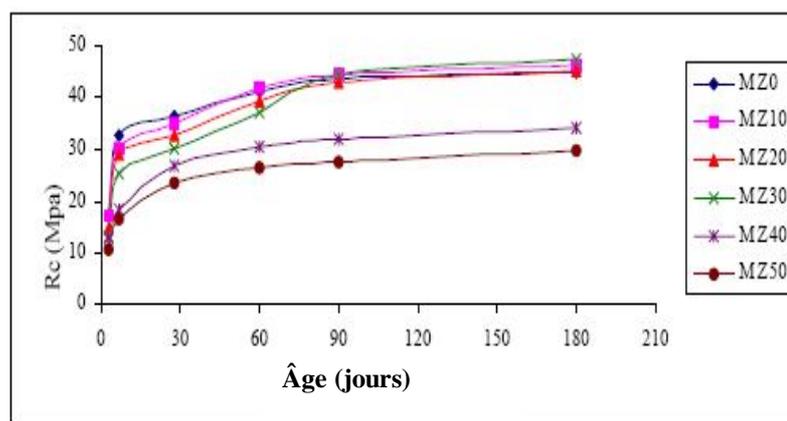


Fig. 2.13 - Effet de la pouzzolane sur l'évolution des résistances à la compression des mortiers. [36]

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).

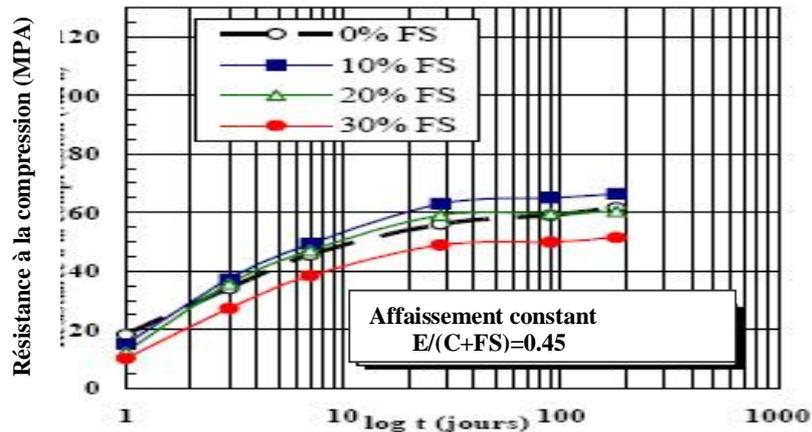


Fig. 2.14 - Evolution de la résistance à la compression des bétons contenant de différents pourcentages de fumée de silice en fonction de temps. [29]

#### 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.

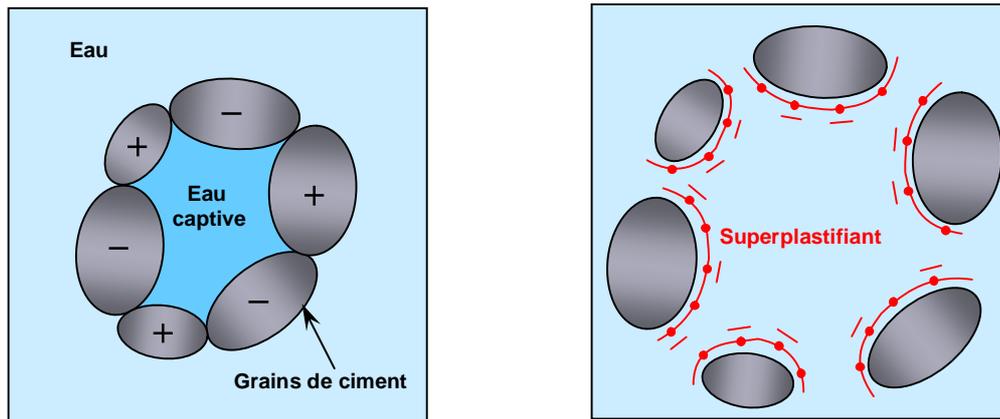


Fig. 2.15- Effet du super plastifiant sur les grains de ciment par le phénomène de dispersion. [40]

### 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/m<sup>3</sup> à près de 20 l/m<sup>3</sup> 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.

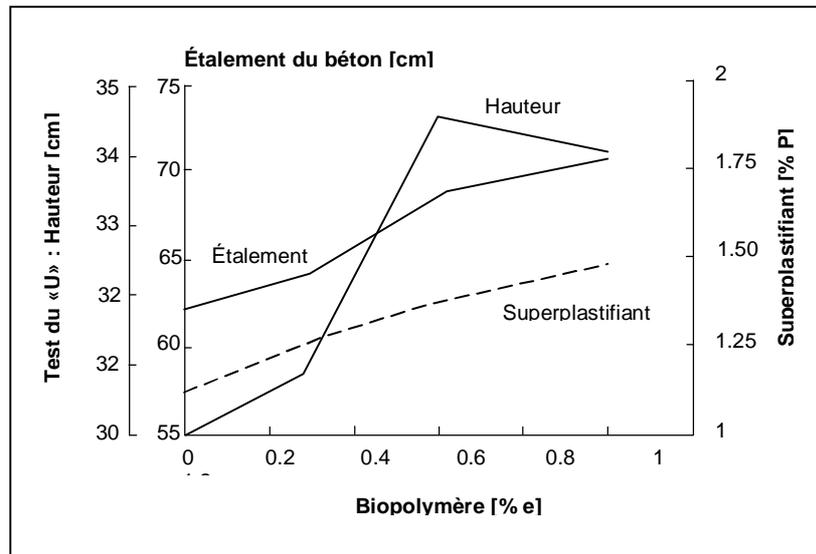


Fig. 2.16 - Propriétés du béton optimisé pour différentes teneurs en agent de viscosité. [49]

### -- 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 m<sup>3</sup> de béton, soit entre 0.05 et 0.2% en volume. Dans la majorité des cas les dosages habituels sont de 600 g/m<sup>3</sup> ou 900g/m<sup>3</sup> et très rarement 1200 g/m<sup>3</sup>.

### 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/m<sup>3</sup>, les dosages courants sont de l'ordre de 30 kg, éventuellement 50kg/m<sup>3</sup>.



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/m<sup>3</sup>.
- 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/m<sup>3</sup>. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m<sup>3</sup>.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

### 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].