

Généralités sur le béton autoplaçant

I.1 Introduction

Les maîtres d'œuvres, architectes, ingénieurs, entreprises, fabricants de béton ont toujours recherché un béton permettant :

- *Une mise en place aisée.
- *Un bon remplissage des coffrages.
- *Un parfait enrobage des armatures.

La vibration toujours été le moyen d'obtenir ces caractéristiques, Devant la complexité croissante des structures, formes variées, fortes concentrations d'armatures, les formulations de bétons ont dû s'adapter. Les bétons sont devenus de plus en plus fluides, malgré la réduction de la quantité d'eau de gâchage, à tel point que la vibration n'est devenue plus nécessaire, Cette hyper fluidité du béton a été rendue possible par l'arrivée sur le marché des dernières générations d'adjuvants « super plastifiants ».

Dans les années 80 Le JAPON a été le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique et qui s'est progressivement répandue à travers le reste du monde, de nombreux termes définissent ces bétons :

- *Béton auto-compactant (BAC).
- *Self-compacting concrète (SCC, en Anglais).
- *Béton hyper fluide.

L'appellation la plus usitée aujourd'hui est le béton autoplaçant (BAP).

I.2 Définition de béton autoplaçant

Par béton autoplaçant (BAP), on désigne un béton très fluide, très déformable, stable et mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuant par le seul effet gravitaire). Il confère à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant au béton classique mis en œuvre par vibration, il garantit à la structure la résistance et la durabilité. Par définition, les BAN (Bétons Auto-Nivelant) constituent une famille de BAP correspondant aux applications horizontales (dallage, planché...etc.).

I.3 Domaine d'utilisation des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [1]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation des structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

- densités de ferrailage importantes.
- formes et géométries complexes : voiles, courbes.
- voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts.
- voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.
- exigences architecturales et qualité de parement particulière.

A titre d'exemple, nous citons quelques réalisations avec les BAP :

Le pont Akashi Kaikyo (Figure1), le plus long pont suspendu au monde (3919m) ou 390 000 de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration. [1]



Figure I.1 : Le pont Akashi Kaikyo.

La tour Landmark Tower (figure I.2), ou un béton autoplaçant d'une excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune



Figure I.2 : La tour Landmark Tower.

I.4 Les critères de composition des BAP

Après plusieurs recherches effectuées en laboratoires, les essais ont montré que pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un béton autoplaçant doit avoir certaines caractéristiques soit :

I.4.1 Un volume de pâte important

Les frottements entre granulats sont source de limitation vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats les uns des autres, son volume dans les BAP est donc élevé (figure I.3).

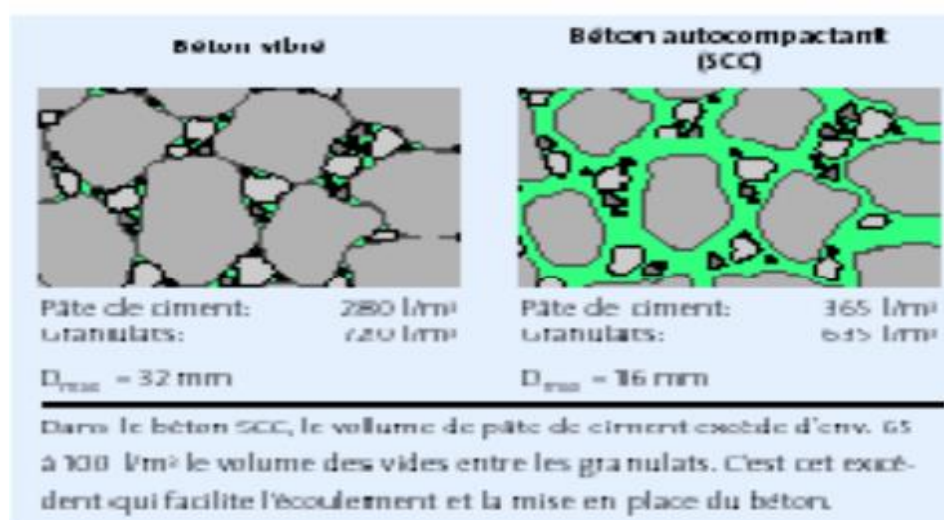


Figure I.3 : dispersion des granulats par excès de pâte [2].

I.4.2 Une quantité de fines (<80 μm) importante

Afin de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m³) supérieure à celle des bétons conventionnels.

Le choix des additions et de leur teneur respective dans les BAP est déterminé en fonction des exigences de résistance à la compression à 28 jours, des critères de durabilité et des paramètres d'ouvrabilité telles qu'imposées par les normes applicables (DTU 21, norme [FN EN P 18-305], normes produit préfabriqué en usine, etc.).

I.4.3 L'utilisation des superplastifiants

Les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides. Ces fluidifiants ont le rôle de défloculants, ainsi les particules solides sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante. 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 du ressuage.

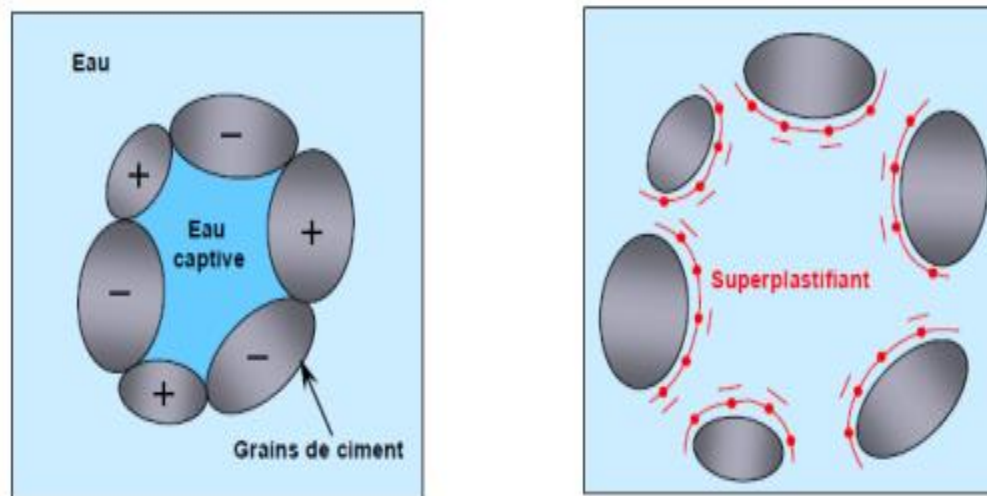


Figure I.4 : Mode d'action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment.

La Figure I.4 illustre l'effet d'introduction d'un superplastifiant sur l'ouvrabilité du béton plus le dosage en superplastifiant est grand plus le béton devient fluide jusqu'à une certaine valeur où l'augmentation du dosage en superplastifiant n'a plus d'effets sur l'étalement. De la même manière, la viscosité du BAP change faiblement jusqu'à un dosage à partir duquel elle commence à baisser d'une manière significative.

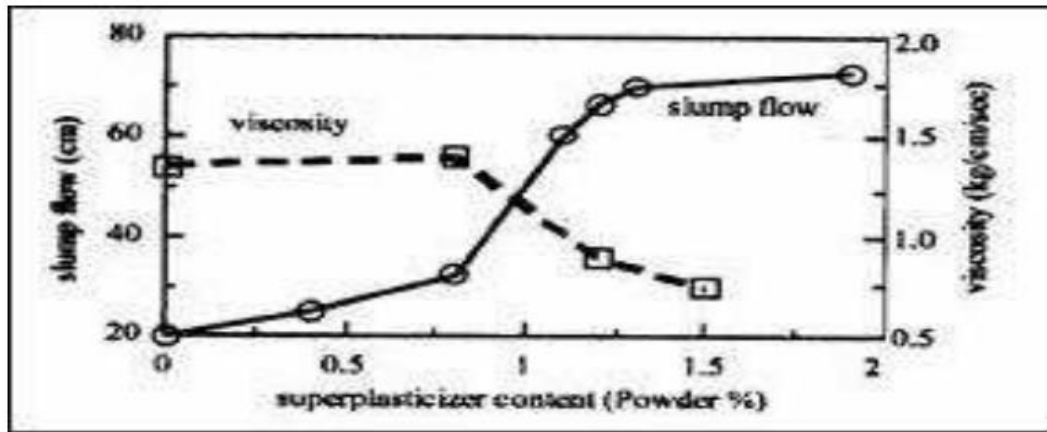


Figure 1.5 : Etalement et viscosité en fonction du dosage en superplastifiant.

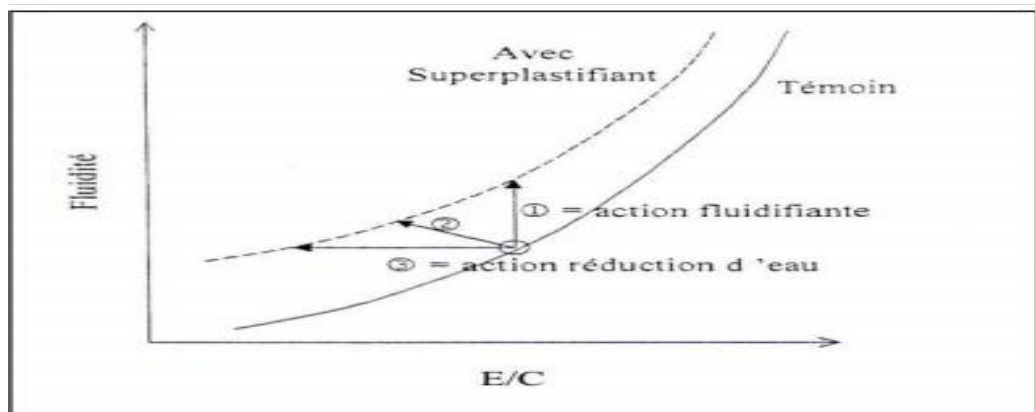


Figure 1.6 : Les utilisations des superplastifiants.

- 1 – augmentation de la fluidité (teneur en eau égale).
- 2 – diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité.
- 3 – diminution de la teneur en eau (à fluidité égale).

I.4.4 Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (dit agent de viscosité)

L'ajoute d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent des agents de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulotiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Ces produits, comme les fines, ont rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse. 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.

I.4.5 Un faible volume de gravillon

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés de diamètre maximal compris entre 10 et 20 mm pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP.

I.5 Constituants d'un BAP

I.5.1 Les liants et les granulats

Le liant est constitué de ciment auquel on ajoute des particules fines minérales qui correspondent à des additions normalisées ou non.

I.5.1.1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau, le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium.

Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement, la somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

Le ciment est constitué principalement de clinker portland (K) qui est un matériau hydraulique, il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20%.

Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de cette cuisson (clinkérisation) sont :

- Le silicate tricalcique, $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$, que l'on écrit C_3S .
- Le silicate bi calcique, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$, que l'on écrit C_2S .
- L'aluminate tricalcique, $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$, que l'on écrit C_3A .
- L'alumino ferrite tetracalcique, $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3 .\text{Fe}_2\text{O}_3$, que l'on écrit C_4AF .

Suivant la carrière d'origine et les performances recherchées, le clinker est constitué de 62 % à 67 % de chaux combinée (CaO), de 19 % à 25 % de silice (SiO_2), de 2 % à 9 % d'alumine (Al_2O_3), et de 1 % à 5 % d'oxyde de fer (Fe_2O_3).

Le ciment peut être constitué aussi de laitier de haut fourneau (S), de pouzzolane naturelle (Z), de cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W), de fumée de silice (D), de calcaire (L), de schistes calcinés (T), de constituants secondaires, de sulfate de calcium (gypse, hélihydrates, anhydrite) et d'additifs.

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton autoplaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts.

- **Les différents types de ciment :**

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principale, ils sont notés CME et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse).

CEM I: Ciment Portland (CPA).

CEM II : Ciment Portland composé (CPJ).

CEM III : Ciment de haut-fourneau (CHF).

CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).

CEM V : Ciment composé (CLC).

I.5.1.2 L'eau :

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

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

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

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

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque déségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de super plastifiants.

I.5.1.3 Les ajouts minéraux

Différentes additions minérales peuvent être ajoutées au béton, substituant ou non une partie du ciment, afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou de lui conférer des propriétés particulières, ce sont des matériaux finement divisés parmi lesquelles nous citons les fillers, la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau qui proviennent principalement de l'industrie, ces fines présentent plusieurs avantages dans l'industrie et la formulation des bétons.

- **Existe deux catégories des ajouts minéraux :**

-Les fines actives à caractère pouzzolanique, ce sont des particules de faibles diamètres qui, ajoutées en quantités de l'ordre de 10 % du poids de ciment, améliorent notablement les performances de résistances et de durabilité du béton grâce à leurs propriétés pouzzolaniques (cendres volantes, fumée de silice, laitier...etc.).

-Les fines inertes comme les fillers calcaires, l'objectif dans leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance. Elles sont également utilisées pour améliorer la consistance des bétons notamment dans le cas des bétons autoplaçants qui nécessitent une forte teneur en fines pour assurer au BAP un compromis entre une bonne fluidité apportée par les fluidifiants et une bonne viscosité que l'on essaye d'avoir par l'introduction des fillers.

- **Avantages économiques et environnementaux :**

La plupart des additions minérales sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple), ainsi l'incorporation des additions minérales à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton. Par ailleurs, l'utilisation généralisée des additions minérales dans le monde contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO₂ de l'industrie cimentière dans la nature.

- **Avantages techniques :**

En général, les additions minérales influencent fortement les propriétés des bétons à l'état durci, elles permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons, en raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant solide plus compact et cette optimisation de la granulométrie du squelette total, aide aussi à limiter le ressuage du béton et à augmenter la cohésion de l'ensemble. par ailleurs, les additions minérales réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

I.5.1.4 Les granulats

- Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés.
- Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés [1].
- Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm.
- La proportion des gravillons par rapport au sable est plus faible qu'avec un béton ordinaire afin de permettre l'écoulement du matériau dans les zones confinées.
- Le rapport G/S est de l'ordre 1.

I.5.2 Les adjuvants

Les deux adjuvants nécessaires pour la formulation des BAP sont les superplastifiants et l'agent de viscosité.

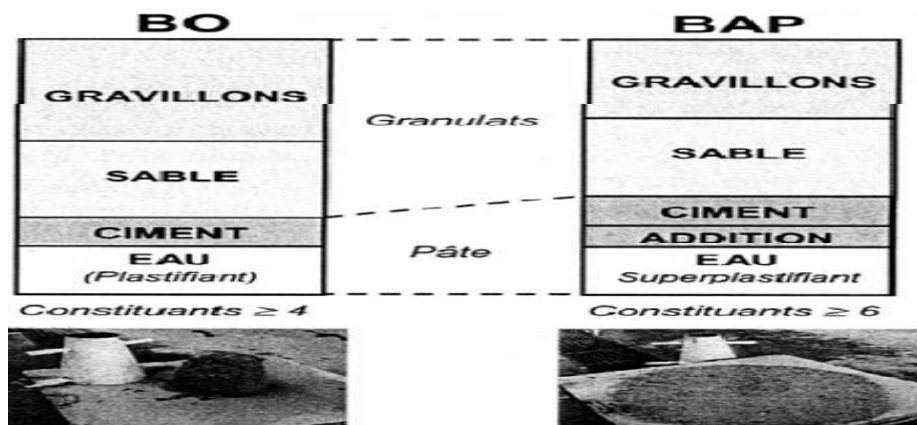


Figure I.7 : composition s'un béton ordinaire (BO) et d'un (BAP)
Aspect à l'état frais d'un (BO) et d'un (BAP).

En résumé, les composants de base d'un BAP sont identiques à ceux d'un béton vibré mais leurs proportions sont différentes (figure I.7). Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires.

I.6 Les approche de formulation

I.6.1 Méthode de formulation pratique des BAP

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique, La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée [2]. Car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont les composants essentiels d'un BAP. La formulation est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années.

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

* Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.

* La masse du ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme BPE [NF EN P18 305], 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, La formulation se fait donc par tâtonnement sur la base de ces plages. Après la conception sur le papier, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.

I.6.2 Formulations des BAP existants dans la bibliographie

Des multiples approches sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. Dans ce qui suit, un exposé général sur les approches principales.

I.6.2.1 Approche japonaise

En général, cette approche consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances et pour satisfaire les critères d'ouvrabilité.

Le volume du gravier est fixé à la hauteur de 50% du volume des solides contenus dans le béton. Selon les auteurs, ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que

le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés. En effet, pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier.

Toutefois, le volume de gravier dans cette méthode est généralement sous-dimensionné pour pouvoir éviter les risques de blocages, ce qui peut conduire à des problèmes de retrait (le volume de la pâte étant important). Le béton obtenu est ainsi loin d'un optimum économique. De ce fait, plusieurs modifications et différents développements sont apportés à cette méthode. En effet ont réussi grâce à l'utilisation d'additions minérales (fillers calcaire, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux) à augmenter le dosage de sable dans le mortier et à réduire donc le volume de pâte, et particulièrement du ciment, dans le béton. [1]

Travaillant avec des matériaux locaux, d'autres auteurs [2] ont trouvé qu'il est possible d'augmenter le volume de gravier dans le béton à la hauteur de 60% du volume solide total, et obtenir un béton autoplaçant. Le volume total de pâte est réduit de 10% par rapport à celui obtenu avec la méthode générale.

I.6.2.2 Approche CBI (suédoise)

La méthode de formulation suédoise est développée par CBI (Cement Och Betong Institutet) et se caractérise par la prise en compte des conditions des chantiers. En effet, cette approche est basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferrailés. Elle permet d'optimiser la taille maximale des granulats par rapport à l'espacement entre les armatures et le volume des granulats dans le béton. [4], [5], [6]

Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués par différents auteurs cités par ([7], [8], [9], [10]) sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles.

Passant à travers différents espacements d'armature Pour chaque taille de granulats, ils ont montré qu'il existe une teneur volumique critique de granulats en deçà de laquelle le risque de blocage est nul et au-dessus de laquelle le blocage est systématique. Cette teneur volumique critique est fonction de l'espacement entre les armatures (par rapport à la taille des granulats) et de la forme des granulats (roulés ou concassés).

Cette méthode suppose que le phénomène de blocage est indépendant de la nature de la pâte pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide.

Les principales modifications et extensions de la méthode CBI sont apportées par [1], qui a proposé un critère supplémentaire pour obtenir un béton autoplaçant. Ils'agit d'ajouter un volume

de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulats afin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats.

I.6.2.3 Approche LCPC

L'approche développée en France au LCPC par de Larrard et Sedran est basée sur le modèle d'empilement compressible [2], qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. D'après les auteurs, un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité.

Le modèle permet avoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des déferents constituants comme par exemple la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre. Les auteurs ont modélisé le comportement à l'état frais du béton à partir de la compacité de son squelette granulaire.

Cette méthode, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches est simplifiée par la mise en œuvre prenant en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche [1], permettre à déterminer des formulations types de béton Bétons à haute performance, bétons ordinaires, bétons secs pour démoulage immédiat, bétons autoplaçants).

Des extensions de cette méthode de formulation sont effectuées par les mêmes auteurs [1] afin de prendre en compte plus de paramètres tels que les propriétés des bétons à l'état durci (retrait, fluage, module d'élasticité, résistance à la traction et à la compression).

- **Bilan**

Nous avons présenté le principe des trois méthodes de formulations de BAP les plus répandues, et leurs modifications. Des auteurs [4],[3] ont testé les trois approches et souligné quelques remarques issues des essais qu'ils ont menés. Ils estiment que l'approche LCPC (appuyée par le logiciel développé) donne les résultats les plus satisfaisants

Toutefois, les trois méthodes décrites, ne sont pas adaptées pour la formulation de bétons autoplaçants contenant des agents de viscosité. L'apport d'un adjuvant de telle nature augmente significativement la viscosité du mélange, ce qui nécessite probablement des ajustements et des modifications importantes sur les méthodes de formulation des BAP.

I.7 Caractérisation d'un béton autoplaçant**I.7.1 Propriétés des BAP à l'état frais**

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques, le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage.

I.7.1.1 Le remplissage

Le remplissage du béton ou la déformabilité est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations. Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le teste d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects [1].

I.7.1.2 La résistance à la ségrégation

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [1].

La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus.

Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension avec certains agents de viscosité.

I.7.1.3 La capacité de passage

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement. Cependant, dans les milieux confinés, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures. En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton

et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement [1]. Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de la figure I.8 ci-dessous qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.

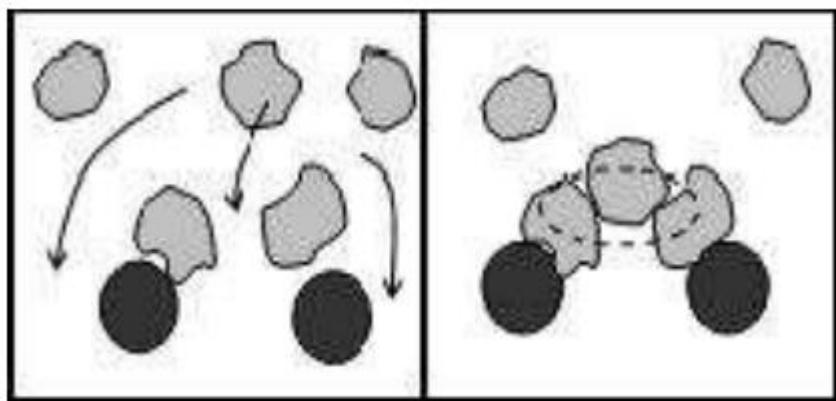


Figure I.8 : représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures.

Donc, un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires : fluidité et résistance à la ségrégation. Pour résumer, on présente les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir et les actions entreprises pour leur mise en œuvre dans le tableau I.1

Tableau I.1 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP

Résistance à la ségrégation	Réduction de la séparation de phases	Réduction du rapport E/C
		Utilisation d'agents de viscosité
		Réduction de la taille maximale des granulats
Capacité de passage	Réduction de blocage des granulats	Réduction du volume de gravier
		Réduction de la taille maximale des granulats
Propriétés d'un BAP	Moyens d'obtention	Actions à mener dans la formulation
Remplissage (fluidité)	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation du volume de pâte
	Optimisation de la pâte	Utilisation des superplastifiants
		Optimisation du rapport E/C
Résistance à la ségrégation	Réduction de l'eau libre dans le béton	Réduction du rapport E/C
		Utilisation de matériaux de grande surface
		Utilisation d'agents de viscosité

I.7.2 Caractérisation des BAP à l'état frais

Lors de la formulation la caractérisation des BAP est nécessaire, Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier les différentes propriétés citées ci-dessus. Ils sont destinés à caractériser le béton de par sa fluidité, sa stabilité et son absence au blocage. Ce qui suit résume les différents tests d'ouvrabilité qui caractérisent les bétons autoplaçants.

I.7.2.1 Essais de l'étalement (Essai au cône d'Abrams)

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant d'évaluer la fluidité est l'essai d'étalement réalisé avec le cône d'Abrams. Le principe de cet essai est de mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône (figure I.9).

Le diamètre de la galette de béton est le paramètre caractérisant de la fluidité, plus il est grand, plus le béton est fluide (grande capacité de remplissage). L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50cm et 80cm en fonction de l'utilisation du béton [2].

Ceci permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).

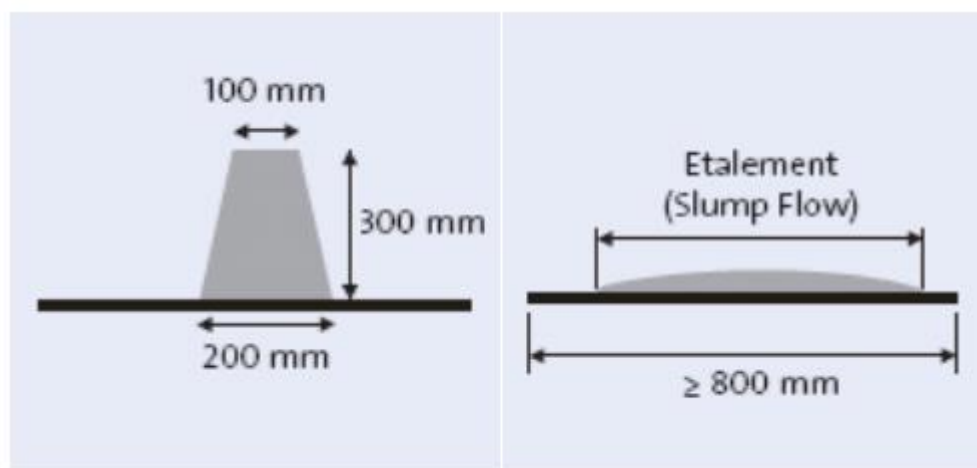


Figure I.9. Essai d'étalement

- **Mesure de la vitesse d'étalement**

Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50cm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. Cette mesure, le T_{50} est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de T_{50} traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée).

Pour un béton autoplaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes [2], Cependant, certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes, pour des bétons autoplaçants avec une faible vitesse de déformation.

I.7.2.2 Ségrégation dynamique (Essai de la boîte en L)

La boîte en L permet de caractériser la mobilité du béton frais en milieu confiné (ségrégation dynamique) et de vérifier que la mise en place du béton se fait sans blocage, ni formation de voûtes au voisinage des armatures.

Lors de l'écoulement d'un BAP, les risques de séparation de la phase granulaire de la pâte sont très élevés, notamment en présence d'armatures. Au coulage du béton, la trajectoire des granulats se trouve modifiée, les granulats ont tendance à converger vers les mêmes endroits en formant des voûtes au voisinage des armatures bloquant alors l'écoulement du béton.

Le principe de cet essai (figure I.10), est de remplir entièrement la partie verticale de la boîte, laisser le béton se reposer 1 min puis enlève la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers le ferrailage. On mesure les hauteurs H_1 et H_2 et on exprime le taux de remplissage H_2/H_1 .

Notions que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrailés. Selon le groupe association française de génie civil AFGC [1], le taux de remplissage doit être supérieur à 0,8.

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, il convient donc de diminuer le rapport G/S (augmenter la quantité de sable, ou diminuer celle des graviers), ou d'augmenter le volume de la pâte en maintenant le rapport E/C constant.



Figure I.10 : boîte en L.

I.7.2.3 Essais de ségrégation statique (Essai de la stabilité au tamis)

Une résistance à la ségrégation statique se traduit par la capacité qu'a un BAP à maintenir ses particules en suspension, sans risque de tassement des particules par gravité, ni ressuage.

Pour caractériser la ségrégation statique d'un BAP on utilise l'essai de stabilité au tamis (figure I.11). L'essai est développé par la société « GTM construction », il permet de qualifier les BAP vis à vis du risque de ségrégation. Il s'agit de verser 10 litre du béton juste après le malaxage dans un sceau, puis couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation et laisser reposer durant 15 mn. Verser 5 kg du béton au centre d'un tamis 5mm, à une hauteur de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient. Après 2mn On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers le tamis [1].



Figure I.11 : Essai de la stabilité au tamis.

Critères d'acceptabilité :

La mesure du pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton autoplaçants de la façon suivante :

- $0\% \leq \text{Plaitance} \leq 15\% \rightarrow$ stabilité satisfaisante.
- $15\% < \text{Plaitance} \leq 30\% \rightarrow$ stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser in situ)
- $\text{Plaitance} > 30\% \rightarrow$ stabilité très mauvaise.

Ces critères sont particulièrement adaptés aux applications en éléments verticaux.

I.7.2.4 Ressuage

Un BAP doit maintenir sa fluidité pendant la durée nécessaire pour son acheminement et sa mise en place. Or, pendant ce temps en vertu de la loi de la gravité, les matières solides ont

tendance à s'enfoncer, tandis qu'une partie de l'eau de gâchage et des fines remontent en surface de l'échantillon de béton frais, créant ainsi le ressuage.

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, figure I.12). le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit employé.

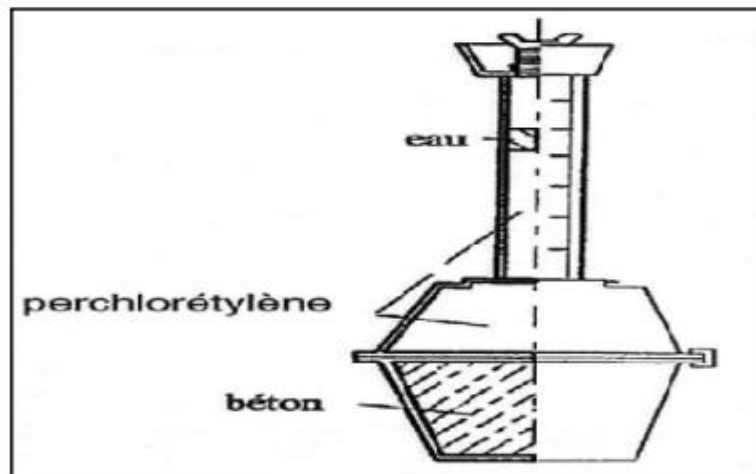


Figure I.12: Essai de ressuage à l'aéromètre .

I.8 Propriétés des BAP à l'état durci

Dans cette partie, nous résumons les différences qui existent entre les propriétés des bétons autoplaçants à l'état durci et celles des bétons ordinaires. Elles sont étudiées sous deux aspects, les propriétés mécaniques d'une part et physico-chimiques (durabilité) d'autre part.

Les principaux résultats présentés proviennent de la recherche effectuée au sein du LMDC, Des résultats expérimentaux ont été obtenus sur plusieurs séries d'échantillon [2], constitués des mêmes matériaux, même squelette granulaire (sauf les BHP) et de classes de résistance relatives à des bétons de bâtiment (20 MPa), des bétons d'ouvrage (40 MPa) et des bétons à hautes performances BHP (60 MPa).

I.8.1 Propriétés mécaniques

I.8.1.1 Résistance mécanique

Considéré comme un mélange diphasique à l'état frais (phases solide et liquide), le béton autoplaçant possède une structure plus homogène que le béton ordinaire vibré, grâce notamment

à une résistance à la ségrégation élevée, conférant au béton autoplaçant une amélioration de résistance mécanique.

Les bétons autoplaçants présentent souvent une résistance mécanique plus élevée qu'un béton ordinaire à un rapport E/C équivalent [3].

Les usages des fillers dans la formulation des BAP génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges. Lorsqu'elles sont bien dispersées dans le béton, les particules fines des fillers favorisent l'hydratation du ciment, et formation une matrice cimentaire de structure plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.



Figure 1.13: Mesure de la résistance à la traction par flexion

I.8.1.2 Module d'élasticité statique (en compression)

Des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires vibrés à résistance mécanique égale sont testés par [2]. Pour des rapports gravier sur sable G/S similaires, le module d'élasticité des BAP est équivalent avec des BO. Par ailleurs, pour des rapports G/S différents, le module d'élasticité des BAP est inférieur à celui des BO. Ceci est expliqué par le fait que le volume de pâte est plus important pour les bétons autoplaçants.

En effet, le module d'élasticité d'un béton est fonction des proportions volumiques de ses constituants et de leurs modules respectifs (le module de la pâte est bien inférieur à celui des granulats).

I.8.1.3 Retrait au jeune âge (0-24 heures)

Pour une même classe de résistance, le coefficient de dilatation thermique au jeune âge (0-24 heures) est équivalent pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires [1]. Le retrait au

jeune âge en dessiccation des bétons autoplaçants est supérieur à celui des bétons ordinaires (en particulier pour les faibles gammes de résistance).

I.8.1.4 Retrait à l'état durci

En dessiccation, les bétons autoplaçants et les BO vibrés possèdent en général un retrait total équivalent. Cependant, les deux types de bétons affichent une différence pour les gammes de résistance élevées (pour les BHP), où le retrait des BAP est supérieur. En mode endogène, les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires présentent un retrait similaire à 28 jours.

Au-delà d'un an, les BAP présentent un retrait légèrement supérieur à celui des BO. Il est vraisemblable que les légères différences entre les retraits des deux types de béton sont dues au volume de pâte qui est plus important dans les bétons autoplaçants [1].



Figure I.14 : Appareil de mesure de retrait « Réfractomètre ».

I.8.1.5 Déformations et fluage

Les bétons autoplaçants subissent des déformations différées sous charge plus importantes que celles des bétons ordinaires vibrés dans la même gamme de résistance.

Les déformations spécifiques propres et totales ainsi que le fluage spécifique sont légèrement supérieures dans le cas des bétons autoplaçant [1], sauf pour la gamme de résistance relative aux bétons de bâtiment pour lesquelles ces paramètres sont identiques entre béton autoplaçant et BO.

I.8.2 Propriétés physico-chimiques

Dans le domaine physico-chimique, les résultats des essais expérimentaux (perméabilité à l'oxygène, diffusion des ions chlore, absorption d'eau, carbonatation accélérée et lessivage au nitrate d'ammonium) ont été comparés en fonction de la résistance mécanique pour les deux types de béton (BAP et BO). La perméabilité à l'oxygène des bétons autoplaçants est inférieure à celle des bétons ordinaires vibrés pour une gamme de résistance donnée. Il n'y a pas de

différence significative entre les BAP et les BO en termes de diffusion des ions chlore et d'absorption d'eau par capillarité. Et toujours à résistance équivalente, le taux de carbonatation et la cinétique de lessivage au nitrate d'ammonium des deux types de béton restent comparables. Ces propriétés évoluent avec la résistance en compression de manière identique pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires [1].

I.9 Fabrication, transport et mise en place des BAP

I.9.1 Fabrication des BAP

En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP, Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celles recommandées pour les bétons vibrés, en les adaptant aux conditions locales dans chaque cas particulier.

L'intensité et le temps de malaxage ainsi que l'ordre d'introduction des constituants sont des facteurs qui influent fortement sur l'homogénéité du béton, sur l'effet optimal des additions et des adjuvants, c'est la raison pour laquelle on fixe le temps de malaxage à 120 secondes, cette moyenne peut être ajustée selon l'efficacité du malaxeur.



Figure 1.15: Fabrication des BAP

I.9.2 Transport des BAP

En raison de sa fluidité élevée, le béton autoplaçant doit être transporté en camion malaxeur. Comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le

transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres : le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température.

Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier. Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé pour assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. En revanche tout ajout d'eau est à proscrire

I.9.3 Mise en place des BAP

Par rapport au béton vibré la mise en place du béton autoplaçant est grandement facilitée, elle peut être réalisée par une seule personne et selon trois méthodes différentes, La première méthode est utilisée pour les bétons ordinaires vibrés, la mise en place se fait à l'aide d'une goulotte. Pour limiter le phénomène de ségrégation favorisé par ce procédé il convient de fixer la hauteur de chute maximale du béton à 5m.

La deuxième méthode consiste à utiliser un tube plongeur immergé dans le béton frais dans la partie inférieure du coffrage.

La mise en place des BAP peut se faire par pompage, par cette troisième méthode il y a une réduction du bullage et obtention de parements lisses. Pour réussir les ouvrages en béton autoplaçant il est capital d'appliquer scrupuleusement les recommandations de fabrication, de transport et de mise en œuvre.

10 Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée afin de se familiariser avec les bétons autoplaçants, l'objectif étant définir, ainsi que leurs multiples propriétés, la caractéristique, et résumer les principales méthodes de leur formulation

Le béton autoplaçant est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage).

Les propriétés caractéristiques de ce béton à l'état frais sont :

- fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation
- capacité de passage dans les milieux confinés

Meilleure aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de ferrailage dense, le fastidieux travail de vibration est ainsi supprimée.

Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés, un grand nombre de tests empiriques sont développés pour caractériser le béton vis-à-vis des propriétés d'ouvrabilité.

A l'état durci le béton doit être garantir une durée de vie prolongée de la structure et des performances mécaniques donc une résistance élevée et une perméabilité minimale sont exigées pour celui-ci.

L'étape de formulation consiste une proportion optimale et bien précise des différents constituants dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques du béton.

Le facteur le plus important dans la formulation d'un BAP est l'eau en effet, le principe de ce type de béton est de diminuer la quantité d'eau utilisée tout en assurant une bonne maniabilité à l'état frais ,la diminution de la teneur en eau conduit à de bonnes caractéristiques mécaniques.

Depuis l'invention du béton autoplaçant, aucune méthodologie pratique de formulation n'a été établie, les différentes propriétés recherchées rendent la formulation du BAP relativement compliquée.

Toutes les méthodes trouvées dans la littérature demandent un certain nombre d'essais pour caractériser les constituants ou leurs interactions, les essais en laboratoire sont pratiquement indispensables à une formulation scientifique des BAP.