**I.1. Introduction**

Les bétons autoplaçants (BAP), développés depuis une vingtaine d’années, sont encore à l’heure actuelle qualifiés de « nouveaux bétons » car leur utilisation reste modeste bien qu’ils possèdent un fort potentiel de développement.

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu’ils sont extrêmement fluides et qu’ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l’effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d’architecture complexe et difficilement accessibles.

La suppression de la phase de vibration présente également l’intérêt d’améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine.

Cependant, malgré les aspects intéressants qu’ils proposent, en particulier à l’état frais, et leur utilisation en constante augmentation, les BAP ne disposent pas encore du recul nécessaire et suffisant pour être acceptés par tous les maîtres d’ouvrage et maîtres d’œuvre ce qui limite encore leur diffusion.

Les premiers Béton Autoplaçant (BAP) ont été développés en 1988 par Pr. Okamura de l’université de Kochi au Japon. La première utilisation pratique intervient deux années plus tard pour la construction d’un pont. La fin des années 90 ont vu apparaître les premières applications en Suède, en France, aux pays bas et en Suisse. Depuis, son utilisation ne cesse de croître.

**I.1.1. Définition**

Les BAP ou les bétons auto compactant sont des bétons très fluides, homogènes et stables qui se mettent en place sans vibrations mais sous l’effet de la gravité. Ils sont considérés comme des suspensions de particules solides. Ils ne doivent pas subir de ségrégation et présenter des qualités rhéologiques et mécaniques comparables à celles d’un béton vibré classique. L’Association Française de Génie-Civil définit les BAP dans ses recommandations provisoires comme des bétons « très fluides, homogènes et stables». Les termes qui définissent ces bétons sont :

* Béton Auto compactant
* Béton hyper fluide
* L’appellation la plus utilisée aujourd’hui est Béton Autoplaçant (BAP).

**I.1.1.1. Type de béton autoplaçant**

Il y a deux types de BAP selon leur mise en œuvre :

* Les BAP : ce type de béton est largement utilisé aux applications verticales (Murs, cheminées,…etc.).
* Les bétons autonivelants (BAN) : ce type de béton est largement utilisé aux applications horizontales (Planchers, couvertures,…etc.).

**I.1.1.2. Avantages du BAP**

* Diminution du bruit (pour la mise en place traditionnelle par vibration, nous avons recours à des compresseurs qui fonctionnent avec des bruits sonores très élevés qui portent préjudice aux ouvriers et aux riverains).
* Rendement amélioré et exécution plus rapide.
* Liberté accrue des formes de coffrage.
* Facilité de bétonnage d’éléments exigus.
* Qualité accrue des surfaces de béton.
* Facilité de bétonnage d’élément avec une armature dense ou importante (gain de temps sur les bétonnages).
* Remplissage de parties difficilement accessibles.
* Diminution de la pénibilité du travail et suppression de l’apparition du syndrome de la vibration (une économie de main d’œuvre).

**I.1.1.3. Inconvénients du BAP**

* Coût élevé des matières premières (additions, adjuvants),
* Modifications des outils de fabrication (outils de mise en place). [6]

**I.1.2. Utilisation**

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. 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 de structures pour lesquelles la mise en œuvre d’un béton classique est délicate, c’est-à-dire, présentant :

* Des densités de ferraillage importantes.
* Des formes et des géométries complexes : voiles courbes, etc.
* Des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, etc.
* Des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.
* Des exigences architecturales et de qualité des parements particulières.
* Des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration.

L’expérience acquise durant les dernières décennies a permis d’étendre la classification en fonction des différences existant entre les BAP et de déterminer différents domaines d’emploi, selon leurs propriétés, comme le montre la figure I.1 :



**Figure I.1.** Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP.

Les mesures d’étalement et du temps d’écoulement sont respectivement réalisées au cône d’Abrams et au V-funnel.

En termes de résistances mécaniques, les BAP «ordinaires» aussi bien que les BAP «Hautes Performances» peuvent être mis au point. Bien que leur formulation et leur contrôle, lors de la mise en œuvre, nécessitent une attention particulière, différents exemples ont mis en évidence les possibilités techniques qu’ils offrent.

**I.2. Modes et méthodes de formulations des BAP**

 Par définition, un BAP est un béton très fluide homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d’un béton vibré classique. Le terme béton autonivelant peut aussi être utilisé mais il concerne plutôt des applications horizontales.

La mise au point d’une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d’abord, les constituants sont au nombre de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Ensuite, le cahier des charges d’un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l’état frais ; il faut réaliser, en plus de l’essai au cône, l’essai à la boite en L et l’essai de stabilité au tamis. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d’une pâte fluide est très sensible à la ségrégation.

**I.2.1. L’aspect empirique de la formulation des BAP :**

La plupart des formules de BAP 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.

Mais, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu’il ne concerne que les propriétés à l’état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de BPE est l'industrie du bâtiment, qui utilise principalement des bétons de 25 à 35MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer)

En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût. Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formulateur.

* Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
* Le volume de pâte varie entre 330 et 400 1/m3.
* La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (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 par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux-Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence universelle ; la granulométrie n'est pas suffisante pour décrire un empilement, puisque la forme des grains est un facteur tout aussi essentiel. Ce sont plus des supports qui facilitent la formulation.

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale. Par ailleurs, le diagnostic d'une mauvaise formule est rendu difficile, en centrale à béton, par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication ; par exemple, la teneur en eau exacte du sable fait parfois défaut. On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP.

**I.2.2. Les approche de formulation :**

Il existe dans la littérature des techniques de formulation moins empiriques. Ces méthodes sont basées sur des concepts plus ou moins différents et peuvent être présentées en cinq grandes familles d’approches. Toutes les méthodes de formulation des BAP recueillies dans la littérature sont issues d’une ou plusieurs des approches suivantes :

**1. Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers**

**2. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte**

**3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire**

**4. Méthode basée sur un plan d'expérience**

**5. L’approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE :**

**I.3. Particularités de la composition des BAP**

Selon les constituants on trouve une différence entre le béton ordinaire (BO) et le béton autoplaçant (BAP).Le béton auto-plaçant contient 6 ou 7 composants dont le ciment, l’eau, le sable, les gravillons, une addition (filler calcaire), un superplastifiant et/ou un agent de viscosité et cela afin d'avoir les caractéristiques requises à l'état frais comme le montre la figure suivante



**Figure I.3.** Différence entre les composants d'un BAP et un BO

**I.3.1. Un volume de pâte élevé**

Les frottements entre granulats sont source de limitations 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, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m3)

**I.3.2. Une quantité de fines (Ø < 80 µm) importante**

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500kg/m3) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d’hydratation trop grandes.

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité et les paramètres d’ouvrabilité qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc...), et leur proportion respective. L’introduction d’additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton.

**a) Les cendres volantes**

**b) Fumées de silice**

**c) Laitiers de hauts fourneaux**

**d) Filler calcaire**

**I.3.3. L’emploi de superplastifiants**

L’apparition des bétons autoplaçants est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP). Les superplastifiants permettent en effet de défloculer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L’eau initialement piégée entre les flocs est de nouveau disponible pour l’hydratation ou pour fluidifier le mélange. Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d’eau qu’il n’en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place.



**Figure I.6.**Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment

L’ajout d’un superplastifiant permet ainsi d’augmenter significativement la fluidité des BAP que ce soit du point de vue de leur étalement ou du point de vue de leur seuil d’écoulement

La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d’augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation.

**I.3.4. L’utilisation éventuelle d’un agent de viscosité (rétenteur d’eau)**

L’ajout d’un superplastifiant ayant pour effet d’augmenter l’ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité.

Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l’eau et augmentent la viscosité de celle-ci.

Ils ont pour but d’empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.

Cependant, l’action de ces produits est, d’une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d’un BAP requiert donc la sélection d’un couple agent de viscosité-superplastifiant compatible et l’optimisation de leur dosage.

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n’étant alors pas suffisantes pour fixer l’eau dans le béton. En revanche, leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles (E/fines < 0,3). Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas.

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l’égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d’air excessifs et à une diminution de la fluidité.

**I.3.5 Un faible volume de gravillon**

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l’origine du blocage du béton en zone confinée. Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l’ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons (DMAX) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec DMAX, cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

**I.4. Caractérisation du béton a l’état frais**

Il n’existe pas d’essai standard, ni de critère bien défini pour s’assurer qu’un béton est effectivement autoplaçants. En effet, le comportement spécifique des BAP à l’état frais rend quasi inadaptés la plupart des essais classiques sur les bétons traditionnels : les essais au maniabilimétre ne sont pas possibles en l’absence de vibration et l’essai classique d’affaissement au cône d’Abrams est inopérant, l’affaissement étant ici « total ». C’est pourquoi les chercheurs et les industriels ont d´enveloppé toute une série d’essais plus ou moins complémentaires, mais dont l’interprétation reste bien souvent subjective et dépendante de l’operateur. La figure [1.1](#bookmark11) illustre la diversité des dispositifs expérimentaux proposés par

L’ouvrabilité des BAP se décompose en trois caractéristiques principales :

* Mobilité en milieu non confine (décrit par l’essai d’étalement au cône d’Abrams).
* Mobilité en milieu confine (décrit par l’essai d’écoulement `a la boîte en L).
* Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l’essai de stabilité au tamis) [36].

**I.4.1. Mobilité en milieu non confiné**

**I.4.1.1. Essai d’étalement (Slump flow)**

L’essai d’étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton. C’est une variante de l’essai d’affaissement sur cône d’Abrams qui consiste à mesurer (en utilisant le même matériel) le diamètre d’étalement de la galette de béton sur deux côtés perpendiculaires. Les valeurs sont relevées en millimètres. [4]

Il y a différentes classes d’étalement :

**Tableau 2.**Classe d’étalement [4]

|  |  |
| --- | --- |
| **Classe** | **Etalement (mm)** |
| SF1 (Slump Flow) | 550 à 650 |
| SF2 | 660 à 750 |
| SF3 | 760 à 850 |

Les valeurs d’étalement au cône d’Abrams acceptables pour un BAP sont généralement fixées dans la fourchette de 600 à750 mm (pas de ségrégation visible en fin d’essai c’est-à- dire pas d’amoncellement de gros granulats ni d’auréole de laitance). [4]



**Figure I.11.** Essai d’étalement au cône d’Abrams. [6]

**I.4.1.2. Essai d’entonnoir (V-Funnel)**

La procédure d’essai avec l’entonnoir est la suivante, l’entonnoir dont les dimensions sont définies sur la figure suivante est remplie de béton jusqu’en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l’écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu’à ce que l’entonnoir se soit entièrement vidé. Ce temps d’écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant. Plus le béton s’écoule rapidement hors de l’entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d’écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le BAP. [3]



A) V-Funnel (2001). B) V-Funnel (2002).



C) Funnel du mortier. D) Funnel du fibre.

Le temps d’écoulement au V-Funnel dépend également du type d’application, mais n'est groupé que selon 2 classes :

* + Classe VF1 : temps d’écoulement inférieur à 7s.
	+ Classe VF2 : temps d’écoulement compris entre 7 et 27s.

**I.4.2. Mobilité en milieu confiné**

**I.4.2.2. Essai à la boite en L (L-Box)**

Cet essai 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 au droit des armatures.



**Figure I.14.**Risque de blocage au droit des armatures. [6]

La boite composée de deux parties, une partie verticale et une partie horizontale séparée par une trappe. Des armatures peuvent être intercalées avant la trappe. [4]

Le schéma de la boite ainsi que le principe de l’essai sont décrits sur la figure suivante :



**Figure I.15.**Schéma de principe de l’essai de la boite en L. [36]

* La partie verticale de la boite est remplie de béton qu’on laisse reposer une minute.
* On lève la trappe et on laisse le béton s´écouler à travers le ferraillage.
* Une fois l’écoulement terminé, on mesure les deux hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H2/H1.

Le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur à 0.8. Lorsque le béton s’écoule mal à travers le ferraillage où qu’il y a blocage des granulats, c’est le signe de l’apparition de la ségrégation.

**I.4.3. Stabilité**

**I.4.3.1. Résistance à la ségrégation**

**I.4.3.1.1. Essai de stabilité au tamis**

Cet essai vise à quantifier le risque de ségrégation des BAP. Il permet de compléter l’essai de la boite en L. On prélève un échantillon de 10 litres de béton, après 15 minutes d’attente, on verse sur un tamis d’ouverture 5 mm, une masse de 4.8 kg de béton et on relève la masse de l’échantillon ainsi que celle du fond avec la laitance. [36]



**Figure I.17.**Essai de stabilité au tamis. [6]

On calcule le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l’échantillon :



La mesure de ce pourcentage permet de classer les formules de BAP :

– 0% < P Laitance< 15 % : Stabilité satisfaisante

– 15%< P Laitance< 30 % : Stabilité critique

– P Laitance> 30% : Stabilité très mauvaise

Ces essais permettent d’avoir une vision qualitative des BAP. [36]