
CHAPITRE 2 : BETON AUTO-PLAÇANT

I- PROPRIETES DU BETON AUTO-PLAÇANT A L'ETAT FRAIS ET DURCI

1. INTRODUCTION

Les bétons autoplaçants (BAP) ont été développés au Japon à la fin des années 80. Leur origine semble provenir de la nécessité d'utiliser des matériaux de plus en plus « performants » pour palier une réduction de la qualité des constructions due à une mauvaise mise en place du matériau [Okamura et Ouchi, 2003]. La mise en œuvre d'un béton traditionnel nécessite une phase de vibration afin de remplir correctement les coffrages. Cette étape conditionne la qualité de la structure finale, mais c'est également un travail pénible qui demande un savoir-faire particulier.

La solution proposée a été d'utiliser un matériau très fluide, capable de se compacter sous son propre poids, sans vibration extérieure. Ces matériaux initialement appelés Bétons Hautes performances, sont aujourd'hui connus sous le nom de bétons autoplaçants, bétons autocompactants, ou bétons autonivellants, selon les applications [Okamura et Ouchi, 2003]. Ils connaissent à l'heure actuelle un essor considérable en Europe et aux Etats Unis et prendront dans les années à venir une place de plus en plus importante. Les domaines d'application des BAP sont nombreux, mais leur utilisation implique une évolution ou une adaptation des moyens et des techniques traditionnellement employés.

Nous allons, dans ce chapitre, et au travers ses différents paragraphes, mettre en exergue la composition et la confection d'un béton autoplaçants «BAP», ses caractéristiques et les essais auxquels il doit être soumis à l'état frais.

• LES BETONS AUTOPLAÇANTS

Le béton autoplaçants ou BAP est un béton capable de se mettre en place dans les coffrages les plus complexes et très encombrés uniquement sous l'effet de la pesanteur. Ainsi, ce type de béton ne requiert aucun moyen de vibration pour consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène.

Un BAP doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrées avec, cependant, une vitesse dépendante de la viscosité du mélange. Pour remplir cette condition, le béton doit être très fluide, c'est-à-dire très déformable. Or ceci n'est possible que si le rapport eau/ciment est élevé ou si le béton contient un super plastifiant.

Ces bétons présentent plusieurs propriétés qui justifient l'intérêt nouveau que leur portent les industriels :

- Absence de vibration qui réduit les nuisances sonores.
- Bétonnage de zones fortement ferraillées et à géométrie complexe.
- Pénibilité du travail moindre.
- Réduction du coût de la main d'œuvre, durée de construction plus courte.

Cependant, ces avantages s'accompagnent fatalement de certains inconvénients :

- Augmentation du coût des matières premières (additions, adjuvants).

Modifications des outils de fabrication (outils de mise en place).

• Constituants des Bétons autoplaçant :

Le béton auto-plaçant est composé des mêmes matériaux que le béton ordinaire qui sont ; le ciment, gravillons et eau, avec une différence de taille c'est l'ajout d'une proportion d'additions minéraux (addition calcaire, fumé de silice, cendre volante...). Ces ajouts dans certains cas peuvent être déduits du dosage en ciment. Habituellement, les mélanges chimiques (adjuvant) utilisés sont des réducteurs d'eau de haute gamme (superplastifiant) et agents viscosité, qui changent les propriétés rhéologiques du béton.

Le *Figure* suivante donne les Compositions d'un béton ordinaire (BO) et d'un béton auto-plaçant (BAP). Aspect d'un BO plastique et d'un BAP à l'état frais .

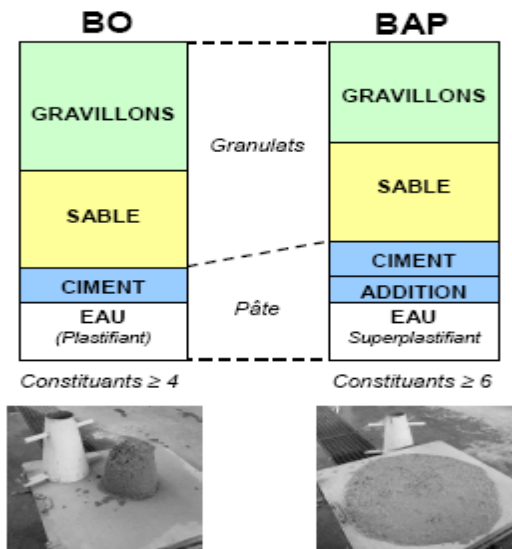


Figure 1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.
Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des formulations appropriées aux BAP. Les compositions tirées de la littérature [20] soulignent deux particularités :

Ces bétons contiennent un volume de fines plus important que les bétons classiques et vibrés et souvent un agent de viscosité.

Les différents constituants, en plus du ciment et de l'eau dosée de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, qui est proposés pour composer les bétons auto-plaçant sont : Les granulats, les fines, les adjuvants et l'agent de viscosité.

2. Propriétés du béton autoplaçant à l'état frais :

2.1. Caractéristiques Rhéologiques des bétons autoplaçant :

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique.

La rhéologie donne les relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume, en tenant compte éventuellement de leur histoire et des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps. Ces relations, dites de comportement, font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées.

A ce jour, les principaux dispositifs expérimentaux utilisés pour des mesures sur béton frais sont :

- le viscosimètre à plaque parallèle BML (utilisé en Islande [Wallevik 90]).
- le rhéomètre coaxial BTRhéom (employé en France [De Larrard 96 b]).
- le rhéomètre coaxial CEMAGREF-IMG (utilisé en France [Hu 95]).
- le rhéomètre coaxial RhéoCAD (mis au point par la société CAD Instrumentation avec l'aide de M. Vernet, ingénieur au CTG, et employé au LMDC [Mouret 03])

Tous ces appareils mesurent le couple résistant du béton en fonction de la vitesse d'écoulement imposée (par mise en rotation de divers mobiles ou palettes). Ces deux données permettent ensuite d'obtenir, par différents calibrages, les grandeurs caractéristiques de l'écoulement du béton, à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

Cependant, la présence de granulats de tailles variées dans le béton ne permet pas de définir un matériau type pour tous ces rhéomètres, qui servirait de référence à toutes les mesures. Par conséquent, étant donné les caractéristiques inhérentes à chaque rhéomètre, les comparaisons des résultats d'un appareil à l'autre ne sont pas forcément évidentes.

2.2. Caractérisations à l'état Frais des bétons autoplaçant :

Il n'existe pas d'essais standard, ni de critères bien défini pour assurer qu'un béton est effectivement autoplaçant. En effet, le comportement spécifique des BAP à l'état frais rend quasi inadaptés la pluparts des essais classiques sur les bétons traditionnels :

Les essais en maniabilimètre ne sont pas possibles en l'absence de vibrations 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 développé toute une série d'essais plus au moins complémentaires, mais dont l'interprétation reste bien souvent subjectif et dépendante de l'opérateur.

Dans la suite de l'étude seront présentés les essais proposés par l'AFGC qui servent actuellement de référence à défaut d'être normalisés. Les résultats de ces essais permettent de donner une vision qualitative pour les BAP.

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

- 1) Mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement en cône d'abrams).
- 2) Mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L).
- 3) Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis).

2.2.1. L'essai d'étalement(EN 12350-8) :

Pour la détermination de l'étalement (Slump flow), on utilise le même cône que celui utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli du béton auto-plaçant.

Le cône est ensuite soulevé et le BAP sort en formant une galette qui s'élargie 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 du béton ainsi obtenu, qui devrait être comprise entre 650 et 750mm. La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être repartis uniformément et aucune concentration où séparation de fines ne devrait apparaitre sur les bords de la galette. Il est utile de documenter le résultat de cet essai au moyen de photographies.

La façon de disposer le cône n'est pas réglementé en suisse par une norme. L'important est de procéder toujours de la même manière. Lorsque la petite ouverture se trouve en bas (figure 2), le remplissage du cône avec le BAP est facilité et son soulèvement est empêché. Dans ce cas, il en résulte une valeur d'étalement plus élevée de 20 à 40 mm par rapport à celle obtenue avec le cône disposé en sens contraire pour le même béton.

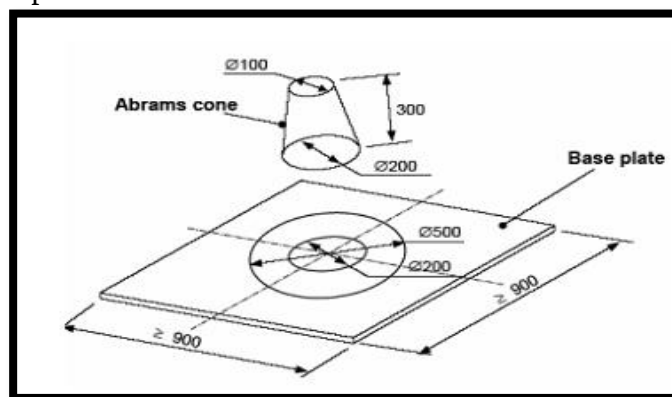


Figure 2: essai d'étalement (slump flow).

En 2002, les recommandations en termes d'étalement admissible définissaient la fourchette : 600 à 750 mm. Depuis différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application. Ainsi, différentes classe d'étalement ont été définies :

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm.
 - Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm.
 - Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm.
-

➤ La vitesse d'écoulement : on mesure le temps d'écoulement que met le béton au cours de l'essai d'étalement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50cm. Ceci donne une idée moyenne sur la viscosité qui est une propriété rhéologique importante. La valeur typique de la vitesse d'écoulement est de 6,25 à 2,5 cm/s ; ceci correspond à un temps d'écoulement T_{50} varié entre 4 à 10 secondes.

2.2.2. Essai à la boîte en L (EN 12350-10) :

La boîte en « L » (figure 3) permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas empêchée par des phénomènes de blocage.

La procédure d'essais dans la boîte en L est la suivante :

La partie verticale de la boîte est remplie du béton. En suite le volet est soulevé après une minute de repos, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer à travers d'un grillage, formé de trois barres d'armatures diamètre de 12mm, distantes de 59 à 41mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton (H_1 et H_2), afin de qualifier sa capacité d'auto-nivellement. Le rapport H_2/H_1 devrait être supérieur à 0,8 pur les BAP (AFGC 2000).

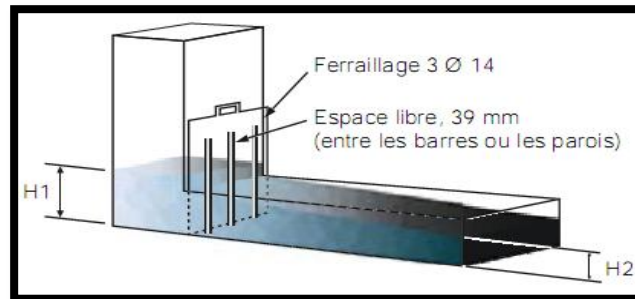


Figure 3: essai de la boîte en L.

2.2.3. Essai de stabilité au tamis (EN 12350-11) :

Il consiste de mesurer la proportion π d'étalement fin du béton (laitance) passant à travers d'un tamis d'ouverture 5mm (figure 4) pour qualifier le béton vis-à-vis du risque de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non.

La procédure d'essais de stabilité au tamis est décrite comme suite :

A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés d'un seau. Après une attente de quinze minutes, une masse de 4,8 Kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5 mm. Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de la pate (laitance) ayant traversé le tamis. Un pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation.

La stabilité au tamis π est calculée par la formule suivante :

$$\pi = (P_{\text{laitance}} / P_{\text{échantillon}}) \cdot 100\%$$

Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes :

- $0\% < \pi(\text{laitance}) < 15\%$: stabilité satisfaisante.
- $15\% < \pi < 30\%$: stabilité critique.
- $\pi > 30\%$: stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).

L'AFGC a proposé en plus un essai de mesurer du ressuage, qui semble avoir été abandonnée aujourd'hui, car peu pertinent (le ressuage est faible chez les BAP) et très contraignant (utilisation d'un liquide nocif).

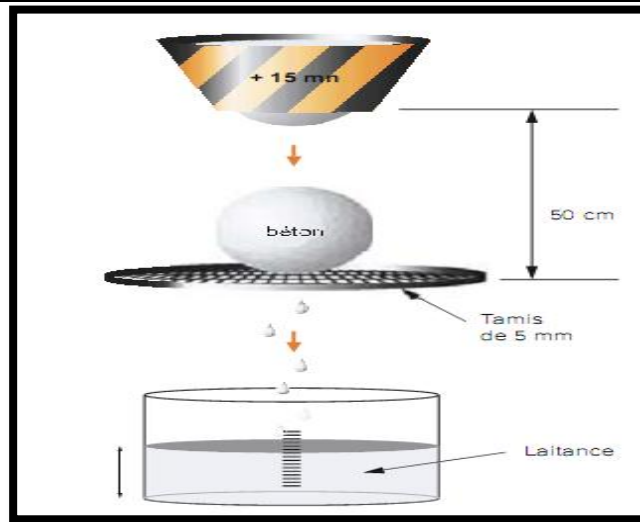


Figure 4: essai de stabilité au tamis.

2.2.4. L'essai d'étalement modifié (EN 12350-12) :

L'essai de d'étalement modifié (j-Ring) (figure 5) fut développée au japon et consiste à faire s'écouler le béton au travers des barres d'armatures afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir de cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300mm de diamètre sont soudées des barres d'armature diamètre 16 à 18 mm, espacés régulièrement d'environ de deux fois et demi de leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchés de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière en uniforme à travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats parait homogène aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

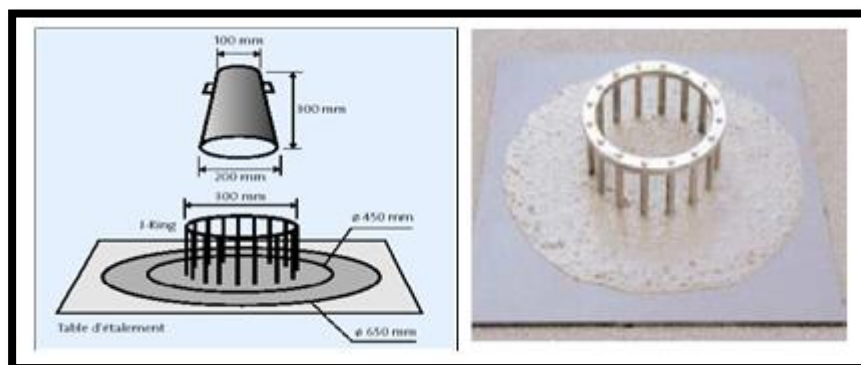


Figure 5: essai d'étalement modifié.

2.2.5. Essai de l'entonnoir(EN 12350-9) :

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante :

L'entonnoir dont les dimensions sont définis à la (figure 6) est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base et en suite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, le temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto-plaçant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 9 et 25 secondes est recommandé pour les BAP.

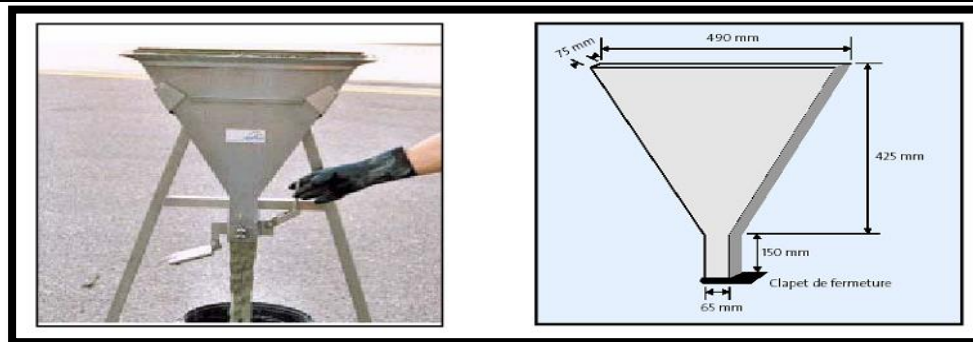


Figure 6: entonnoir a mortier.

- Le tableau 01 ci-après donne les valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAP :

Etalement	60 cm à 75 cm
H_2/H_1	$\geq 0,8$
Laitance	$\leq 15\%$
Ecoulement à l'entonnoir	9 à 25 secondes
Etalement modifié	visuel

Tableau .1 : les valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAP

2.3. Mise en œuvre des BAP :

On peut résumer à trois les modes de mise en place des bétons autoplaçants dans des coffrages.

- Le premier consiste à déverser le béton par le haut du coffrage. Cette technique traditionnelle, commune aux bétons courants, a plusieurs inconvénients. Tout d'abord, elle augmente les phénomènes de ségrégation du béton dus à sa chute dans les coffrages. Ensuite, elle favorise la présence de bulles et de taches sur le parement et accentue le lessivage de l'agent de décoffrage utilisé. Il convient donc de réduire le plus possible la hauteur de chute pour améliorer la qualité d'aspect des parements.
- Le deuxième se fait par l'intermédiaire d'un tube plongeur introduit depuis le haut du coffrage. Cette méthode a pour avantage de limiter les effets de la chute du béton frais dans les coffrages et est utilisée pour les éléments verticaux de grande hauteur.
- Le troisième correspond à l'injection du béton par le bas de la banche à l'aide d'une pompe. Ce procédé évite la chute du béton, diminue la présence de bulles sur le parement et favorise l'auto-nivellement, mais nécessite une adaptation des banches et la présence d'une pompe (ce qui libère en contrepartie la grue).

Quelle que soit la méthode de mise en œuvre choisie parmi ces trois, la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages doit être réduite pour éviter la ségrégation dynamique du béton. Il est recommandé de limiter cette longueur à un maximum de 10 m (TC SCC RILEM).

Quant à la pression exercée par les BAP sur les coffrages, les données de la littérature en 2001 semblaient se contredire. Dans un souci de sécurité, la poussée du béton frais en pied de coffrage était prise égale à la pression hydrostatique. Depuis, les mesures réalisées sur le site de Guerville dans le cadre du Projet National BAP indiquent que la vitesse de remplissage du coffrage constitue un paramètre majeur dans l'intensité de la poussée sur les coffrages : une vitesse rapide amène à une poussée hydrostatique.

D'autre part, des précautions de mise en œuvre des BAP concernent l'étanchéité des coffrages dont il faut colmater les ouvertures vis-à-vis des pertes éventuelles de laitance (précautions identiques à celles pratiquées pour les bétons fluides classiques).

Enfin, les cures post-bétonnage des BAP sont essentielles pour limiter l'évaporation, étant donné la sensibilité de ces derniers au retrait plastique due à leur faible ressuage.