

BÉTONS AUTO-PLACANTS

François CUSSIGH

GTM Construction

1. INTRODUCTION

Depuis sa création au Japon à la fin des années 1980, la technologie nouvelle des bétons auto-plaçants s'est progressivement développée en Europe et s'affirme désormais comme une technique porteuse qui remplacera à terme la technique classique des bétons vibrés dans bon nombre d'applications.

Par béton auto-plaçant (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.

Pour répondre à un besoin urgent de référentiel technique sur le sujet, le groupe de travail AFGC « Bétons auto-plaçants » a produit des recommandations provisoires publiées en juillet 2000. Ce document a servi de base au montage du Projet National B@P qui rentre maintenant dans sa dernière phase et vient compléter ces recommandations.

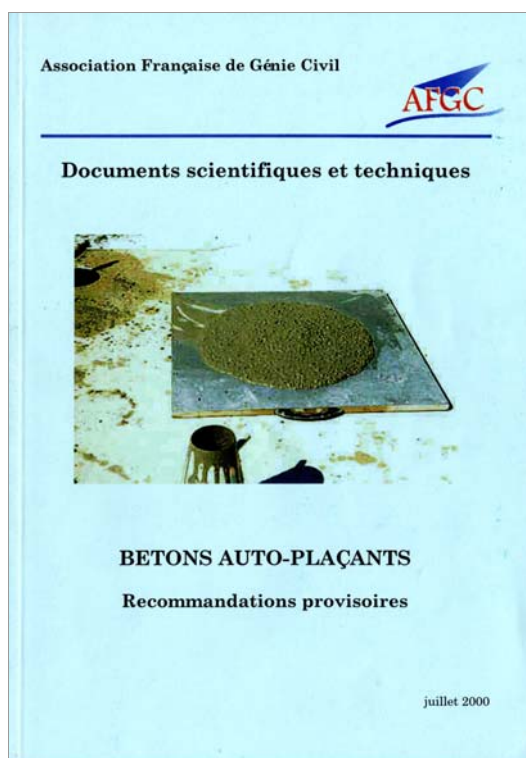


Photo 1 : Recommandations BAP – AFGC

Les résultats obtenus dans le cadre du PN B@P confirment que les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont comparables à l'état durci aux bétons ordinaires vibrés de même résistance mécanique.

2. PROPRIÉTÉS DES BAP A L'ÉTAT FRAIS

Les propriétés à l'état frais sont caractérisées par différents essais et les critères de résultats pour ceux-ci permettent de donner une définition quantitative pour les BAP :

- Les valeurs cibles d'étalement au cône d'Abrams sont généralement fixées dans la fourchette 60 cm à 75 cm (et pas de ségrégation visible en fin d'essai : auréole de laitance ou amoncellement de gros granulats au centre).
- Le taux de remplissage à la boîte en L doit être supérieur à 0,8. Pour les ouvrages de génie civil fortement ferrailés on adoptera le ferrailage conventionnel mais pour des configurations plus simples on pourra utiliser un dispositif allégé du ferrailage dans la boîte en L.
- Le béton doit être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée. L'absence de ségrégation visuelle lors de l'essai d'étalement au cône d'Abrams n'est pas suffisante. Des essais de ségrégation ont été développés et permettent d'apprécier la résistance à la ségrégation des BAP.

Des campagnes expérimentales spécifiques ont été menées au sein du PN B@P et ont permis d'améliorer certains modes opératoires et d'étudier la répétabilité et reproductibilité des essais de caractérisation des BAP à l'état frais. Il a ainsi été vérifié que ces essais pouvaient être utilisés en pratique avec une précision satisfaisante.

Certains bétons fluides bien qu'usuellement mis en œuvre sans vibration tels les bétons de pieu ou paroi moulée, bétons immergés ou remblais autocompactants sont exclus du cadre des recommandations AFGC mais il est utile d'observer que l'on peut décliner plusieurs familles de BAP en fonction des applications.

Le Projet National s'est précisément attaché à définir des catégories de BAP en fonction des utilisations, sur la base en particulier des résultats obtenus sur le chantier expérimental de Guerville.



Photo 2 : Voiles réalisés à Guerville

Les BAP sont ainsi classés en trois catégories (numérotées de 1 à 3) suivant leur domaine d'utilisation.

Le classement s'effectue suivant la sensibilité de l'élément à bétonner au blocage (notion de confinement) et à la ségrégation (notion de hauteur pour la ségrégation statique et de confinement pour la ségrégation dynamique).

Pour le blocage, on utilise la notion d'intervalle d'écoulement. Ce paramètre (noté I) est défini comme l'intervalle le plus petit que doit passer le béton auto-plaçant pour se mettre en place. Il tient compte de la géométrie des coffrages, de la disposition des armatures et des différents accès à un point donné pour le béton.

Exemples :

- voiles de bâtiment d'épaisseur 16 cm, enrobage 2 cm avec deux nappes de treillis soudé $\varnothing$ 6 mm (maille 200 mm x 200 mm) :
 $I = 160 - 2 \times 20 - 2 \times 6 = 108$ mm (espace libre entre les deux nappes de treillis soudé),
- semelle de pile de pont avec un ferrailage inférieur de maille 100 mm x 100 mm en HA32 :
 $I = 100 - 32 = 68$ mm (espace libre entre les armatures),
- radier de bâtiment avec un ferrailage inférieur de maille 80 mm x 100 mm en HA20 :
 $I = 80 - 20 = 60$ mm (espace libre entre les armatures).

La catégorie 1 correspond aux BAP utilisés dans le cas de coulages horizontaux de faible épaisseur (inférieure ou égale à 300 mm) et ayant un intervalle d'écoulement supérieur à 100 mm (communément appelés BAN).

La catégorie 2 couvre principalement les BAP utilisés pour des applications horizontales de forte épaisseur (supérieure à 300 mm) ou pour des coulages courants en vertical. L'intervalle d'écoulement I est supérieur ou égal à 80 mm.

La catégorie 3 est réservée aux BAP pour lesquels l'intervalle d'écoulement I est inférieur à 80 mm (parties d'ouvrage exigües ou fortement ferrillées).

Pour les catégories 2 et 3, on distingue de plus deux sous-classes (2a, 2b et 3a, 3b) en fonction de la longueur maximale de cheminement horizontal du BAP (5 m pour 2a et 3a, 10 m pour 2b et 3b) car il a été confirmé lors des essais sur le site de Guerville que celle-ci était un paramètre important vis-à-vis de la ségrégation dynamique.

3. QUALIFICATION DE LA FORMULATION

En fonction des spécifications propres à une catégorie donnée, le formulateur doit adapter la composition du BAP afin de respecter les critères du tableau suivant qui permettent, sauf dans le cas où on aurait un confinement très fort (intervalle d'écoulement inférieur à 60 mm) de garantir la qualité du béton in situ sans devoir passer par des essais en vraie grandeur.

	Cat. 1	Cat. 2a	Cat. 2b	Cat. 3a	Cat. 3b
Valeur limite au tamis ⁽¹⁾	Inférieure à 20 %	Inférieure à 20 %	Inférieure à 15 %	Inférieure à 15 %	Inférieure à 10 %
Valeur limite de la boîte en L	Pas de prescription particulière	0,80 mini avec 2 barres	0,80 mini avec 2 barres	0,80 mini avec 3 barres	0,80 mini avec 3 barres

⁽¹⁾ La valeur limite autorisée au tamis ne peut en aucun cas être supérieure à 30 %, elle peut être supérieure à la valeur spécifiée dans le tableau si l'on dispose de mesures probantes de non-ségrégation pour des applications similaires. Il ne doit pas y avoir de signe de ressue lors de l'essai.

Les seuils du tableau correspondent aux valeurs à respecter au stade de la qualification de la formulation. Ils sont à respecter pendant toute la durée pratique d'utilisation T_m .

Dans tous les cas, les BAP ne doivent présenter aucun signe visible de ségrégation ou de ressuage lors de l'essai d'étalement.

La valeur cible d'étalement est à fixer en fonction des conditions de mise en œuvre et des propriétés de la formulation, elle n'a volontairement pas été corrélée avec le classement des catégories définies ci-avant. On pourra aussi prochainement utiliser des classes d'étalement lorsque celles-ci seront intégrées à la norme NF EN 206-1 :

Classe	Etalement (mm)
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

Il est évident que la seule mention de la classe de consistance S5 ne permet pas de définir correctement une formule de BAP.

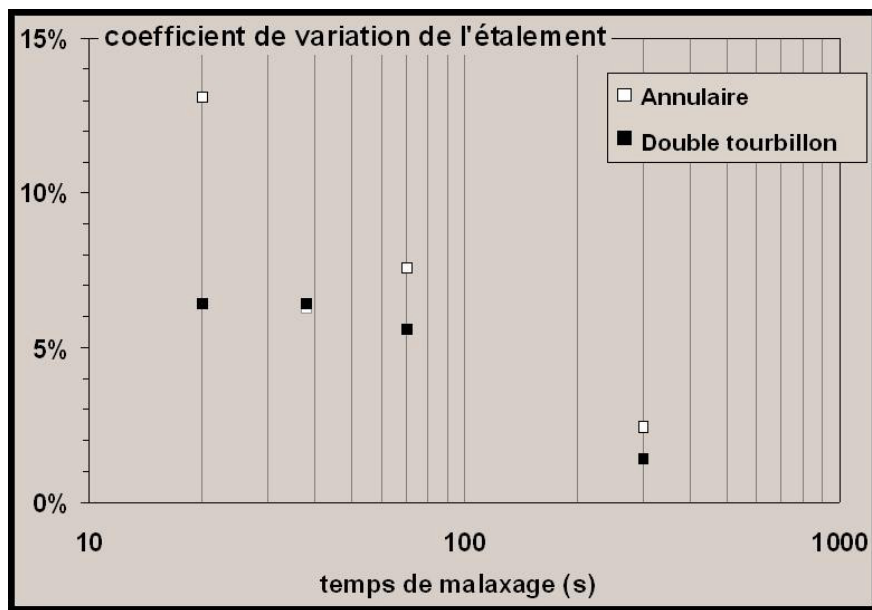
Le Projet National B@P a choisi, après discussions, de ne pas axer les recherches sur les méthodes de formulation. Il n'existe pas de méthode universelle reconnue et il faut prendre en compte le fait que, contrairement aux bétons ordinaires vibrés, la batterie des essais de qualification constitue le meilleur garant de la qualité du béton. En particulier l'optimisation du squelette granulaire est incontournable lorsqu'on formule un BAP afin d'obtenir des résultats satisfaisants de résistance à la ségrégation et d'écoulement en milieu confiné. Dans tous les cas, pour concilier la grande fluidité et la résistance à la ségrégation, le formulateur devra utiliser un fort volume de pâte avec un fort dosage en fines (ciment + addition), une teneur en eau limitée, un faible volume de gravillon et du superplastifiant. Les essais de retrait réalisés lors du Projet National ont confirmé que le dosage en ciment devait être minimisé et que l'incorporation de fines complémentaires (additions, fines de concassage) était une solution à privilégier.

En parallèle, l'accent a été mis sur les méthodes de qualification de la formulation et en particulier sur la vérification de la sensibilité du BAP aux écarts de composition et principalement aux variations de teneur en eau. Cette sensibilité doit être compatible avec les méthodes et moyens de fabrication et ce point pose encore problème actuellement et freine le développement des BAP. Il est nécessaire d'améliorer les techniques de fabrication (amélioration du matériel en particulier).

4. FABRICATION ET TRANSPORT

Les essais effectués au SEMR de Blois et au LCPC de Nantes ont montré que les sondes d'humidité les plus performantes permettaient d'atteindre une maîtrise de la teneur en eau du béton dans le malaxeur à plus ou moins 10 litres par mètre cube, ce qui se révèle souvent une variation trop importante pour que le BAP conserve les propriétés requises. Des études complémentaires ont donc été menées pour apporter des outils complémentaires axés sur la mesure de la teneur en eau directement dans le malaxeur. Des systèmes de ce type existent dans l'industrie de la préfabrication mais sont en général utilisés pour fabriquer des bétons secs et sans les contraintes du béton coulé en place pour ce qui concerne la cadence de production de la centrale. De nouveaux matériels (sonde micro-onde tournante en particulier) ont été récemment développés avec des résultats prometteurs.

Le temps de malaxage des BAP n'a pas besoin d'être fortement augmenté par rapport aux bétons ordinaires vibrés, de nombreux essais ont été effectués et ont mis en évidence l'influence du type de malaxeur sur la vitesse d'homogénéisation du BAP.



Graph 1 : Influence du type de malaxeur sur la vitesse d'homogénéisation

Une autre campagne a été consacrée à l'étude de l'influence du transport en camion-malaxeur et a montré qu'un complément de malaxage pouvait être apporté au béton durant le transport. De même, il est possible, dans des conditions particulières qui demandent le respect de procédures rigoureuses, de procéder à tout ou partie de l'adjuvantation en camion-malaxeur. Ceci tient au fait que le malaxage peut être décomposé en deux phases : une phase de répartition et une phase de dispersion. La première est la phase où les éléments granulaires et l'eau se mélangent jusqu'à une distribution uniforme et isotrope. La seconde fait intervenir les réactions physico-chimiques naissant dès le contact du liant avec l'eau et les adjuvants. Elle nécessite une puissance de cisaillement nettement moins élevée que la phase de répartition.

On voit donc que le principal obstacle à lever est la maîtrise de la régularité du dosage en eau mais que le malaxage ne présente pas de difficultés majeures.

5. MISE EN OEUVRE

Le fort potentiel des BAP se heurte aussi à l'inertie existante au niveau des techniques de construction et de mise en œuvre. Là aussi des adaptations sont nécessaires, en particulier en termes de méthodes et d'organisation de chantier.

Les avantages offerts par les BAP sont nombreux et concernent à la fois les conditions de travail (bruit, pénibilité, réduction des accidents du travail), la productivité (réduction des délais de gros-œuvre) et la qualité. Les contraintes de mise en œuvre des BAP sont nettement moindres que celles concernant les bétons ordinaires vibrés. En effet, on peut autoriser des hauteurs de chute importantes (5 m n'est pas un problème) et des cheminements horizontaux considérables (jusqu'à 10 m). Leur grande fluidité et leur long maintien rhéologique habituel conduisent le plus souvent à prendre en compte des pressions hydrostatiques pour calculer la poussée sur les coffrages (les essais effectués à Guerville avec des vitesses de montée supérieures à 12 m/h ont conduit à des pressions de type hydrostatique). Ils se transportent facilement par pompage et se prêtent bien aux techniques d'injection en coffrage.

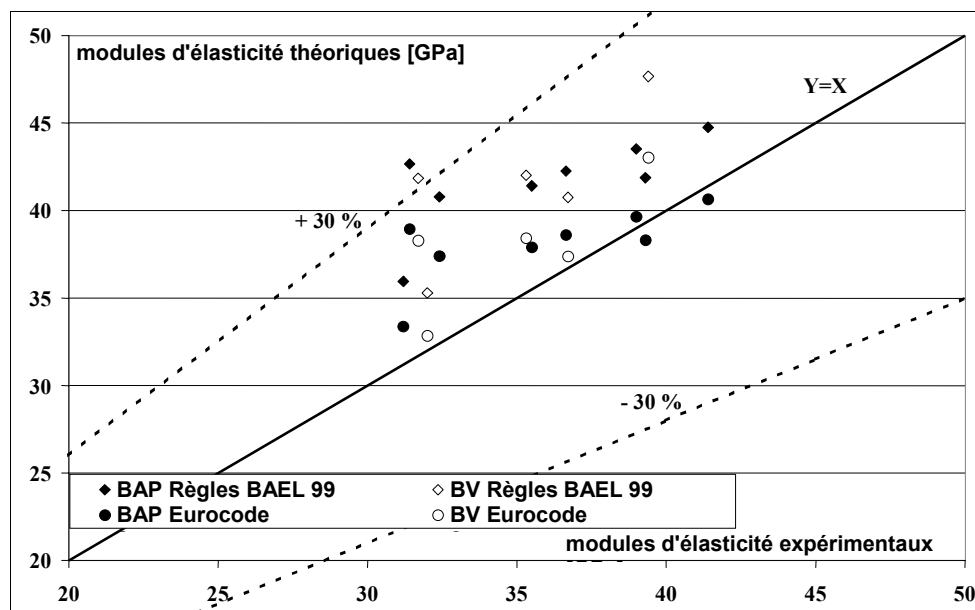


Photo 3 : Injection de BAP par le bas

6. PROPRIÉTÉS A L'ÉTAT DURCI

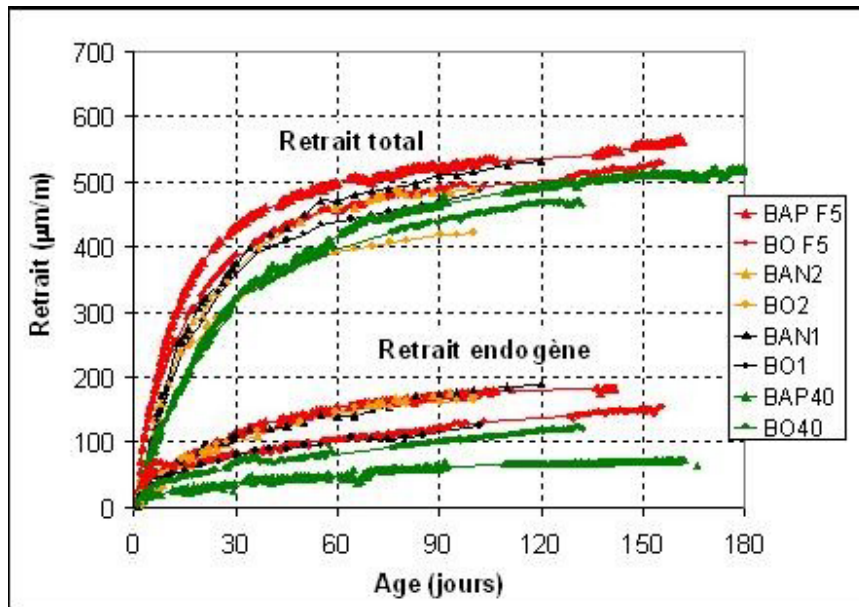
On voit donc que de nombreux avantages sont associés à leur performance particulière à l'état frais, et le PN B@P s'est attaché à vérifier qu'il n'existait pas de « contre-performance » à l'état durci. En particulier sur le sujet des déformations différées (retrait-fluage), des comportements similaires à ceux des bétons ordinaires vibrés équivalents ont été observés. Les résultats obtenus montrent que les différences avec les bétons ordinaires vibrés sont limitées et dans le domaine d'incertitude des modèles réglementaires.

Les modules d'élasticité peuvent être un peu diminués (jusqu'à environ 10%) mais restent principalement influencés par la nature des granulats.



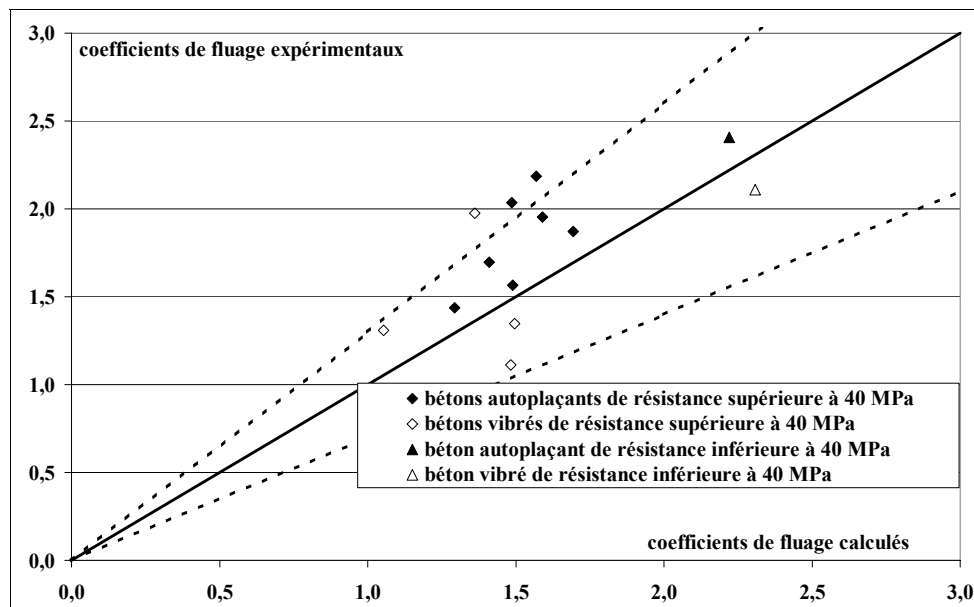
Graph 2 : Comparaison entre les modules d'élasticité expérimentaux et calculés

Le retrait de dessiccation est légèrement augmenté. Les essais réalisés n'ont pas montré de différence supérieure à 30 %, cette différence dépendant principalement du volume de pâte (à composition de la pâte fixée, l'augmentation de volume de 10 % a conduit à une majoration du retrait de 6 % et on peut considérer que le volume de pâte d'un BAP peut être supérieur d'environ 20 % à la limite de 340 l/m³ donnée dans le BAEL-BPEL).



Graph 3 : Retraits comparés BAP/BO

Les résultats de fluage collectés sont insuffisants pour pouvoir en tirer des conclusions générales, néanmoins aucun d'entre eux ne montre de différence importante par rapport au modèle réglementaire.



Graph 4 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et calculées du coefficient de fluage (Eurocode 2)

Il reste préférable, comme pour les bétons ordinaires vibrés, de mesurer les propriétés de fluage pour les structures qui sont particulièrement sensibles à ces phénomènes (pont construit en encorbellement par exemple).

7. CONCLUSION

Une bonne connaissance du matériau BAP assortie de référentiels techniques validés (même s'ils ne sont pas encore normatifs ou réglementaires) est aujourd'hui disponible. Le développement de l'utilisation des BAP passe par une nécessaire évolution des techniques de production de béton et de mise en œuvre. Cette évolution ne représente pas un saut technologique important et l'industrie de la préfabrication a déjà franchi le pas (la configuration est plus simple : l'utilisateur de béton est aussi le producteur). Elle nous semble souhaitable pour la compétitivité et l'image de marque de notre profession.

8. REMERCIEMENTS

Les résultats mentionnés sont pour la plupart issus du Projet National B@P, géré par l'IREX et financé par le RGCU et les partenaires du projet.