

Bétons auto-plaçants (BAP)

par **François CUSSIGH**
Ingénieur Vinci Construction France

| | | |
|--|------------|---|
| 1. Définition d'un BAP | C 2 217 – | 2 |
| 2. Caractéristiques des BAP à l'état frais | – | 2 |
| 2.1 Classification | – | 2 |
| 2.2 Ouvrabilité | – | 2 |
| 2.3 Spécifications des BAP à l'état frais | – | 3 |
| 3. Principes de formulation | – | 3 |
| 3.1 Cahier des charges minimum à l'état frais | – | 3 |
| 3.2 Particularités de la composition des BAP | – | 4 |
| 3.2.1 Volume de pâte élevé | – | 4 |
| 3.2.2 Quantité de fines (particules < 125 µm) élevée | – | 4 |
| 3.2.3 Utilisation de superplastifiants | – | 4 |
| 3.2.4 Utilisation éventuelle d'un agent de cohésion | – | 4 |
| 3.2.5 Faible volume de gravillons | – | 4 |
| 3.2.6 Quelques points à surveiller | – | 5 |
| 4. Qualification de la formule | – | 5 |
| 5. Fabrication du béton | – | 5 |
| 5.1 Généralités | – | 5 |
| 5.2 Équipement des centrales | – | 5 |
| 5.3 Procédures de fabrication | – | 5 |
| 5.4 Adjuvantation sur site | – | 6 |
| 5.5 Transport | – | 6 |
| 6. Réception du béton sur chantier | – | 6 |
| 7. Mise en œuvre du béton | – | 6 |
| 7.1 Méthodes de mise en œuvre des BAP | – | 6 |
| 7.2 Poussée des BAP sur les coffrages | – | 7 |
| 7.3 Cure des BAP | – | 7 |
| 7.4 Applications du BAP | – | 7 |
| 8. Propriétés du béton durci | – | 7 |
| 8.1 Propriétés mécaniques | – | 7 |
| 8.2 Durabilité | – | 8 |
| 8.3 Parements | – | 8 |
| 9. Conclusion | – | 8 |
| Pour en savoir plus | Doc. C2217 | |

Les bétons auto-plaçants (BAP) constituent la dernière évolution en date des bétons utilisés pour la construction d'ouvrages de bâtiment et de génie civil.

Leur **très grande fluidité à l'état frais** leur procure de **multiples avantages** en termes de facilité de mise en œuvre et d'impact socio-économique, avec une réduction significative de la pénibilité du travail des ouvriers en charge du

bétonnage et une suppression du bruit généré par les habituels appareils de vibration utilisés pour compacter les bétons de fluidité ordinaire (les BAP ne se vibrent pas).

En termes de qualité de béton mise en œuvre (résistance, durabilité, esthétique), leur potentiel est également supérieur à celui des bétons classiques qui est fortement dépendant du savoir-faire du personnel d'exécution.

C'est d'ailleurs pour résoudre des problèmes de qualité de mise en œuvre que les BAP ont été développés au Japon, à la fin des années 1980.

1. Définition d'un BAP

Par Béton Auto-Plaçant, on désigne un béton très fluide qui peut être mis en œuvre sans vibration (la compaction s'effectue par le seul effet gravitaire) et donner, après durcissement, un matériau compact et homogène.

En effet, les bétons traditionnels subissent un certain foisonnement lors du transport et de la mise en œuvre et nécessitent, en général, un apport d'énergie (sous la forme d'une vibration interne ou externe) permettant d'évacuer l'air emprisonné dans le matériau.

Les bétons traditionnels de consistance fluide peuvent, dans certains cas, être mis en œuvre sans vibration (c'est le cas des bétons de pieux ou de parois moulées) mais les règlements prennent en compte alors une qualité amoindrie à l'état durci.

Ce qui distingue véritablement les BAP des bétons fluides, c'est leur capacité à cheminer dans les coffrages tout en conservant leur homogénéité et leur compacité (figure 1).

Les BAP peuvent être utilisés pour pratiquement toutes les applications, en bâtiment, comme en génie civil. Seul le cas de surfaces supérieures légèrement inclinées, traditionnellement réalisées sans coffrage, demande des dispositions de bétonnage particulières (coffrage ou système de maintien du béton) qui peuvent conduire à préférer l'utilisation d'un béton vibré.

2. Caractéristiques des BAP à l'état frais

2.1 Classification

La notion de classification des BAP est apparue tardivement et constitue pourtant un paramètre essentiel du développement de ces bétons.

À l'origine, la formulation de BAP, imaginée par les Japonais (et, plus particulièrement, le professeur Okamura à la fin des années 1980), est conçue pour réaliser des ouvrages de génie civil, à forte densité d'armatures, pour lesquels des anomalies de mise en œuvre étaient redoutées. Aujourd'hui, et plus particulièrement en Europe, l'utilisation des BAP se développe dans le domaine de la préfabrication et dans celui du béton de bâtiment coulé en place, nécessitant des formulations de BAP différentes : pour le bâtiment elles doivent être moins performantes techniquement (en termes de caractéristiques mécaniques à 28 jours et de qualités d'ouvrabilité) et plus économiques.

Par contre, la problématique spécifique de la capacité à donner de beaux parements est à prendre en compte pour les applications verticales.

On distingue donc aujourd'hui, en France (conformément aux Recommandations pour l'emploi des BAP éditées par l'AFGC et le PN BAP), **trois catégories** :

- **catégorie 1** : il s'agit des ouvrages horizontaux de faible épaisseur (planchers, dallages) pour lesquels le ferrailage est léger et le béton peut être facilement réparti sur toute la surface ;
- **catégorie 2** : elle couvre les ouvrages horizontaux épais pour lesquels les risques de ségrégation statique sont importants, et les ouvrages verticaux courants (on exclut le cas des ouvrages à très forte densité de ferrailage) ;
- **catégorie 3** : ce sont les ouvrages exigus ou très fortement ferrailés (pour lesquels l'écoulement du béton dans le coffrage est le plus difficile).

À chaque catégorie correspondent des spécifications particulières pour le BAP à l'état frais, définies ci-après.

2.2 Ouvrabilité

À la différence des bétons ordinaires vibrés, les qualités d'ouvrabilité d'un BAP ne se résument pas à la mesure de leur fluidité. En effet, le BAP doit, à la fois, pouvoir s'écouler facilement, sous le simple effet de la gravité, mais cet écoulement ne doit pas être contrarié par les obstacles rencontrés dans le coffrage (armatures, effets de paroi, réservations, ...). De plus, il doit se faire sans ségrégation notable, y compris dans la phase où cet écoulement est terminé et où la gravité pourrait entraîner une séparation des différentes phases du béton (en particulier, séparation entre les plus gros granulats et le mortier).

■ On touche ici à la **relativité de la notion de BAP** et à la justification de la création de catégories. En fonction de l'application, le BAP devra donc témoigner de certaines qualités d'ouvrabilité qui peuvent se résumer en trois grandes caractéristiques :

- mobilité en milieu non confiné ;
- mobilité en milieu confiné (absence de blocage) ;
- résistance à la ségrégation.

■ Les **essais utilisés en France** (et, plus généralement, en Europe) pour quantifier ces caractéristiques sont respectivement :

- **étalement au cône d'Abrams** ;
- **écoulement à la boîte en L** ;
- **stabilité au tamis**.

• L'essai d'**étalement au cône d'Abrams** est directement dérivé de celui utilisé pour mesurer la fluidité des bétons vibrés (essai d'affaissement au cône d'Abrams). L'affaissement étant presque total, on mesure l'étalement de la galette de béton formée (voir figure 1).

• L'essai d'**écoulement à la boîte en L**, illustré figure 2, permet de quantifier l'éventuel blocage engendré par la présence d'armatures (il y a deux configurations avec un espace libre entre armatures de 59 mm et 2 barres, ou 41 mm et 3 barres).

• La mesure de la résistance à la ségrégation est plus délicate car elle doit intégrer, à la fois, les phénomènes de ségrégation statique (en général, après l'écoulement) et dynamique (pendant l'écoulement).



Figure 1 – Fluidités comparées d'un béton fluide (a) et d'un BAP (b)



Figure 2 – Écoulement peu perturbé à la boîte en L à 3 barres

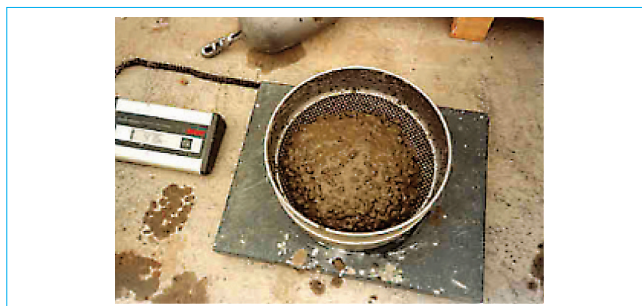


Figure 3 – Essai de stabilité au tamis

L'essai de **stabilité au tamis** a été développé en France, à la fin des années 1990, pour quantifier la résistance à la ségrégation. Il consiste, comme illustré à la figure 3, à prélever 10 litres de béton dans un seau, puis à verser les 2 litres, situés en tête de seau, sur un tamis de 5 mm. La portion de laitance qui se sépare du squelette granulaire et passe à travers le tamis est représentative de la sensibilité à la ségrégation du BAP.

On notera enfin que d'autres essais sont utilisés, **en complément**, pour quantifier la viscosité du BAP (en mesurant le temps nécessaire pour atteindre un étalement au cône d'Abrams de 500 mm, par exemple).

2.3 Spécifications des BAP à l'état frais

En fonction des catégories, des spécifications, concernant les différentes caractéristiques d'ouvrabilité, sont nécessaires.

■ Pour ce qui concerne l'**étalement au cône d'Abrams**, la valeur choisie dépend, non seulement du type d'élément bétonné, mais

aussi du mode de mise en œuvre. Il n'y a donc pas de valeur recommandée par catégorie, même si la catégorie 1 peut se satisfaire de faibles valeurs d'étalement.

La valeur moyenne d'étalement est généralement comprise, toutes applications confondues, entre 600 et 750 mm.

■ L'**écoulement à la boîte en L** est spécifié dès lors que le BAP doit s'écouler au travers de mailles de largeur inférieure à 100 mm. On utilise alors la configuration à deux barres, si cette largeur est supérieure à 80 mm, et à trois barres sinon.

■ La valeur maximale autorisée de la **stabilité au tamis** est modulée suivant la catégorie et la distance d'écoulement du béton lors de la mise en œuvre.

Pour la catégorie 1, les phénomènes de ségrégation dynamique et statique ne peuvent se développer pleinement.

Pour les ouvrages de catégorie 3, avec de grandes longueurs de cheminement (typiquement entre 5 et 10 m), le niveau le plus élevé de résistance à la ségrégation est requis [1].

On peut noter que, si la caractérisation de la qualité des BAP à l'état frais est plus élaborée et, donc, plus contraignante que pour les bétons ordinaires vibrés, les garanties de bon résultat sur les éléments bétonnés s'en trouvent renforcées.

Les phénomènes de ségrégation et de blocage existent communément pour les bétons ordinaires vibrés et, seul, le savoir-faire du formulateur du béton et du compagnon qui met en œuvre peuvent permettre de les éviter (on ne sait pas vérifier ceci par des essais de laboratoire !).

3. Principes de formulation

Des méthodes rationnelles de formulation des BAP ont été proposées dans la littérature technique et une majorité d'entre elles sont résumées dans les références [2] et [3].

Le présent chapitre est plutôt consacré aux particularités de la composition des BAP qui en découlent.

3.1 Cahier des charges minimum à l'état frais

La particularité des BAP réside essentiellement dans leurs propriétés à l'état frais.

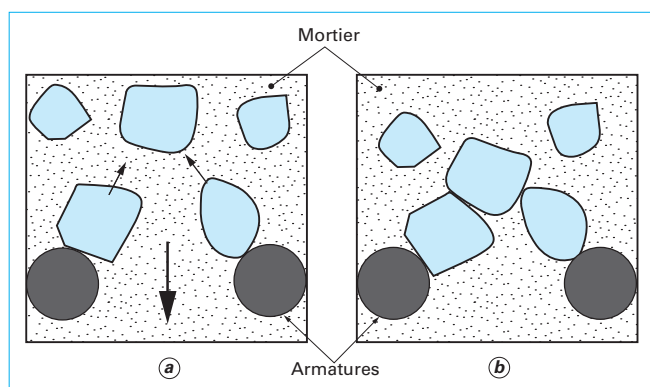


Figure 4 – Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle

■ Un BAP doit, tout d'abord, **s'écouler sous son propre poids** et avec un débit suffisant.

Ceci se traduit, dans la pratique, par un étalement et une vitesse d'étalement importants.

D'un point de vue plus scientifique, et considérant que le béton est un fluide de Bingham, ceci se traduit par un seuil de cisaillement et une viscosité plastique faibles. Ces grandeurs rhéologiques peuvent être mesurées à l'aide d'un rhéomètre à béton comme le BTRHEOM-LCPC, par exemple.

■ Un BAP doit également pouvoir **s'écouler, sans apport de vibration**, au travers de zones confinées (dans un coffrage très ferrailé, au droit d'un diaphragme, ...) et une grande fluidité du béton n'est pas une condition suffisante pour cela. En effet, lors de l'écoulement d'un béton fluide au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier (cf. figure 4 et ont tendance à venir en contact les uns avec les autres, si ce dernier n'est pas assez résistant au cisaillement. Des voûtes peuvent ainsi se former par contacts solides, se colmater avec des parties fines, et interrompre l'écoulement.

Il faut donc qu'un BAP présente une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement dans une zone confinée.

■ Un BAP doit également avoir une **bonne résistance à la ségrégation statique** (une fois mis en place) jusqu'à sa prise, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques.

De façon corollaire, il ne doit pas subir un tassement ou un ressuage trop fort, car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures, en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure, lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures.

■ Ajoutons, enfin, que ces bétons sont généralement **pompables**.

En conclusion, la principale difficulté, à laquelle le formulateur de BAP est confronté, est de pouvoir concilier des propriétés a priori contradictoires : la fluidité, ainsi que les résistances à la ségrégation et au ressuage du béton.

3.2 Particularités de la composition des BAP

3.2.1 Volume de pâte élevé

Les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons. C'est pourquoi les BAP contiennent un volume de pâte (ciment + additions + adjuvants + eau

efficace + air) important, typiquement de 330 à 400 L/m³, dont le rôle est d'écarter les granulats les uns des autres.

3.2.2 Quantité élevée de fines (particules < 125 µm)

Pour leur assurer une maniabilité suffisante, 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.

Ces fines proviennent du ciment, des additions et des granulats. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, le liant est souvent un composé binaire, voire ternaire : ciment Portland mélangé avec cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc.

Le choix des additions et de leur teneur respective dans les BAP est réalisé pour répondre aux exigences de résistance à la compression à 28 jours et aux exigences de durabilité telles qu'imposées par les normes applicables (DTU 21, norme NF EN 206-1, normes « produit préfabriqué en usine », etc.).

3.2.3 Utilisation de superplastifiants

Les BAP contiennent des superplastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée. Toutefois un dosage trop élevé peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

Il est possible d'utiliser un plastifiant en synergie avec un superplastifiant.

3.2.4 Utilisation éventuelle d'un agent de cohésion

Ce sont généralement des dérivés celluloseux, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales. Ces produits, comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse.

De façon schématique, l'utilisation de ces produits semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/fines élevés, car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Ils peuvent s'avérer superflus dans le cas de BAP ayant des rapports eau/fines faibles (notamment BAP de résistance supérieure à 50 MPa).

Pour la gamme des bétons intermédiaires, leur utilité est à étudier au cas par cas.

Les agents de cohésion ont la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations d'eau vis-à-vis du problème du ressuage et de la ségrégation. Par contre, leur utilisation peut conduire, suivant les produits, à des problèmes de dosage en centrale (cas de dosages faibles), à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité.

3.2.5 Faible volume de gravillons

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés 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 et, donc, de limiter 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. Bien évidemment, ce rapport peut être revu à la hausse, si le confinement est faible (dans un ouvrage peu ferrailé, par exemple), ou à la baisse dans le cas contraire.

En général, le diamètre maximal D_{max} des gravillons dans un BAP est compris entre 10 et 20 mm. Les risques de blocage, pour un confinement donné, augmentent lorsque D_{max} augmente, ce qui conduit à diminuer le volume de gravillon. Le choix d'un D_{max} plus important est donc possible, mais ne se justifie que lorsque le confinement est faible.

3.2.6 Quelques points à surveiller...

Toute la gamme de résistances des bétons conventionnels peut être obtenue avec les BAP en jouant sur la nature du liant qui les compose (ciment, additions) et le rapport eau sur liant. Les résistances au jeune âge peuvent être affectées lorsque les bétons contiennent de grosses proportions d'additions, ou un fort dosage en adjuvant.

Il est possible de produire et de stabiliser suffisamment d'air dans ces bétons avec un agent entraîneur d'air classique, pour les protéger efficacement du gel-dégel. Il semble toutefois indispensable d'introduire l'agent entraîneur d'air, avant la fluidification complète du béton (avant l'ajout de la totalité du superplastifiant, par exemple). En effet, l'entraînement et la stabilisation de l'air semblent plus difficiles, voire impossibles, lorsque le béton est très fluide dans le malaxeur.

4. Qualification de la formule

Comme expliqué précédemment, la qualité de l'ouvrage bétonné avec un BAP dépend très fortement (mais pas exclusivement) de la qualité du béton, les paramètres de mise en œuvre étant beaucoup moins influents que pour les bétons ordinaires vibrés.

L'épreuve de qualification de la formulation est donc particulièrement importante : il s'agit de définir une plage d'étalement au cône d'Abrams (et la plage de teneur en eau correspondante) au sein de laquelle les performances attendues du BAP sont obtenues.

En particulier, pour les propriétés à l'état frais, le principe est le suivant :

- la formule dérivée haute (avec l'étalement maximal) doit présenter une stabilité satisfaisante ;
- la formule dérivée basse (avec l'étalement minimal) doit conduire à un taux de remplissage correct et ne doit pas induire une dégradation de la densité par insuffisance du compactage gravitaire.

Il faut également intégrer la vérification du maintien de rhéologie suivant la durée pratique d'utilisation recherchée (le BAP doit, bien sûr, conserver ses qualités d'auto-plaçance jusqu'à la fin de la mise en œuvre).

L'influence de la température sur la rhéologie des BAP peut conduire à adapter les dosages en adjuvants suivant les saisons et ceci doit également être anticipé.

Il est bien sûr nécessaire d'utiliser toute la batterie d'essais sur BAP à l'état frais décrits au § 2.2. Toutefois, en phase d'utilisation courante du béton, seul l'essai d'étalement au cône d'Abrams est nécessaire comme contrôle de routine pour vérifier la régularité de fourniture du béton et son aptitude à la mise en œuvre.

Une description détaillée de la méthodologie de qualification d'une formulation de BAP est donnée dans les Recommandations provisoires de l'AFGC sur les BAP [4] et dans la version mise à jour de ce document, sur la base des résultats du projet national BAP.

5. Fabrication du béton

5.1 Généralités

Les formules de BAP sont, en général, plus pointues à fabriquer que celles des bétons ordinaires vibrés et il faut donc mettre en œuvre des précautions et contrôles particuliers.

Ces moyens spécifiques portent, à la fois, sur la maîtrise des constituants, le niveau d'équipement de la centrale et les procédures de fabrication.

Le **problème principal**, comme pour les bétons ordinaires vibrés, est la précision du dosage en eau, du fait qu'une partie importante de l'eau n'est pas pesée directement, mais correspond à l'humidité des granulats (qui est difficile à maîtriser).

5.2 Équipement des centrales

Pour la fabrication des BAP, il est préférable d'utiliser une centrale comprenant au minimum :

- un malaxeur à fort taux de cisaillement ;
- des sondes d'humidité sur les sables ;
- des stockages de gravillons à l'abri de la pluie et/ou un système d'évaluation fiable de l'humidité pour chacune des coupures ;
- un automate permettant un cycle de fabrication entièrement automatisé ;
- un wattmètre ou équivalent.

Il existe des sondes (de type micro-ondes) permettant de mesurer directement dans le malaxeur la quantité d'eau incorporée à la gâchée de béton. Ces matériels sont en développement et peuvent permettre de suppléer le traditionnel indicateur wattmétrique (qui permet, lorsque le béton n'est pas trop liquide, d'estimer sa fluidité par le biais de la résistance opposée à la rotation de l'arbre du malaxeur).

5.3 Procédures de fabrication

Afin d'assurer une fabrication régulière et fiable de ce type de produit, il est nécessaire de définir des procédures de suivi et de contrôle dans les documents qualité du site de production, notamment pour les domaines suivants :

- contrôles des constituants ;
- maîtrise de la teneur en eau des bétons et, particulièrement, du (ou des) sable(s) ;
- séquence de malaxage ;
- prise en compte du temps de transport pour caler l'étalement au départ de la centrale à béton ;
- fréquences de contrôle de l'étalement à la fabrication.

Lors de la fabrication de BAP, il est d'usage d'exercer, pendant la période de démarrage (les premières journées de fabrication), un **contrôle continu par un technicien** de laboratoire formé au BAP.

À l'heure actuelle, la fabrication des BAP demande un contrôle et un suivi renforcé par rapport aux bétons ordinaires vibrés couramment utilisés. Ceci pourra évoluer avec une meilleure maîtrise du dosage en eau.

La séquence de malaxage doit être adaptée de façon à ce que les constituants du béton frais soient correctement dispersés, sans présence d'agglomérats d'éléments fins (une introduction trop rapide peut entraîner la formation de boules d'éléments fins qui restent en flottaison dans le mélange liquide et ne sont pas défloculés).

Il est souhaitable de malaxer ces bétons à poste fixe le temps nécessaire à l'obtention d'une stabilisation complète du wattmètre, ou de mettre en place une procédure fiable sur la mesure d'efficacité du malaxage. Le temps de malaxage s'en trouve légèrement augmenté par rapport aux bétons ordinaires vibrés, sans que cela compromette les capacités de production des centrales à béton.

5.4 Adjuvantation sur site

L'adjuvantation sur site correspond à l'incorporation en camion-malaxeur sur chantier de tout ou partie du superplastifiant. Le béton primaire fabriqué dans l'installation à poste fixe doit, bien sûr, être spécialement étudié pour permettre l'obtention d'un BAP après adjuvantation sur site, et la transformation doit être étudiée dans le cadre de l'étude de formulation.

La faisabilité industrielle doit être vérifiée par une épreuve de convenance mettant en œuvre la procédure d'adjuvantation sur site prévue, en vérifiant, en particulier, l'homogénéité du béton sur l'ensemble de la charge et l'absence de ségrégation.

Cette méthode de fabrication du BAP nécessite des précautions particulières et complique les opérations à effectuer sur chantier. Par contre, la fabrication en centrale se trouve simplifiée (en particulier, la régularité du béton est plus facile à contrôler, le wattmètre peut être exploité).

5.5 Transport

Les consignes générales de transport et de livraison sont à respecter. Parmi celles-ci, on note l'absence d'eau dans le camion avant chargement, la propreté de la toupie, le maintien de la toupie en rotation lente pour éviter la ségrégation du béton, le réglage de la goulotte de façon à limiter la hauteur de chute du béton, ...

En cas de circulation sur piste pentue, il peut être nécessaire de réduire le volume chargé pour éviter les pertes de béton. Une autre solution consiste à équiper l'arrière de la cuve d'un système de bouchon.

À l'arrivée sur le site (même en cas d'adjuvantation sur site), un malaxage à grande vitesse, pendant au minimum 1 minute, est effectué juste avant déchargement.

Même s'il est admis que le béton puisse évoluer pendant la phase de transport (perte ou augmentation d'étalement), il n'est pas acceptable de devoir attendre un laps de temps, après la fabrication du béton, pour obtenir la conformité de ce dernier, en particulier, en terme de résistance à la ségrégation. En effet, il est impossible de contrôler la régularité de la production si le béton ségrégue et, de ce fait, ne peut être échantillonné correctement.

6. Réception du béton sur chantier

La réception du béton sur chantier doit permettre de vérifier l'aptitude du béton à être mis en œuvre sans aucune vibration et sa conformité à la formule nominale.

Cette opération est essentiellement basée sur la mesure de l'étalement au cône d'Abrams.

La procédure de réception est la suivante :

- prélèvement d'un échantillon de béton représentatif (si livraison en toupie, malaxage du béton à grande vitesse pendant une minute, au préalable) ;
- réalisation de l'essai d'étalement au cône d'Abrams ;
- vérification que le résultat soit compris dans la fourchette d'acceptation.

Il est prudent de réaliser un contrôle de réception, au minimum sur la première charge de la journée de bétonnage, et systématiquement en cas de doute.

7. Mise en œuvre du béton

7.1 Méthodes de mise en œuvre des BAP

Les BAP présentent des contraintes de mise en œuvre largement limitées par rapport aux bétons ordinaires vibrés. On rappelle que, dans le cas traditionnel des bétons vibrés, la mise en œuvre doit se faire par couches d'au plus 50 cm (proportionnées à la hauteur du corps des aiguilles vibrantes), avec une hauteur de chute inférieure à 1,5 m et en évitant de déplacer le béton par effet de la vibration sur une distance de plus de 2 m.

■ Pour les BAP, on admet des hauteurs de chute jusqu'à 5 m (le béton est beaucoup plus résistant à la ségrégation) et des déplacements horizontaux dans le coffrage de 5 à 10 m (suivant la résistance à la ségrégation du BAP et la densité de ferrailage). Ceci permet une **mise en œuvre beaucoup plus rapide**, toutefois généralement limitée par la vitesse maximale de montée dans le coffrage (pour des questions d'évacuation des bulles d'air qui s'échappent par gravité, lors de la mise en œuvre du BAP, ou de limitation de la poussée exercée sur les coffrages).

■ Par contre, les BAP ne tolèrent pas un manque de soin dans l'**étanchéité des coffrages**. Là où on obtiendrait un nid de cailloux avec un béton ordinaire vibré, la sanction est beaucoup plus forte avec le BAP puisqu'on risque de vider le coffrage. Ceci concerne typiquement des défauts d'ouverture supérieure à 3 mm.

Pour les petits défauts d'étanchéité, les BAP sont, au contraire, plus tolérants puisque leur cohésion évite les ségrégations localisées (sable délavé, auréoles sombres, ...) qui nuisent à l'homogénéité de teinte du parement.

■ On peut également noter que le délai de recouvrement entre couches de BAP, dans le **cas d'applications horizontales**, doit être suffisamment faible pour qu'un mariage correct puisse se faire (certaines formulations ayant tendance à se gélifier rapidement). Ceci peut impliquer des cadences de mise en œuvre élevées lorsque les surfaces concernées sont importantes.

■ Pour les **applications verticales**, la mise en œuvre peut se faire par le haut du coffrage (à la benne ou à la pompe) comme pour les bétons ordinaires vibrés, ou par le bas (injection par pompage). Cette dernière possibilité permet d'automatiser la mise en œuvre et de limiter le personnel en charge du bétonnage (voir figure 5).



Figure 5 – Dispositif d'injection



Figure 6 – Finition de surface d'un BAP

Quelle que soit la méthode de bétonnage, il convient de limiter la hauteur de chute, voire même de bétonner par la méthode du tube plongeur, lorsque le béton reste brut de décoffrage et que le parement doit être peu bullé.

■ Pour les **applications horizontales**, l'avantage des BAP réside dans leur facilité de nivellement et de réglage. Les opérations de réglage et de talochage traditionnelles sont supprimées et remplacées par un traitement de surface (à la pénébilité moindre puisqu'il se fait en station debout) à la barre dite « de débullage », comme illustré en figure 6.

7.2 Poussée des BAP sur les coffrages

Les coffrages outils, utilisés traditionnellement pour bétonner les éléments verticaux sur les ouvrages de bâtiment et de travaux publics, ne sont pas dimensionnés pour reprendre la poussée de bétons fluides sur des hauteurs supérieures à 4 m environ.

Pour les bétons ordinaires vibrés, on compte sur la limitation de la fluidité et de la vitesse de montée dans le coffrage pour éviter des pressions trop élevées, en cas de bétonnage en grande hauteur.

Pour les BAP, il est plus délicat d'éviter que la poussée sur les coffrages ne soit de type hydrostatique. Toutefois, certains BAP présentent des propriétés thixotropiques à l'état frais (c'est-à-dire une tendance à la gélification au repos) qui leur permettent, à condition d'être mis en place par le haut du coffrage, de générer des poussées inférieures à celles données avec des bétons dits « classiques ».

Il n'existe, à l'heure actuelle, pas d'essais reconnus permettant de quantifier cette thixotropie et d'en apprécier l'impact sur la pression exercée au niveau des coffrages. De plus, la thixotropie dépend de la température du béton frais et peut être altérée par des vibrations transmises au béton, après sa mise en œuvre sur chantier (circulations d'engins, ...).

Une méthode indirecte, permettant de prendre en compte la thixotropie, consiste à contrôler les efforts de traction dans les tiges de coffrage et à vérifier ainsi que la vitesse de remplissage laisse le temps au béton de se gélifier en partie inférieure.

Il convient de prendre en compte qu'un des avantages indéniables des BAP est de permettre une augmentation des cadences de bétonnage, entraînant alors de fortes vitesses de montée du béton dans les coffrages qui empêchent de bénéficier du caractère éventuellement thixotrope du BAP.

7.3 Cure des BAP

Les BAP présentent, en général, une rétention d'eau nettement supérieure à celle des bétons ordinaires vibrés. Alors que ces der-



Figure 7 – Application d'une cure immédiatement après mise en œuvre du BAP

niers laissent remonter à leur surface une pellicule d'eau, les BAP restent homogènes et ne « ressuient » pas. Du même coup, la sensibilité à la dessiccation des surfaces libres est augmentée.

Par conséquent, il est nécessaire, pour les applications horizontales, d'appliquer une cure immédiatement après la mise en œuvre du béton afin d'éviter une évaporation trop importante, source de fissuration précoce et de diminution des propriétés de durabilité du béton d'enrobage (figure 7).

Dans le cas d'une utilisation d'un produit de cure, ce dernier doit être compatible avec la pose éventuelle ultérieure d'un revêtement de finition, ou devra être éliminé après coup (par ponçage ou grenailage).

7.4 Applications du BAP

De nombreux ouvrages, très diversifiés, ont été réalisés en BAP, depuis la fin des années 1990, en France.

À l'heure actuelle, le BAP est largement utilisé dans le domaine de la préfabrication et son utilisation progresse dans le domaine du coulé en place (horizontaux de petits bâtiments, béton architectonique, ouvrages exigus ou très ferrailés, ...).

Il a, en particulier, été utilisé sur certains grands chantiers à l'étranger, pour des ouvrages majeurs de génie civil. Ceci démontre que c'est un matériau à potentiel élevé, aujourd'hui bien maîtrisable (et bien maîtrisé par des entreprises spécialisées de fabrication et de mise en œuvre).

On se référera utilement à la monographie des ouvrages réalisés en BAP [5].

8. Propriétés du béton durci

Comme énoncé précédemment, les BAP diffèrent essentiellement des bétons ordinaires vibrés par leurs propriétés à l'état frais. À l'état durci, leurs propriétés sont très voisines et dépendent directement du détail de la formulation.

8.1 Propriétés mécaniques

Pour ce qui concerne la résistance en compression à 28 jours, on peut couvrir avec les BAP une large gamme de performances (la gamme usuelle de 30 à 60 MPa ne pose pas de problèmes).

Il est d'ailleurs difficile d'obtenir des résistances faibles, du fait de la richesse en éléments fins du mélange et de la limitation du dosage en eau (pour des problèmes de ségrégation).

On peut également noter que certaines formulations de BFUP (Bétons fibrés à ultra-hautes performances) présentent un caractère autoplaçant, malgré des résistances en compression à 28 jours de l'ordre de 150 MPa.

La principale différence, à l'état durci, concerne la proportion volumique de gravillons, plus faible (en moyenne) dans le cas des BAP. Toutefois, on peut considérer que certains bétons ordinaires vibrés (par exemple, ceux formulés avec agent entraîneur d'air) sont, de ce point de vue, similaires à beaucoup de BAP. On voit donc ici que la famille des compositions de BAP est une sous-famille du vaste ensemble des formulations de béton ordinaire vibré.

Si l'on s'attache à décrire un comportement moyen comparatif, la plus faible proportion volumique de gravillons entraîne une légère augmentation des propriétés de déformation instantanées et différées du BAP (module d'élasticité plus faible, retrait et fluage plus forts).

Lorsque ces caractéristiques sont importantes pour le dimensionnement de la structure, et comme pour les bétons ordinaires vibrés, il est préférable de caractériser la formulation sélectionnée par des essais de laboratoire.

Le rapport entre la résistance en traction et la résistance en compression n'est pas significativement affecté par le caractère auto-plaçant du béton.

8.2 Durabilité

La durabilité du béton est en général relative aux paramètres de composition en termes de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction).

Les règles applicables pour les bétons ordinaires restent valables pour les bétons auto-plaçants. De plus, les écarts possibles entre les éprouvettes de béton testées en laboratoire et les performances réelles du béton mis en œuvre, sont moindres.

Au niveau du béton armé, les BAP apportent également de meilleures garanties : l'adhérence des BAP aux armatures est similaire à celle des bétons ordinaires mais, dans certaines configurations (nappes supérieures de pièces épaisses), la **meilleure stabilité des BAP**, vis-à-vis du ressuage, élimine les défauts rencontrés avec certains bétons ordinaires et peut améliorer l'enrobage des armatures.

8.3 Parements

Les parements obtenus avec les BAP sont potentiellement meilleurs qu'avec les bétons ordinaires, en particulier pour ce qui concerne les défauts liés à l'étanchéité des coffrages et à la vibration. L'obtention de teintes plus homogènes est possible.

Par contre, les BAP peuvent présenter des phénomènes de bulage liés à leur résistance à la ségrégation. Pour le limiter, il convient d'optimiser les méthodes de mise en œuvre et d'utiliser des fluidités élevées, dans les limites de stabilité acceptables.

On peut également noter, du fait de la forte teneur en éléments fins, une très bonne capacité de moulage de formes complexes et ouvragées.

9. Conclusion

Comme ce dossier vient de l'exposer, les BAP offrent de réels avantages par rapport aux autres types de béton.

Représentatifs des diverses évolutions qui renouvellent les techniques de construction, les BAP ont la faveur de gros chantiers internationaux où le génie civil doit se surpasser. Leur utilisation est d'ailleurs en voie de généralisation pour des applications courantes.

Dans cette foulée, se crée un réseau de spécialistes et de savoir-faire.