

CHAPITRE III

NOUVEAUX MATERIAUX

Béton auto-plaçant

(BAP)

Chapitre III : Nouveaux matériaux

III-1-Béton auto-plaçant (BAP)

III-1-1-Introduction

III-1-2-Définition

III-1-3-Exemples de quelques réalisations avec les BAP

III-1-4-Méthodes de formulation des bétons auto-plaçants (BAP)

III-1-5-Principe de formulation des BAP

III-1-6-Différentes méthodes de formulation des BAP

A- Méthode japonaise

B- Méthode Suédoise

C- Méthode Française

D- Autres Méthodes

III-1-7-Essais de caractérisation des bétons autoplaçants

III-1-7-1-A l'état frais

A- Essai d'étalement

B- Essai de boîte en L

C- Essai de stabilité au tamis

D- Essai d'entonnoir (V-Funnel)

E- Essai d'étalement modifié à l'anneau métallique (J-Ring)

III-1-7-2-A l'état durci:

A- La résistance mécanique

B- Module d'élasticité

C-Durabilité et retrait

Chapitre III : Nouveaux matériaux

III-1-Les bétons Autoplaçants ''BAP''

III-1-1-Introduction :

Les maîtres d'ouvrage, architectes, ingénieurs, entrepreneurs du BTP, fabricants de béton et préfabricants ont toujours recherché un béton permettant :

- une mise en place aisée ;
- un bon remplissage des coffrages et des moules ;
- un parfait enrobage des armatures ;
- une forte compacité [68].

Avec comme principaux objectifs :

- la suppression des opérations coûteuses en main d'œuvre (vibration, tirage à la règle, ragréage, etc.) ;
- l'obtention d'une qualité, d'une régularité et d'une durabilité des bétons encore plus grandes ;
- le coulage facilité de structures complexes et souvent fortement ferraillées ;
- l'allongement des temps d'ouvrabilité ;
- l'amélioration de la qualité esthétique des parements ;
- l'augmentation des cadences de production et de la productivité des chantiers et des usines ;
- la réduction de la pénibilité des tâches des ouvriers ;
- la réduction des nuisances sonores sur les chantiers ;
- l'obtention d'une parfaite planéité des hourdis et des dalles ;
- la fabrication de ces bétons dans la majorité des centrales du réseau BPE et des usines de préfabrication à partir de matériaux courants disponibles localement ;
- la diminution des reprises de bétonnage [69].

Ces objectifs doivent être atteints en conservant à terme pour ce béton des performances comparables à celles d'un béton traditionnel de même caractéristiques.

Les recherches effectuées ces dernières années ont créé les conditions de réalisation et de reproductibilité d'un béton homogène, très fluide, aisé à mettre en œuvre sans vibration, ne ségrégant pas et présentant des propriétés de résistance et de durabilité comparables à celles des bétons traditionnels. Cette hyperfluidité du béton a été rendue possible par l'arrivée sur le marché des dernières générations d'adjuvants superplastifiants (qui augmentent considérablement la dispersion des grains de ciment).

III-1-2-Définition :

Le **béton auto-plaçant** (BAP) est un béton de ciment capable, sous le seul effet de la pesanteur, de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et très encombrés sans nécessiter pour autant des moyens de vibration afin de consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène. Ce type de béton 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 superplastifiant[70].

Seulement, la fluidité n'est pas la seule propriété recherchée, car il faut bien s'assurer de l'homogénéité de l'ensemble pâte-granulats. De façon corollaire, le mélange du BAP doit être très cohésif et très stable lors de la mise en place et cela jusqu'à son durcissement. Ceci implique que le BAP doit présenter le minimum de tassement et de sédimentation des particules solides et éviter de présenter un contrôle de ressuage trop fort, car cela génère une hétérogénéité des propriétés mécaniques, telle qu'une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage.

Une bonne stabilité liée, entre autres, à la viscosité du mortier et de son seuil de cisaillement nécessite soit l'ajout d'un agent de viscosité afin d'améliorer la cohésion de l'ensemble, soit d'augmenter la teneur en matière cimentaire et de réduire la teneur en eau libre. Aussi une bonne stabilité peut être liée à une optimisation de la compacité granulaire. Or, l'augmentation de la teneur en liant n'est pas sans conséquence sur la durabilité, vu le dégagement de chaleur d'une part, et d'autre part, le risque de nuire à la capacité de remplissage, propriété très recherchée pour ce genre de béton.

Cette complexité amène à combiner différents paramètres pour obtenir le niveau désiré en termes de résistance à la compression. Mais avant d'atteindre cette étape, il est indispensable de s'assurer d'une part de la bonne capacité de remplissage de ces bétons, donc une déformabilité supérieure à celle des bétons ordinaires. D'autre part, il faut s'assurer de la stabilité du mélange et éviter, par conséquent, la ségrégation. Très souvent, la satisfaction de ces deux exigences entraîne un compromis. En clair, en plus de garantir un étalement compris entre 500 et 700 mm et d'assurer une très bonne capacité de remplissage, il faut que l'agent de viscosité introduit pour améliorer la viscosité n'abîme pas la déformabilité du béton [70].

Les centaines d'opérations réussies, réalisées, tant au sein des grands groupes que des petites et moyennes entreprises, voire sur de très petits chantiers, montrent combien ce matériau bouleverse le champ de la construction en béton.

Les BAP font désormais partie des formulations courantes proposées par la majorité des centrales de Béton Prêt à l'Emploi. L'offre couvre toute la gamme des performances mécaniques (des résistances courantes à très élevées), et permettent d'obtenir une très grande variété de textures, de teintes et d'aspect de surface.

Les usines de préfabrication ont développé de nouveaux processus de fabrication pour bénéficier des avantages de ce matériau. De nombreux produits préfabriqués sont actuellement couramment réalisés en BAP aussi bien en bâtiment qu'en travaux publics :

- panneaux et voiles verticaux : panneaux de façade, encadrements de portes et fenêtres, encadrements de baies ;
- éléments de structure : poteaux précontraints, poutres, poutrelles, poutrelles treillis pour plancher béton, dalles, appuis, pré linteaux, caissons précontraints, longrines ;
- escaliers ;
- assainissement : cunettes, fond de regard, cuves et citernes ;
- éléments pour le génie civil : bordures, glissières de sécurité, chambres d'éclairage public, gradins, fossés ;
- éléments pour piscines, caveaux, socles de machines outils, buses rectangulaires, acrotères, corniches, lucarnes [71].

III-1-3-Exemples de quelques réalisations avec les BAP :

- Le pont Akashi Kaikyo (Japon), le plus suspendu au monde (3910m) où 390 000 de béton autoplaçant ont été versés dans des coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration.



Fig.III.1. Le pont Akashi Kaikyo

- La tour Landmark Tower (Yakohama, près de Tokyo), où un béton autoplaçant d'une excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40m de hauteur chacune [68].



Fig.III.2. La tour Landmark Tower

III-1-4-Méthodes de formulation des bétons auto-plaçants (BAP):

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC –Laboratoire Central des Ponts et Chaussées-, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton. Deux grandes familles prévalent actuellement :

- La première concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m³) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants.
- Une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables [72].

III-1-5-Principe de formulation des BAP :

Les BAP doivent présenter une grande fluidité et pouvoir s'écouler avec un débit suffisant sans apport d'énergie externe (vibration) à travers des zones confinées (armatures) en

présence d'obstacles ou se mettre en place dans des coffrages de grande hauteur. Ils doivent s'opposer à la ségrégation « dynamique » (en phase de coulage) et à la ségrégation « statique » (une fois en place) afin de garantir l'homogénéité des caractéristiques et de ne pas présenter de ressuage ou de tassement. Ils doivent aussi être pompables.

Pour ce faire la formulation des BAP repose sur trois critères.

- Fluidification de la pâte : elle est obtenue sans ajout d'eau par utilisation de superplastifiants à fort pouvoir défloculant.
- Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement : la taille des granulats qui peuvent être concassés ou roulés est généralement plus faible ; le volume de pâte et la quantité de fines sont plus importants que pour un béton mis en œuvre par vibration.
- Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation : elle est obtenue par l'emploi d'agents de viscosité et l'incorporation d'additions (fillers, cendres volantes, laitier moulu, fumées de silice).

La formulation des BAP fait appel à :

- des superplastifiants pour obtenir la fluidité souhaitée et quelques fois des agents de viscosité pour maîtriser la ségrégation et le ressuage ;
- une quantité de fines (ciments, fillers calcaires, cendres volantes) élevée pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage ($\sim 500 \text{ kg/m}^3$);
- un volume de pâte élevé ($350 \text{ à } 400 \text{ l/m}^3$),
- un faible volume de gravillons afin d'éviter le « blocage du béton » dans les zones confinées (rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 voire inférieur). Les granulats ont en général un D_{max} compris entre 10 et 16 mm afin d'améliorer l'écoulement ;
- du ciment (dosage à optimiser pour obtenir les performances souhaitées) ;
- un rapport E/C faible et un dosage en eau limité ;
- éventuellement un agent entraîneur d'air pour assurer la protection contre les effets du gel-dégel.

L'optimisation du squelette granulaire est indispensable pour obtenir les caractéristiques nécessaires à la fluidité et à l'écoulement en milieu confiné [69].

III-1-6-Différentes méthodes de formulation des BAP : [72]

A- Méthode japonaise :

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre.

B- Méthode Suédoise:

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par Tangtermsirikul et al., en 1995 [72].

En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat.

C- Méthode Française : Méthode française (LCPC) Laboratoire Central des Ponts et Chaussées : Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- les distributions granulaires
- les proportions du mélange
- la compacité propre
- la densité apparente

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- la proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple) le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé.
- les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.10^4 . La teneur en eau est réduite en

conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes.

D- Autres Méthodes :

D'autres méthodes de formulation, ont été publiées tels que la méthode reposant sur la théorie de «l'excès de pâte » : proposée par Oh et al., en 1999; la méthode d'évaluation simple utilisée par Ouchi et al., en 1999, (étudie l'interaction entre les granulats et les particules fines du mortier frais) etc [72].

III-1-7-Essais de caractérisation des bétons autoplaçants :

III-1-7-1-À l'état frais :

A-Essai d'étalement :

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow), on utilise le même cône que celui normalement 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 de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit 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 de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm. La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette. Il est utile de documenter le résultat de cet essai au moyen de photographies [72].

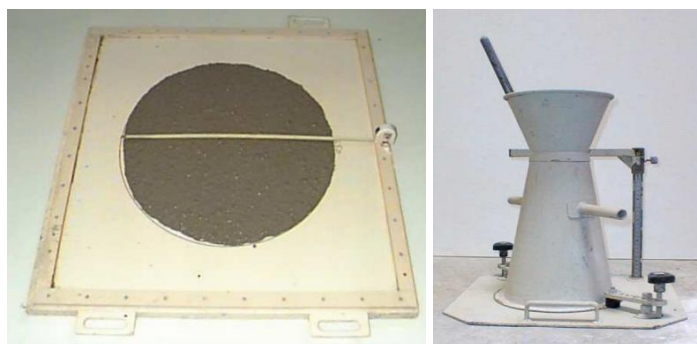


Fig.III.3. Schéma de cône d'Abrams pour la détermination de l'étalement

B-Essai de boîte en L :

La procédure d'essai dans la boîte en L est la suivante : la partie verticale de la boîte est remplie

de béton. Ensuite le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer au travers d'un grillage, formé de 3 barres d'armature \varnothing 14 mm distantes de 39 mm, 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 0,80. L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini [72].



Fig.III.4. Schéma de boîte en L

C-Essai de stabilité au tamis:

A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans 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 pâte (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. L'AFGC – l'Association Française de Génie Civil - a proposé en plus un essai de mesure du ressuage, qui semble avoir été abandonné aujourd'hui, car peu pertinent (le ressuage est faible chez les BAP) et très contraignant (utilisation d'un liquide nocif). Le tableau ci-après donne les valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAP [73].

Tableau.III.1. Valeurs préconisées pour un BAP.

| | |
|-----------|-------------|
| Etalement | 60cm à 75cm |
| H_2/H_1 | ≥ 0.8 |
| Laitance | $\leq 15\%$ |

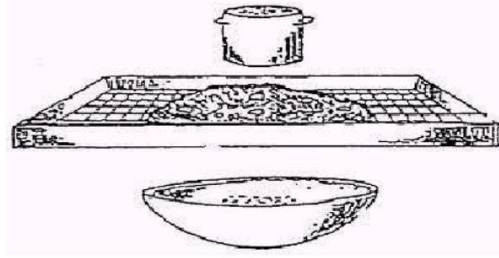


Fig.III.5. Essai de stabilité au tamis

D-Essai d'entonnoir (V-Funnel):

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante: l'entonnoir dont les dimensions sont définies à la figure 6, est rempli 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. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autocompactant.

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 béton BAP [74].

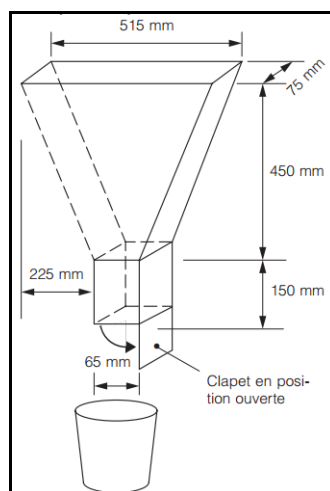


Fig.III.6. Dispositif de l'essai en entonnoir (V-Funnel)

E-Essai d'étalement modifié à l'anneau métallique (J-Ring):

L'essai d'étalement modifié (J-Ring) fut développé au Japon et consiste à faire s'écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature \varnothing 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau [72].

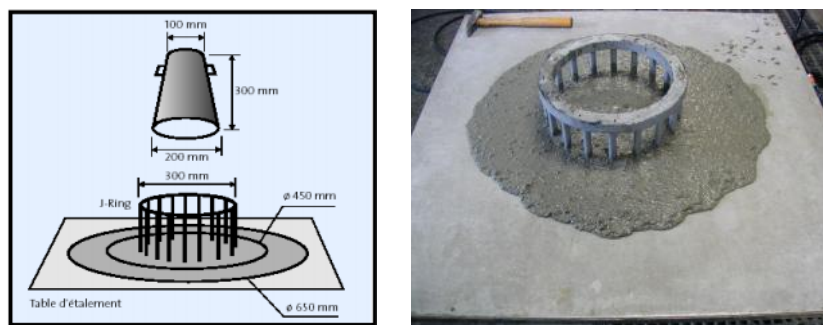


Fig.III.7. Essai d'étalement modifié

III-1-7-2-À l'état durci:

Lorsque le BAP est formulé et mis en oeuvre de manière adéquate, ses propriétés à l'état durci (résistance, déformation, durabilité) ne se différencient guère de celles d'un béton ordinaire vibré. Généralement ces propriétés d'après plusieurs chercheurs, sont meilleures, en particulier lorsque le béton spécifié doit répondre à des exigences courantes, ce qui est généralement le cas dans le domaine du bâtiment.

A- La résistance mécanique :

La mise au point d'une formule de béton consiste à rechercher à partir d'un composant donné (le plus souvent local), un mélange ayant à l'état frais une certaine maniabilité, à l'état durci une résistance en compression donnée, et ce au moindre coût. Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (proportion gravier / sable) [75].

D'une façon expérimentale les BAP impliquent un rapport E/C bas, donc de nature à fournir de bonnes résistances mécaniques.

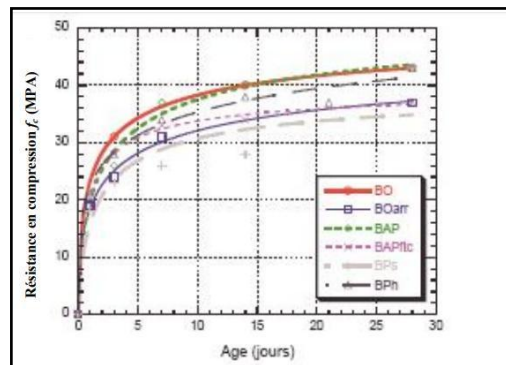


Fig.III.8. Résistance à la compression de différents mélanges

B- Module d'élasticité :

Comme les BAP renferment un faible volume de granulats, il faut prévoir des modules d'élasticité plus faibles que pour des bétons de mêmes résistances mais de rhéologie conventionnelle. Les travaux de certains chercheurs tels que Paultre et al., ont montré que les modules d'élasticité sont moins élevés pour les BAP, comparativement au BHP, ce qui confirme que cette idée a également trouvé que le module élastique d'un BAP est systématiquement inférieur à celui du BO dérivé, mais la différence n'est pas très importante, puisqu'elle se situe entre 2 et 8% [72].

C-Durabilité et retrait

La durabilité en général est 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 (norme NF EN 206-1, Fascicule 65A du CCTG, normes de produits préfabriqués). On pourra se reporter à l'annexe G pour plus de détails [76].

Les déformations différées des bétons, qu'elles soient d'origine physico-chimique, comme le retrait, ou mécanique, comme le fluage sous contrainte, peuvent mettre en cause la durabilité des ouvrages. Les déformations de retrait peuvent créer des fissurations et favorisent la pénétration rapide des agents agressifs externes induisant ainsi d'autres pathologies telles que la corrosion des armatures qui affecte l'ouvrage.

L'incorporation de fillers calcaires naturelles en tant qu'addition minérale dans les bétons autoplaçants constitue une voie de valorisation écologique et économique et influe sur leur retrait [77].

Les résultats obtenus par cette recherche [77] ont montré que le retrait des BAP était légèrement supérieur à celui des BO mais reste dans la limite des valeurs acceptables.

L'augmentation du taux de substitution du ciment par du fillers calcaire dans les compositions des BAP permet de réduire le retrait total dans les milieux ambiant et couvert, par contre le gonflement dans le milieu immergé devient plus grand.