

INFLUENCE DU VOLUME DE PÂTE SUR LE COMPORTEMENT DU BÉTON AUTOPLAÇANT VIS-À-VIS DU RETRAIT

N. BOUHAMOU (*), N. BELAS (*), F. BELABDELOUAHAB (**) et A. MEBROUKI (*)

(*) : Université de Mostaganem, Algérie

(**) : Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics de Kouba, Algérie

RÉSUMÉ

Le présent travail est une seconde étape faisant partie de notre travail de recherche sur l'influence des paramètres de composition sur le comportement des bétons autoplaçants (BAP) à l'état frais et durci. Il concerne l'étude de l'effet du volume de pâte sur le comportement du BAP à l'état durci. Plusieurs essais ont été réalisés tels que l'étalement, la boîte en L, la stabilité au tamis, le ressuage, les résistances mécaniques, le retrait libre (retrait de séchage et retrait endogène) et une étude microstructurale (caractérisation minéralogique, distributions porométriques) afin de comprendre les rôles joués par les différents constituants susceptibles d'entrer dans la formulation d'un BAP à base de matériaux locaux et chercher à mieux cerner les mécanismes qui régissent les comportements vis-à-vis du retrait. Nous avons mis en évidence le rôle du réseau poreux et de la microstructure des hydrates. Les résultats obtenus offrent de belles perspectives pour optimiser les BAP en Algérie. Notre étude a permis de développer une variété de formulations de bétons autoplaçants répondant aux critères rhéologiques (bonne déformabilité, moins de ressuage, absence de ségrégation, meilleures performances mécaniques).

MOTS-CLÉS : *bétons autoplaçants - fines calcaires - porosimétrie - retrait de séchage - retrait endogène - résistances mécaniques.*

1. Introduction

Les bétons autoplaçants (BAP), développés depuis une vingtaine d'années, sont encore à l'heure actuelle qualifiés de «nouveaux bétons» car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement. La spécificité des BAP, par rapport aux bétons traditionnels, réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles.

Cependant, malgré les aspects intéressants qu'ils proposent, en particulier à l'état frais, le peu de recul sur son comportement à long terme peut freiner son choix d'utilisation. En effet, les phénomènes physico-chimiques inhérents au retrait libre des bétons autoplaçants sont encore loin d'être clairement définis. S'il semble, que du point de vue de la formulation, on maîtrise les dosages des différents constituants pour obtenir une fluidité appropriée en conservant une bonne homogénéité, voire une résistance mécanique (Okamura et Ouchi 1999), en revanche il faut constater que le problème des déformations reste posé.

Cette recherche s'inscrit dans cette logique et a été menée pour répondre à plusieurs questions dont certaines concernent l'évolution des propriétés mécaniques et physiques du matériau béton dans le temps. Notre objectif, en utilisant des matériaux locaux est d'apporter des connaissances en expliquant le comportement du BAP vis-à-vis du retrait en fonction de la variation des paramètres le composant en particulier le volume de pâte. Les résultats de notre étude aideront à se faire une idée plus précise sur les valeurs de retrait obtenues avec ces nouveaux bétons et à cerner la différence entre BAP et béton ordinaire (BO) en adoptant une formulation optimale.

2. Matériaux et procédures

2.1. Matériaux utilisés

2.1.1. Ciment

Le ciment utilisé est un CPJ CEM II/A 32,5, provenant de l'usine de Zahana (ouest algérien). Les caractéristiques physiques et analyse chimique moyenne de ce ciment et des fines calcaires sont données dans le tableau 1.

	Ciment	Fines calcaires
Propriétés physiques		
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.09	0.87
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.00	2.66
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3100	2880
Analyse chimique		
SiO ₂	21.93	10.81
CaO	63.87	47.51
MgO	0.21	0.21
Fe ₂ O ₃	4.26	0.76
Al ₂ O ₃	6.81	0.31
SO ₃	1.31	-
Perte au feu	1.83	40.69
CaO libre	0.13	-
Carbonates	-	85.45
C O ₂	-	37.60
H ₂ O	-	3.09

Tableau 1 : Propriétés et caractéristiques chimiques du ciment et des fines calcaires.

2.1.2. Fines calcaires

L'addition calcaire utilisée provient de la carrière de Kristel (ouest Algérien). L'échantillon analysé est essentiellement constitué de calcaire (CaCO₃ = 85,45 %) et renferme une quantité appréciable de silice égale à 10,81 %. Les composantes telles que la Magnésie, l'Alumine et l'oxyde de fer sont très faibles. Les teneurs en sels solubles (sulfates et chlorures) ainsi que la matière organique sont nulles.

2.1.3. Granulats

Les granulats utilisés sont des granulats concassés calcaires à granulométrie continue, provenant de la carrière de Kristel (région oranaise), et un sable de mer siliceux, provenant de la carrière de Sid Lakhdar (région de Mostaganem).

Le tableau 2 donne les caractéristiques des granulats pour l'ensemble de nos compositions.

Classe	Sable de mer (Sm)	Sable de carrière (Sc)	Graviers (G)	
	0/2	0/3	3/8	8/15
Nature	siliceux	calcaire	calcaire	calcaire
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.64	2.66	2.67	2.67
Absorption (%)	-	-	1.28	0.93

Tableau 2 : Caractéristiques physiques des différents granulats.

2.1.4. Adjuvant

Le superplastifiant «Viscocrete 20» HE non chloré à base de copolymère acrylique est conforme à la norme NF EN 934-2 [1] a été utilisé pour toutes les compositions du BAP. Cet adjuvant haut réducteur d'eau qui se présente sous forme de liquide jaune possède une teneur en extraits secs de 40 % et une densité de 1.085.

Pour le béton ordinaire (BO), un plastifiant réducteur d'eau a été utilisé, le Plastiment BV 40. Cet adjuvant est

de couleur brun-foncée avec 36,6 à 40,9 % d'extraits secs et une densité de 1,385.

2. 2. Compositions des bétons

Trois bétons autoplaçants et un béton vibré (ordinaire) ont été confectionnés pour étudier l'effet du paramètre volume de pâte sur le comportement à l'état frais et durcis du BAP.

Le dosage en superplastifiant Sp, les rapports Eau/Ciment et Fines/Ciment sont gardés constants pour les compositions de BAP : $Sp = 1\%$; $E/C = 0,5$ et $F/C = 0,25$.

En ce qui concerne le béton vibré correspondant, sa composition a été obtenue à partir de la méthode de Dreux - Goriise en conservant le même rapport E/C que celui des BAP pour les besoins de comparaison.

Les compositions des différents mélanges sont présentées dans le tableau 3.

Mélange	Type	Composition des mélanges (kg/m ³)									
		Eau	Sable	Fines	Fer	Superplastifiant	Ciment	Sp	Sp	Sp	Sp
BAP1	BO	111	34	308	1,5		301	200	190	210	
BAP2	BO	111	34	308	1,5		301	200	190	210	
BAP3	BO	111	34	308	1,5		301	200	190	210	
BO	BO	111	34	308	1,5		301	200	190	210	

Tableau 3: Proportions des mélanges.

2. 3. Essais sur bétons frais

La caractérisation à l'état frais des bétons autoplaçants s'est limitée aux essais recommandés par l'AFGC [2] : étalement au cône, écoulement à la boîte en L, stabilité au tamis et ressage.

a. L'essai d'étalement (BAP) ou d'affaissement (BO)

Il s'agit de démouler un cône normalisé DIN (ou cône d'Abrams) de béton frais et de mesurer le diamètre de la galette de bétons obtenue. Il faut rappeler qu'est considéré comme autoplaçant, un béton qui forme une galette d'un diamètre compris entre 60 et 75 centimètres.

Pour la formulation vibré (BO), c'est le test traditionnel du cône d'Abrams selon la norme NF P 18-451 [3] qui s'est substitué à celui d'étalement.

b. L'essai à la boîte en L

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage.

13 litres de béton sont mis dans la partie verticale puis on laisse le béton se reposer pendant 1 minute. La trappe est ensuite levée et le béton s'écoule dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. A la fin de l'écoulement, on mesure H1 et H2 et le résultat est exprimé en terme de taux de remplissage $H2/H1$ (figure 1).



Figure 1: Mesure des paramètres après stabilisation [2].

c. L'essai de stabilité au tamis

Il consiste à mesurer la proportion d'éléments fins de béton (laitance) passant au travers d'un tamis d'ouverture 5 mm pour qualifier le béton vis-à-vis du risque de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes [2] :

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

d. L'essai de ressage

Pour l'essai de ressage, il s'agit de mesurer la quantité de liquide renoué à la surface d'une éprouvette 15 x 30 cm au bout de 3 h.

Un ressage important peut entraîner une dégradation de la qualité esthétique des revêtements et de la durabilité. La valeur limite de ressage conseillée doit être inférieure ou égale à 3 % en volume [2].

2. 4. Essais sur bétons durcis

2. 4. 1. Résistances mécaniques

Les échantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés, sont des éprouvettes cylindriques de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm. Une fois démoulées, elles subissent une rectification et sont conservées dans l'eau dans une salle à 20°C et 95 ± 5 % d'humidité relative jusqu'à l'échéance déterminée (1 jour, 7 jours, 28 jours et 90 jours).

La résistance à la traction est également mesurée sur des éprouvettes 11x22 cm par l'essai de fendage conformément à la norme NF P 18-408 [4].

2. 4. 2. Retrait libre

Les déformations du retrait ont été mesurées grâce à un rétractomètre sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 7x7x28 cm placées dans une salle climatisée à 20 ± 1°C et à 50 ± 5 % d'humidité relative, selon deux conditions :

- Avec échange hydrique du matériau avec l'ambiance : on obtient le retrait total,

- Sans échange hydrique avec l'ambiance en enveloppant les éprouvettes dans une (ou deux) feuille (s) de papier aluminium autocollant : on mesure le retrait endogène.

Après démoulage (à 24 heures), les mesures de retrait total et de retrait endogène sont effectuées à des échéances très courtes au début, la périodicité de mesure augmente ensuite avec le temps.

2. 4. 3. Mesure de la porosité

Les échanges d'humidité d'un béton avec le milieu extérieur sont donc liés à la structure poreuse. La connaissance de la porosité du béton peut donc s'avérer utile pour pouvoir juger les différences relatives de la microstructure des formulations de BAP qui sont susceptibles d'expliquer les résultats obtenus pour le retrait de ce type de béton en fonction de la composition. Dans cette optique, la porosité des différentes formules de BAP a été caractérisée (à environ 300 jours, soit la dernière échéance de mesure de retrait). Les mesures ont été réalisées au Laboratoire de Génie Civil de la Rochelle, à l'aide du porosimètre à mercure «Autopore III de Micromertics». La gamme de mesure va de 3 nm à 200 µm.

3. RESULTATS ET ANALYSES

3. 1. Etat frais

Les réponses des tests de caractérisation réalisés sur les bétons confectionnés sont présentées dans le tableau 4 [5].

Caractéristique	BAP1	BAP2	BAP3
	Vpâte = 35%	Vpâte = 37,5%	Vpâte = 40%
Étalement (mm)	570	700	750
L-Box H2/H1	0,73	0,87	0,91
Stabilité au tamis π (%)	5,66	7,68	15,01
Ressuage (%)	0,93	1,15	3,15

Tableau 4 : Influence des rapports E/C et F/C sur le comportement du BAP à l'état frais

Le volume de pâte est supposé jouer deux rôles dans un BAP. D'abord, il fluidifie le matériau en limitant les contacts entre les granulats. Ensuite, il écarte suffisamment les gravillons pour éviter la formation d'amas contre les armatures, responsables de blocage de l'écoulement. Nous supposons qu'il existe un volume de pâte minimal permettant de remplir chacune de ces deux fonctions.

Le tableau 4 montre que parmi les bétons testés, un

seul présente un étalement inférieur à 60 cm. On constate que l'augmentation du volume de pâte, contribue significativement à l'amélioration de la maniabilité. Cette amélioration est due principalement à la réduction de la teneur des gros granulats dont l'augmentation du volume, et particulièrement les granulats concassés, conduit à un frottement important [6]. C'est le cas du BAP au volume de pâte de 35 %.

Les résultats issus de l'essai de la boîte en L présentés dans le tableau 4 montrent une bonne proportionnalité entre le volume de pâte et le rapport H2/H1 de nos bétons.

Le BAP au volume de pâte de 35 % a présenté un mauvais écoulement à la boîte en L dont le taux de remplissage H2/H1 ne dépasse pas 0,80.

A cet effet, on constate qu'une teneur en quantité de pâte de l'ordre de 35 % ne nous permet pas d'obtenir un BAP répondant aux exigences de l'AFGC.

Contrairement à l'essai d'étalement et à la boîte en L, le béton au volume de pâte de 40 % se trouve à la limite du domaine autoplaçant puisque son pourcentage de laitance est légèrement supérieur à 15 %. Ce béton a également développé une mauvaise stabilité vis-à-vis du ressuage dont le pourcentage a dépassé 3 %. Cette ségrégation est due principalement à l'augmentation du volume de pâte par rapport à celui des granulats.

3. 2. Etat durci

3. 2. 1. Evolution des résistances mécaniques en compression

Un BAP présentant une bonne ouvrabilité doit contenir un volume de pâte suffisant pour couvrir la surface des granulats afin de minimiser les frictions entre particules, mais aussi une quantité supplémentaire de pâte pour donner une meilleure ouvrabilité [7]. Cette pâte une fois injectée dans les interstices du granulat, prend le nom de matrice, et ses propriétés apparentes sont affectées par l'arrangement géométrique du squelette. Plus précisément, c'est la distance moyenne entre deux gros granulats adjacents, appelée *épaisseur maximale de pâte* [8], qui résume l'influence de la topologie du squelette : plus cette distance est faible, et plus la résistance du béton est élevée. Nous supposons qu'il existe un volume de pâte minimal favorisant cette condition.

La figure 2 montre l'effet du volume de pâte sur la résistance à la compression à 1, 7, 28 et 90 jours respectivement. En première approximation, il s'agit de la compacité de la pâte qui varie avec le pourcentage de son volume. On remarque, en effet, que le volume de pâte sur le domaine [35 % à 37,5 %] contribue à augmenter les résistances aux deux échéances avant de provoquer leur diminution lorsque son taux dépasse

une certaine valeur critique qui est de l'ordre de 37,5 %.

Il y a une seule explication à cela : sur le domaine du volume de pâte [37,5 % à 40%] la quantité de pâte est importante donc la distance entre granulats est plus grande ce qui provoque des frictions entre eux et par conséquent ceci peut engendrer des résistances plus faibles.

Les écarts de résistances à la compression BAP – BO constatés sur la figure 5 s'expliquent par la proportion de pâte plus importante dans les BAP (376 l/m³ contre 341 l/m³ pour le BO) et l'absence de fines calcaires dans le BO qui peut avoir une action négative sur la compacité [9].

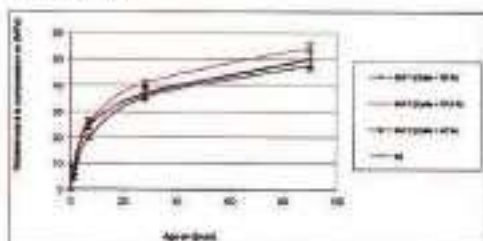


Figure 2 : Influence du volume de pâte sur les résistances à la compression du BAP

3.2.2. Retrait libre

Le béton subit des déformations dimensionnelles dès la fin de sa mise en place dans le coffrage pour lequel il a été préparé. Ces variations de dimension se développent dans différentes directions et sont régies par divers phénomènes physiques et chimiques. Elles ont lieu dans un matériau libre de toute contrainte et à plus forte raison pour un matériau subissant un chargement.

a. Retrait endogène

Le retrait endogène commence dès la prise du béton, voire avant (mais la part de cette déformation qui survient à l'étape plastique n'a pas de conséquence mécanique sur l'état durci). Son développement est rapide et il se stabilise après quelques mois. Il est lié à l'auto-dessiccation, c'est-à-dire à la diminution de l'humidité interne suite à la consommation d'eau par les hydrates [6].

Le volume de pâte dans un béton est généralement beaucoup plus faible que dans un mortier. Or, c'est la pâte qui se rétracte et non le squelette granulaire qui, au contraire, s'oppose au retrait donc on peut penser que c'est la proportion volumique de la pâte qui gouverne principalement les valeurs de retrait.

Sur la figure 3, sont illustrés les comportements des BAP en fonction du volume de pâte. On observe que le retrait endogène augmente avec la proportion de

pâte. L'évolution du retrait en fonction du volume de pâte ne semble pas linéaire. C'est peut-être la conséquence des variations de structure du squelette.

L'ordre de grandeur du retrait endogène à 300 jours est de 317 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le BAP au volume de pâte égal à 40 %, de 275 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le BAP au $V_{\text{pâte}} = 37,5 \%$, soit un écart de 42 $\mu\text{m}/\text{m}$. Le BAP au $V_{\text{pâte}} = 35 \%$ présente un retrait de 248 $\mu\text{m}/\text{m}$, soit une diminution de 69 $\mu\text{m}/\text{m}$ par rapport à la première formulation. Ces résultats révèlent que les déformations endogènes enregistrées sur le BAP au $V_{\text{pâte}} = 40 \%$ sont bien supérieures à celles mesurées sur les deux autres BAP. Cela met en évidence le rôle particulier joué par la teneur en granulats du matériau. En effet, les déformations que nous mesurons sur le béton sont les déformations effectives de ce matériau hétérogène constitué de granulats et de pâte (ciment + fines + superplastifiant + eau). Or, les granulats gênent les déformations potentielles de pâte engendrées par le processus physico-chimiques liés à l'hydratation. Donc, une diminution de la teneur en granulats et par conséquent l'augmentation du volume de pâte autorise de plus grandes déformations effectives.

De plus, les déformations effectives sont déterminées par les paramètres respectifs des composants (notamment les propriétés élastiques, mais aussi la compacité à sec du mélange granulaire).

Au total, nous pouvons dire que le retrait endogène des BAP augmente avec le volume de pâte. La raison en est que seule la pâte flue. Le volume de pâte est aussi le paramètre principal jouant sur le retrait. Le même résultat est obtenu par Proust [10] et Turcay [11].

La comparaison entre les BAP et BO souligne l'influence du caractère autoplaçant puisque les rapports E/C sont identiques et valent 0,5. En revanche la différence principale vient du volume de pâte plus important pour la formulation autoplaçante. Les résultats montrent que, dans l'ensemble, le retrait endogène d'un BAP est supérieur au retrait du béton ordinaire. Dans les trois premiers mois, l'écart observé entre les deux types de bétons varie entre 10 à 40 % soit une amplitude de déformation de 1,1 à 1,4 (figure 3).

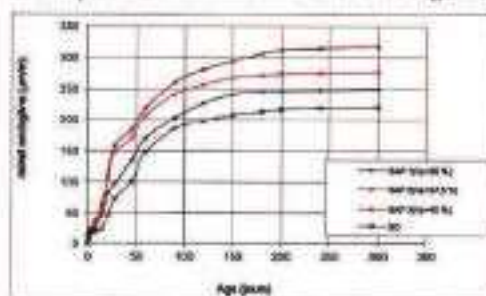


Figure 3 : Influence du volume de pâte sur le retrait endogène du BAP

b. Retrait de dessiccation et perte de masse

La figure 4 présente l'évolution dans le temps du retrait de dessiccation des BAP en fonction du volume de pâte. Ce retrait peut être considéré comme dû uniquement à l'évaporation de l'eau contenue dans la pâte de ciment hydraté et qui se développe à partir des surfaces exposées à l'ambiance extérieure.

Le retrait de séchage augmente avec le volume de pâte. Deux phases distinctes apparaissent dans le développement des déformations : une première phase où la vitesse d'évolution est élevée pendant les six premiers mois et, une deuxième phase où elle est fortement ralentie pour devenir parfois constante. Ces résultats sont tout à fait cohérents avec ceux obtenus par Turcry [11].

L'analyse des déformations des BAP, montre que la formule au $V_{p\grave{a}te} = 40\%$ est caractérisée par un retrait de séchage supérieur à celui des deux autres formules ($V_{p\grave{a}te} = 37,5\%$ et $V_{p\grave{a}te} = 35\%$) : à 300 jours d'âge, l'écart est de $60\ \mu\text{m}/\text{m}$ par rapport au BAP au $V_{p\grave{a}te} = 37,5\%$ et $96\ \mu\text{m}/\text{m}$ par rapport au BAP au $V_{p\grave{a}te} = 35\%$ correspondant respectivement à des augmentations de 12% et 21% .

Les écarts de retrait de dessiccation entre BAP et BO constatés sur la figure 4 s'expliquent par la proportion de pâte plus importante dans les BAP (une proportion minimale de 35 litres par m^3 de plus pour les BAP), entraînant dans les BAP un volume d'hydrates plus grand que dans le BO, et donc une déformation de volume plus importante.

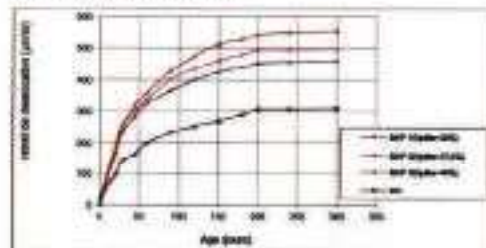


Figure 4 : Influence du volume de pâte sur le retrait de dessiccation de BAP

Nous distinguons sur la figure 5 deux étapes différentes pendant l'évolution des variations de masse : la cinétique de cette évolution est accélérée jusqu'à 60 jours, au delà de cet âge, elle est stabilisée. Durant la première étape, la consommation de l'eau due à l'hydratation du ciment est intense et conduit à un assèchement interne donc moins d'eau évaporable pendant la deuxième étape. Ceci paraît paradoxal avec les résultats du retrait de dessiccation, car l'évaporation de l'eau est pratiquement nulle après 60 jours de durcissement, alors que les déformations de retrait continuent à évoluer (figure 4).

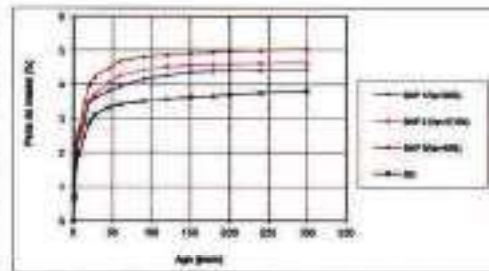


Figure 5 : Degré de masse en fonction du volume de pâte

Par contre, les courbes de la figure 6 montrent que les variations des quantités d'eau de tous les bétons sont presque linéaires, tant que l'évaporation d'eau continue, lorsqu'on considère une échelle logarithmique du temps. Tous les bétons poursuivent leur hydratation, la quantité d'eau évaporée est donc fonction du volume de pâte.

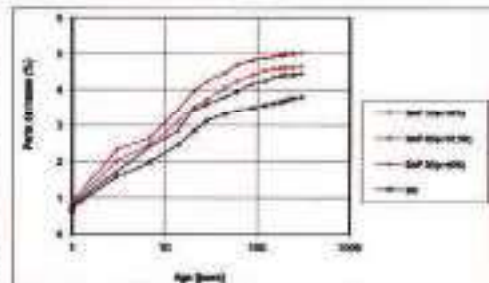


Figure 6 : Degré de masse en fonction du volume de pâte (échelle logarithmique)

La figure 7 apporte une preuve supplémentaire de l'influence du volume de pâte sur le retrait de dessiccation. En effet, les différentes courbes d'évolution du retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse montrent qu'après un premier départ d'eau sans conséquence sur le retrait, il existe une deuxième phase où le retrait évolue avec la perte d'eau.

On constate que les pertes de masse sont bien distinctes entre les BAP et BO, mais aussi que l'évolution du retrait de séchage en fonction de la perte de masse peut être considérée comme linéaire.

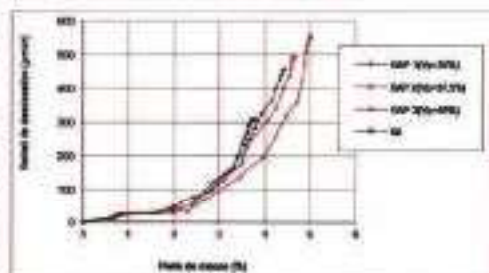


Figure 7 : Retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse

c. Retrait total

L'utilisation d'un volume de pâte plus élevé dans les BAP engendre une teneur inférieure en granulats dont l'un des apports positifs est de gêner le retrait de la pâte de ciment. Par conséquent, les déformations du béton qui se produisent essentiellement dans la pâte de ciment, devraient diminuer avec la quantité de granulats. La présence de différence nette entre le retrait de séchage des trois BAP semble indiquer que l'influence du volume de pâte sur le retrait total est importante.

Les résultats relatifs au retrait total des BAP sont présentés jusqu'à 300 jours sur la figure 8.

D'un point de vue quantitatif, la valeur expérimentale du retrait total du BAP contenant la plus forte quantité de pâte (40 %), à 300 jours est de 873 $\mu\text{m/m}$. Les valeurs, à la même échéance, pour les deux autres formulations sont les suivantes : 771 $\mu\text{m/m}$ pour le BAP (37,5 % de pâte) et 708 $\mu\text{m/m}$ pour le BAP (35 % de pâte).

Le retrait du BAP au volume de pâte de 35 % est légèrement plus faible que celui du BAP au $V_{\text{pâte}} = 37,5 \%$, mais il présente un défaut de stabilité, mis en évidence par l'essai de la boîte en L, ce qui pose un problème vis-à-vis des recommandations de l'AFGC [2].

L'observation de ces données expérimentales révèle une différence significative entre les retraits totaux des BAP. Cet écart peut être vu comme la conséquence de l'augmentation du volume de pâte.

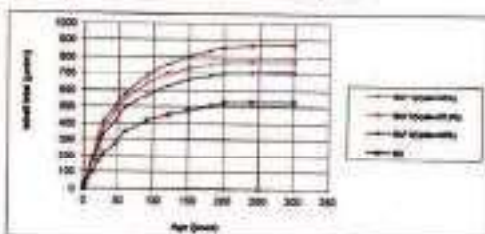


Figure 8: Influence du volume de pâte sur le retrait total

Les BAP sont susceptibles d'être plus déformables que les bétons ordinaires (figure 8), à cause de la plus forte quantité de pâte. En raisonnant ainsi, on néglige cependant le fait que la pâte d'un BAP n'a pas la même composition que la pâte du BO (addition, superplastifiant, quantité d'eau). Proust [10] trouve d'ailleurs une tendance opposée pour d'autres bétons. Persson [12] montre que pour une même résistance il n'y a pas de différence de comportement entre BAP et BO malgré l'écart de volume de pâte.

A l'opposé, Klug et al. [13] trouvent, toujours sur une large base de données, que les BAP ont un retrait total supérieur de 10 % à 50 % à celui des BO. Le retrait

des BAP a également été trouvé supérieur à celui des BO dans d'autres publications [14] [15] [16].

3.2.3. Etude de la porosité

Les résultats des essais de porosimétrie obtenus expérimentalement pour les BAP en fonction des différentes proportions de pâtes ($V_{\text{pâte}} = 35 \%$, $V_{\text{pâte}} = 37,5 \%$ et $V_{\text{pâte}} = 40 \%$) sont présentés dans le tableau 5 et les figures 9 et 10.

$V_{\text{pâte}} (\%)$	Taux de mésopores (%)	Taux de macropores (%)
35	10,41	1,71
37,5	11,12	1,62
40	12,73	2,56

Tableau 5: Taux de mésopores et macropores pour différents volumes de pâtes ($V_{\text{pâte}}$).

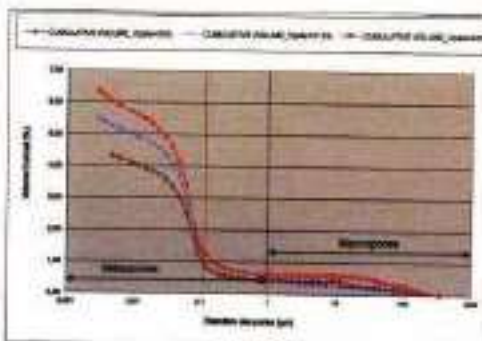


Figure 9: Porosimétrie au mercure: volumes cumulés de mercure introduit dans l'échantillon en fonction du diamètre du pore pour différents volumes de pâtes ($V_{\text{pâte}}$).

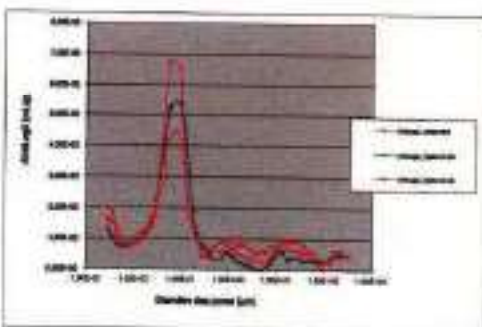


Figure 10: Porosimétrie au mercure: volumes différentiels de mercure introduit dans l'échantillon en fonction du diamètre du pore pour différents volumes de pâtes ($V_{\text{pâte}}$).

Sur la figure 9, on constate que le volume cumulé des pores du BAP contenant la plus grande proportion de pâte ($V_{\text{pâte}} = 40 \%$) devient plus important que ceux des deux autres BAP (BAP de $V_{\text{pâte}} = 37,5 \%$ et BAP de $V_{\text{pâte}} = 40 \%$) au fur et à mesure que la taille des pores décroît. Ceci semble en accord avec les

résultats de retrait endogène obtenus pour ces bétons.

En ce qui concerne le retrait de dessiccation, les pores les plus petits ($<0.01 \mu\text{m}$) dans le BAP de $V_{\text{pâte}} = 40\%$ sont en proportion plus élevée que le BAP ($V_{\text{pâte}} = 37.5\%$) et le BAP ($V_{\text{pâte}} = 35\%$). Les résultats expérimentaux (§ 3.2.2) ont, effectivement, révélé que le retrait de dessiccation du BAP avec une forte quantité de pâte ($V_{\text{pâte}} = 40\%$) est supérieur à celui des deux autres formulations ($V_{\text{pâte}} = 37.5\%$, $V_{\text{pâte}} = 35\%$).

En revanche, nous remarquons sur le deuxième graphe (figure 10), pour l'ensemble des BAP, une porosité très resserrée en un pic très marqué, entre 0.02 et $0.2 \mu\text{m}$ et mis à part la présence d'un reliquat de pic dans la zone ($10 - 100 \mu\text{m}$) pour le BAP de $V_{\text{pâte}} = 40\%$ et le BAP de $V_{\text{pâte}} = 35\%$, l'autre formulation présente une faible porosité pour des tailles de pores supérieures. La pâte correspondante à ce BAP ($V_{\text{pâte}} = 37.5\%$) doit apparaître comme un matériau très homogène à cette échelle et par conséquent plus résistant. Ceci correspond à la structure plus dense et plus compacte observée au MEB avec une meilleure formation de CSH (photo 1).

La figure 10 montre en effet que le volume de pâte dans le domaine [$35\% - 37.5\%$], la faible différence de macroporosité (0.1%) semble expliquer les résistances mécaniques plus élevées pour les BAP correspondants (§ 3.2.1).

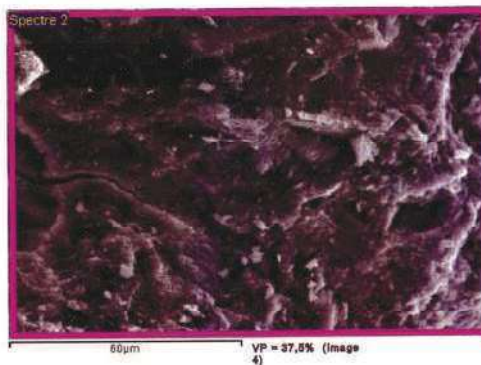


Photo 1 : Structure plus dense et plus compacte (BAP de $V_{\text{pâte}} = 37,5\%$).

4. Conclusion

A l'issue de cette étude, nous admettons qu'il est possible de confectionner des BAP à base de matériaux locaux algériens ayant les mêmes caractéristiques que ceux connus à l'échelle internationale. Par conséquent, il convient d'attacher une importance toute particulière aux dosages des paramètres de composition les plus influant en particulier les rapports E/C et F/C pour atteindre au mieux les propriétés visées d'un BAP.

En se basant sur les résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

- Sur la plage testée [35% à $37,5\%$] le volume de pâte contribue à augmenter les résistances des BAP. Sur le domaine [$37,5\%$ à 40%] la proportion de pâte à une influence significative sur le comportement du béton se traduisant par une chute remarquable de résistance.
- Le retrait des BAP est proportionnel à la proportion de pâte. La différence nette entre le retrait des BAP testés semble indiquer que le volume de pâte est aussi un paramètre principal jouant sur le retrait. La proportion suggérée est $37,5\%$ puisque son BAP ne présente pas de défaut de stabilité et ne pose pas de problème vis-à-vis des règlements contrairement aux autres proportions (35 et 40%).
- Les résultats obtenus à partir des expériences de porosimétrie au mercure ont pu appuyer certaines des hypothèses émises et ont permis d'interpréter de manière pertinente le comportement de nos BAP à l'état durcis. En effet, l'étude microstructurale de nos échantillons, nous a confirmé que le processus d'hydratation n'est pas le même pour tous les BAP et est fonction de la quantité de pâte.
- La porosité volumique témoigne aussi des différences relatives de la microstructure des formulations de BAP qui sont susceptibles de confirmer les résultats de retrait obtenus expérimentalement.

En conclusion, en tenant compte des incertitudes relatives aux mesures, nous pensons que la stabilisation de la déformation des BAP sera très rapide alors que dans le BO, la tendance à la stabilisation semble différée dans le temps. D'où, certainement, des écarts réduits à long terme. Des essais sur plusieurs années seraient nécessaires pour une meilleure quantification de ce phénomène.

5. Bibliographie

- [1] NF EN 934-2. Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 2 : Adjuvants pour bétons – Définitions, spécifications et critères de conformité.
- [2] AFGC. Les bétons autoplaçants. Recommandations provisoires, AFGC, 2000.
- [3] NF P 18-451. Bétons – Essai d'affaissement.
- [4] NF P 18-408. Bétons – Essais de ferraillage.
- [5] Bouharnou et al., Étude du comportement à l'état frais des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux, Revue canadienne de génie civil, N° 35, 653-662. CNRC, Canada, 2008.
- [6] Neville A., «Propriétés des bétons», Centre de Recherche International du Béton, Éditions Eyrolles, 2000.
- [7] OH S.G., Nogushi T. and Tomosawa F., [1999], «Toward mix design for rheologie of self-compacting concrete», In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, RILEM.
- [8] Sedran T., [1999], «Rhéologie et rhéométrie des bétons», Application aux bétons auto-nivellants, Thèse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- [9] Khatat K.H., [1999], «Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete», In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, RILEM.
- [10] Prout E., [2002], «Retrait et fluage des bétons autoplaçants : vers une compréhension des comportements différés», thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse.
- [11] Turcry P., [2004], «Retrait et fissuration des bétons autoplaçants. Influence de la formulation», Thèse de l'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes.
- [12] Persson B., [1997], «Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete», Technical Report, Japan Society for Promotion of Science, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, Lund University, Lund.
- [13] Klug Y. and Holschemacher K., [2003], «Comparison of hardened properties of self-compacting and normal vibrated concretes», In Proceeding of the Third International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, RILEM.
- [14] Ambroise J., Pera J., and Rols S., [1997], «Les bétons auto-nivellants», Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, 1: 37-41.
- [15] HU C., Barbieri B., [1998], «Comparaison des retraits des bétons auto-nivellants et d'un béton fluide traditionnel», Sciences des Matériaux et Propriétés des bétons liés rencontrés internationales, pp 265-272, Toulouse.
- [16] Rols S., Ambroise J. and Pera J., [1997], «Development of admixture for self-leveling concrete», 5th CANMET/ACI International Conference, On Superplasticizer and Other Chemical Admixtures in Concrete, SP 173, Rome, pp 493-509.