
Etude du retrait et des propriétés de transport d'Eco-BAP à based'additions minérales

Davood Niknezhad¹, Siham Kamali-Bernard¹

¹Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, Institut National des Sciences Appliquées, Rennes 35708, France

Davood.nik-nezhad@insa-rennes.fr

Siham.Kamali-bernard@insa-rennes.fr

Un des freins de l'utilisation plus massive des BAP est leur coût plus élevé, leur retrait souvent plus grand et le manque de recul concernant leur durabilité. Cette étude contribue à la formulation et la caractérisation de BAP plus écologiques basés sur l'utilisation d'additions minérales en substitution du ciment portland. 3 types d'additions sont traités: du métakaolin (MK), du laitier de haut fourneau et des cendres volantes. 4 BAP ont été formulés à partir d'une même composition où seule la nature du liant change : CEM I, CEM I+15% MK, CEM III et CEM V. L'effet de la nature du liant sur : l'évolution de la résistance à la compression, le retrait plastique, le retrait empêché, le retrait libre est quantifié. Deux indicateurs de durabilité; le coefficient de migration des ions chlorures et la perméabilité au gaz sont évalués. Les résultats montrent l'effet indéniable des différentes additions étudiées sur l'amélioration de ces derniers. La substitution partielle du CEM I par 15% de MK permet le développement de très bonnes performances globales alors que celle du CEM III présente à la fois des effets positifs et des effets négatifs. Des premières analyses de la microstructure permettent d'apporter des explications.

ABSTRACT. One of the limitations of an extensive use of SCCs is their higher cost, their larger shrinkage and also a lack of knowledge of their durability. This study contributes to the formulation and the characterization of green SCCs based on the use of mineral admixtures as a total or partial replacement of Portland cement. 3 types of admixtures are considered: Metakaolin (MK), Blast Furnace slag and Fly ash. 4 SCC are formulated starting from the same composition where only the nature of the binder changes: CEM I, CEM I+15%MK, CEM III and CEM V. The influence of the binder nature on the compressive strength, the plastic shrinkage, the restrained shrinkage and the free shrinkage is quantified. Two durability indicators, namely the chlorides migration coefficient and the gas permeability are measured.

MOTS-CLÉS : béton autoplaçant, retrait, résistance à la compression, migration des ions chlorures, perméabilité, additions.

KEY WORDS: self compacting concrete, shrinkage, compressive strength, chloride migration, permeability, admixtures.

1. Introduction

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 ferraiées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles. La formulation des bétons autoplacants (BAP) présente certaines spécificités dont un volume élevé de pâte ce qui augmente leur coût. Ainsi et pour des raisons à la fois économiques et environnementales, l'utilisation d'additions plus économiques et plus écologiques présente un enjeu important. Cette étude a pour objectif de contribuer à l'étude et à la caractérisation de BAP plus écologiques basés sur l'utilisation d'additions minérales en substitution du ciment portland. Trois types d'additions sont traités: du métakaolin (MK), du laitier de haut fourneau et des cendres volantes. Quatre BAP ont été formulés à partir d'une même composition où seule la nature du liant change : CEM I (BAP de référence), CEM I+15% de MK, CEM III et CEM V. Le rapport E/L (liant = ciment + addition) est constant égale à 0,368. L'effet de la nature du liant sur : la cinétique de développement de la résistance à la compression R_c , le retrait plastique, le retrait empêché, le retrait libre est quantifié. Deux indicateurs de durabilité; le coefficient de migration des chlorures et la perméabilité au gaz sont évalués. Des analyses préliminaires de microstructure sont réalisées pour apporter des éclaircissements.

2. Matériaux et formulations

2.1. Matériaux

Un sable 0/4 de 2.6 de densité et 1.2% de coefficient d'absorption d'eau, des graviers calcaires 6.3/10 de 2.66 de densité et 0,5% de coefficient d'absorption d'eau sont utilisés. Trois ciments ont été testés: un ciment portland CEM I 52,5N, un ciment à base de laitier de haut fourneau CEM III/A 52,5L et un ciment à base de laitier de haut fourneau et de cendres volantes CEM V 42,5N. Le filler calcaire utilisé est essentiellement constitué de calcite ($\text{CaCO}_3=97.4\%$). Sa surface spécifique et sa densité sont respectivement $4190\text{ cm}^2/\text{g}$ et 2.7 t/m^3 . Le métakaolin provient de l'entreprise IMERYS, surface spécifique est de $17000\text{ cm}^2/\text{g}$ et sa densité de 2.4 t/m^3 . Un superplastifiant à base de polycarboxylate avec une densité de $1.05 \pm 0.02\text{ g/cm}^3$ est également utilisé pour toutes les formulations de BAP.

2.2. Compositions des BAP

Une formulation de BAP à base de CEM I est retenue. La même composition a été retenue pour les 3 autres BAP où le ciment CEM I a été remplacé soit totalement par du CEM III ou du CEM V ou partiellement par 15% de Métakaolin. En total, 4BAP ont été fabriqués avec un rapport E/L constant égale à 0.368 ($L=\text{ciment} + \% \text{MK}$), leur composition est donnée dans le tableau 1. La caractérisation à l'état frais des bétons autoplacants s'est limitée aux essais recommandés par l'AFGC (AFGC, 2000): étalement au cône (SF), écoulement à la boîte en L et stabilité au tamis (Sr). Les résultats donnés dans le tableau 1 montrent que l'utilisation du MK diminue la fluidité du mélange, ainsi des teneurs plus élevées en superplastifiant ont été utilisées. En revanche, l'utilisation du ciment CEM III et en moindre mesure le ciment CEM V nécessite de plus faibles teneurs en superplastifiant.

Composition (kg/m^3)	G (6,3/10)	S (0/4)	CEM I 52,5N	CEM III/A 52,5L	CEM V 42,5N	FC	MK	eau	SP	E/L	SF (cm)	Sr (%)	L-Box (H2/H1)
CEM I	760	780	330			240		210	2,8	0,368	66	8,1	0,83
CEM I/MK	760	780	280,5			240	49,5	210	4,4	0,368	67	7,1	0,82
CEM III	760	780		330		240		210	2	0,368	69	9,6	0,86
CEM V	760	780			330	240		210	2,5	0,368	68	7,9	0,84

Tableau 1. Composition et propriétés à l'état frais des BAP

2.3. Campagne expérimentale

- Analyse de la microstructure: des analyses thermogravimétriques ont été réalisées sur des pâtes de liant à 4 mois de maturation dans l'eau. Les teneurs en eau liée (de 105°C à 1000°C) et libre (de 25°C à 105°C) ont été déduites. La porosité accessible à l'eau selon les recommandations du GranDuBé est mesurée.

- Essai de compression simple : les tests ont été réalisés sur des sections $70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ issues d'éprouvettes prismatiques $70 \times 70 \times 280\text{ mm}$ préalablement testées sous flexion 3 points. Les éprouvettes testées ont été conservées dans l'eau dès leur démoulage jusqu'à échéance. La résistance à la compression R_c est déduite.

- Retrait plastique : il a été mesuré à 20°C et 50% d'humidité relative à l'aide d'un dispositif utilisant un moule en PVC $70 \times 70 \times 280\text{ mm}$, dont les parois internes sont recouvertes d'un film plastique très fin afin de supprimer l'effet du frottement entre le moule et le béton. Aux extrémités de l'éprouvette, deux capteurs LVDT

permettent la mesure des déformations par l'intermédiaire de deux plaques réfléchissantes, entraînées par le béton lorsqu'il se rétracte. Un capteur laser, placé au-dessous de l'échantillon, permet de mesurer le tassement d'une lamelle carrée d'aluminium, de 1 cm de côté et de 1 mm d'épaisseur, déposée à la surface du béton (figure 1).

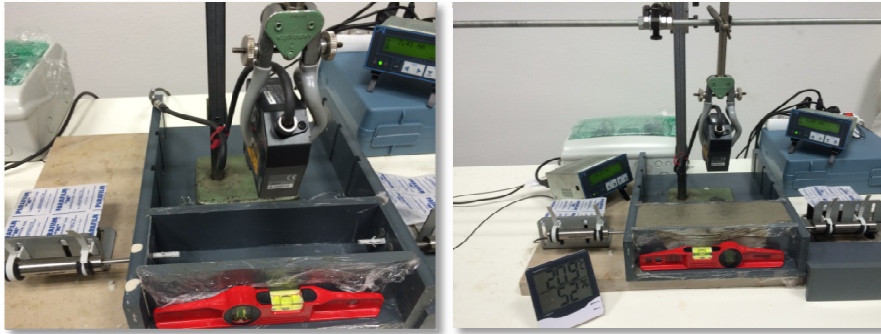


Figure 1. Schéma du dispositif de mesure des déformations plastiques et du tassement.

- **Retrait endogène et total:** les mesures du retrait endogène et du retrait total ont été réalisées 18h après le début du malaxage selon la norme (EN 196-1, 2006). Pour chaque composition, les variations dimensionnelles ont été effectuées avec un comparateur sur trois éprouvettes conservées dans une salle maintenue à 20°C et 50% d'hygrométrie relative (retrait total) et sur trois autres éprouvettes protégées par un film adhésif pour empêcher tout échange hydrique (retrait endogène). La différence de ces 2 retraits permet d'obtenir le retrait de dessiccation.

- **Retrait empêché :** il a été étudié à l'aide d'un dispositif constitué d'un anneau en acier, de rayon intérieur R_2 (13cm) et de rayon extérieur R_1 (15,5cm), autour duquel est coulé un anneau en béton, de rayon extérieur R_0 (19 cm). Les surfaces supérieures des anneaux des bétons sont protégées de la dessiccation par une double couche d'adhésif aluminium, la surface circonférentielle est exposée à un séchage (figure 2). La mesure du retrait a été effectuée à l'aide de jauges extensométrique posées sur les anneaux de bétons et aciers afin de déterminer les retraits de dessiccation ainsi que les contraintes de traction résiduelles. L'âge de début de la fissuration du béton est enregistrée et l'ouverture des fissures mesurée.



Figure 2. Schéma du dispositif de retrait empêché

- **Migration des ions chlorures :** des essais accélérés de migration des ions chlorures par champ électrique sont réalisés. Les cellules d'essai utilisées sont illustrées dans la figure 3. La tension appliquée aux bornes des échantillons est de 20 V. Le coefficient de diffusion effectif D_e (m^2/s) est déterminé à partir de l'équation de Nernst-Planck (équation 1) et des mesures de concentration en chlorures dans le compartiment aval en régime permanent. Le dosage a été effectué par titration potentiométrique au nitrate d'argent $AgNO_3$. Des mesures des teneurs en chlorures libres et liés dans les échantillons de bétons testés ont été effectuées, elles renseigneront sur la capacité de fixation des chlorures par la matrice.

$$J(x, t) = -D_e \frac{\partial C}{\partial x} + D_e \frac{zF}{RT} \frac{\partial E}{\partial x} C(x, t) \longrightarrow D_e = \frac{JRTL}{zFC\Delta E} \quad [\text{Eq. 1}]$$

$C(x,t)$: concentration des ions chlorure dans le béton (mol/m^3), F : la constante de Faraday=9,648.104 $J.V^{-1}.mol^{-1}$, R : la constante des gaz parfait=8,3144 $J.mol.K^{-1}$, T : température (K), z : valence du chlore, E : potentiel électrique (V), x : distance parcourue (m), t : temps (s).

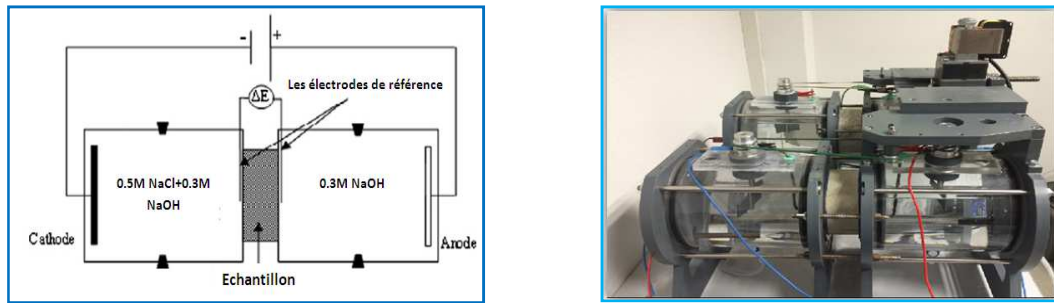


Figure 3. Photo et schéma des cellules de migration utilisées.

- Perméabilité intrinsèque : elle a été calculée à partir de l'approche de Klinkenberg et des mesures de perméabilité apparente sous différents gradients de pression compris entre 1 et 5 bars par palier de 1 bar en régime permanent, équation 2. Le fluide de percolation utilisé est l'hélium.

$$K_A = \frac{2Q\mu L P_{atm}}{A(P_i^2 - P_{atm}^2)} \quad K_A = K_{int} \left(1 + \frac{\beta}{P_m}\right) \quad P_m = \frac{P_i + P_{atm}}{2} \quad [\text{Eq. 2}]$$

Avec β le coefficient de Klinkenberg, P_i est la pression d'injection, P_{atm} est la pression atmosphérique, Q est le débit volumique; μ est la viscosité dynamique de l'hélium, P_m est la pression moyenne entre la pression atmosphérique et la pression d'injection et β . K_{int} est la pente de la droite de Klinkenberg.

3. Résultats

3.1. Analyse de la microstructure

Le tableau 2 présente les résultats en termes d'eau libre et eau liée pour les 4 BAP étudiés. Les résultats montrent une teneur plus importante en eau liée pour le mélange avec MK comparé aux autres mélanges, ce qui indique une hydratation plus importante et ainsi le développement probable d'une plus grande quantité d'hydrates. Le liant à base de CEM V présente la plus forte teneur en eau libre proche de celle du ciment CEM III. Ces résultats sont en accord avec les mesures de la porosité accessible à l'eau qui montre une porosité plus faible pour le BAP à base de MK suivi de celle du BAP de référence. Le BAP-CEM III a une porosité plus élevée supérieure à celle du BAP-CEM V.

	BAP-CEM I	BAP-CEM III	BAP-CEM V	BAP-CEM I/MK
Teneur en eau libre (%)	21.1	22.8	23.3	20.8
Teneur en eau liée (%)	26.5	24.2	23.8	27.8
Porosité accessible à l'eau à 90 jours	17.4	19.9	19.1	16.1

Tableau 2. Teneur en eau libre et en eau liée mesurée par analyses thermogravimétriques

3.2. Résistance à la compression

L'évolution de la résistance en compression en fonction du temps (cure dans l'eau pendant 1, 7, 28, 90 et 360 jours) et de la nature du liant est donnée en figure 4. Les résultats montrent que pour tous les BAP étudiés, la résistance en compression augmente avec l'âge avec des cinétiques différentes en fonction de la nature du liant. Ceci peut être expliqué par la cinétique d'hydratation des différents liants et le développement des microstructures associées. L'augmentation de R_c est rapide au jeune âge pour le BAP de référence à base de CEM I. Au-delà de 28 jours, R_c continue à augmenter mais légèrement contrairement aux BAP avec MK et CEM III qui continuent à voir leur résistance augmenter sensiblement. Ceci est encore plus prononcé pour le CEM III. En revanche pour ce dernier et plus encore pour le BAP à base de CEM V, l'augmentation de R_c est très lente au très jeune âge. D'une façon générale, les additions utilisées semblent produire des résistances à la compression au jeune âge plus faibles. Par rapport au BAP de référence, la différence est faible voire négligeable dans le cas du BAP avec MK (différence de 2MPa à 7 jours). A 28 jours, R_c du BAP-MK (39 MPa) dépasse celle du BAP de référence (38 MPa). Ceci peut être expliqué par la réactivité pouzzolanique du MK d'une part et par son effet d'accélérateur de l'hydratation du clinker dus aux effets de nucléation, des effets qui deviennent connues pour le MK [WIL 96, KHA 05].

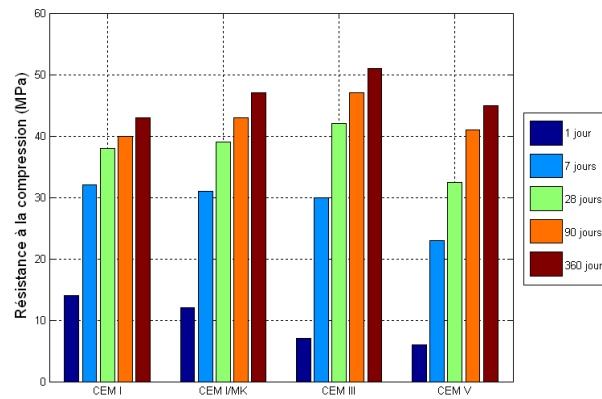


Figure 4. Evolution des résistances à la compression au cours du temps et en fonction de la nature du liant

Pour les BAP à base de CEM III et CEM V, les faibles valeurs de R_c aux jeunes âges peuvent être expliquées par la lente hydraulité et pouzzolanité du laitier. Dès 28 jours, R_c du BAP-CEM III (41 MPa) dépasse celle du BAP de référence et la dépasse de 17% à 360 jours.

3.3. Retrait Plastique

L'évolution du retrait plastique libre et en conditions endogènes en fonction du temps est tracée dans la figure 5. Les résultats montrent que les BAP avec additions montrent un retrait plastique plus important par rapport au BAP de référence en conditions de dessiccation et le contraire en conditions endogènes. Le BAP CEM I-MK présente à partir de 6 heures, le plus fort retrait plastique suivi par du CEM III et ensuite le CEM V. Une différence de 21% par rapport au BAP de référence est obtenue avec le métakaolin. Ces résultats peuvent s'expliquer par les valeurs plus élevées du taux d'évaporation données en figure 5, dues à la disponibilité en eau libre provenant de la faible cinétique d'hydratation des BAP avec additions [TUR 04].

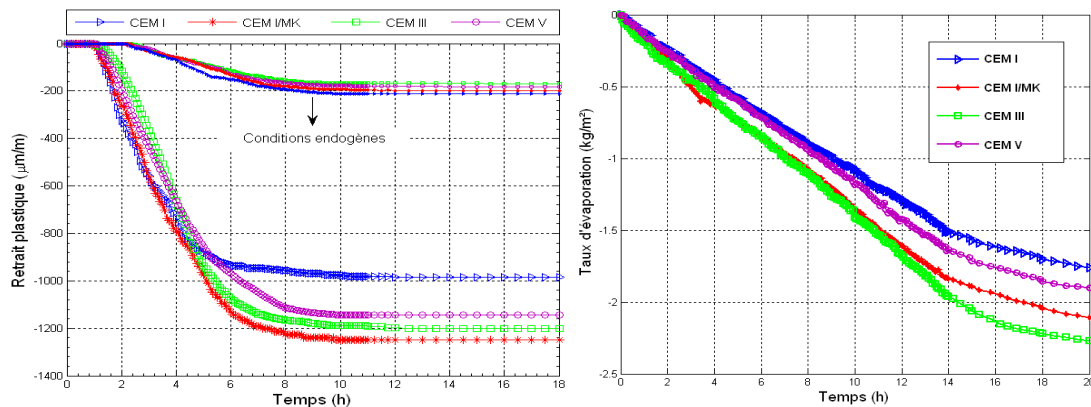


Figure 5. Retrait plastique des BAP et pertes de masse en fonction du temps

3.4. Retrait total et endogène

Les évolutions du retrait total et endogène des BAP mesurés sur des éprouvettes $7 \times 7 \times 28$ cm³ sont présentées sur la Figure 6. Le BAP-CEM III présente le plus fort retrait en conditions libres. A 400 jours, il atteint 1007 $\mu\text{m/m}$, par rapport à 711 $\mu\text{m/m}$ pour le BAP de référence et 747 $\mu\text{m/m}$ pour le BAP-CEM V. A contrario, le BAP-MK présente le plus faible retrait total, 20% plus faible que celui du BAP de référence. Le retrait du BAP de référence commence à se stabiliser à partir de 180 jours, alors que celui du CEM I-MK se stabilise à partir de 150 jours. En revanche, entre le BAP de référence et le BAP-CEM V, la différence n'est pas très significative. La figure 7 présente les résultats du retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse obtenue jusqu'à 400 jours. Le BAP-MK présente le plus faible retrait de dessiccation, ce qui corrobore avec les faibles pertes de masse obtenues pour ce mélange. Ceci peut être expliqué par la microstructure de la matrice contenant plus d'hydrates et moins d'eau libre, résultat obtenu par l'analyse thermogravimétrique. De même pour le BAP-CEM III, la forte teneur en eau libre peut expliquer au moins en partie la forte perte de masse associée au fort retrait de dessiccation obtenu. L'évolution du retrait endogène en fonction du temps (figure 6) montre un léger gonflement entre le premier jour de démoulage pour les mélanges de CEM III et CEM V. Ce gonflement de la matrice de ciment au laitier peut être lié à la formation de l'ettringite. Les résultats obtenus montrent que les BAP à base de

CEM III, CEM V et MK ont un retrait endogène plus élevé que celui du BAP de référence. Il est assez connu que le retrait endogène conséquence directe de la contraction Le Chatelier (retrait d'auto-dessiccation) est accentué dans les bétons à microstructures fines dans lesquels la taille réduite des pores favorise les dépressions capillaires [AMB 94], ce qui est le cas pour nos mélanges à base de laitier, cendres volantes et MK.

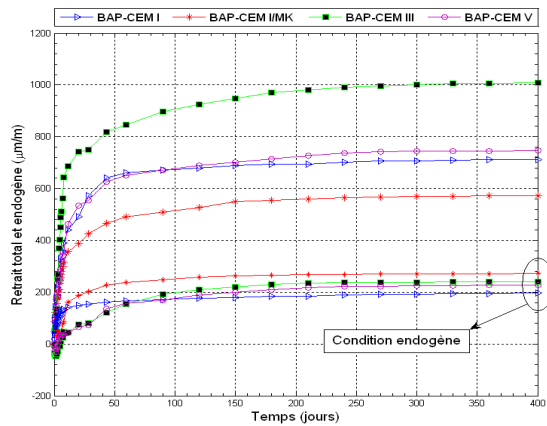


Figure 6. Retrait total et endogène des BAP

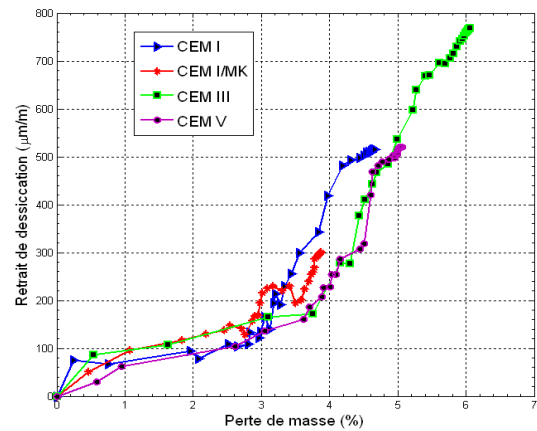


Figure 7. Retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse

3.5. Retrait empêché

Les essais de retrait empêché ont été réalisés sur une période de 40 jours. Le décoffrage a lieu 24 h après la fabrication des BAP. Les mesures ont été enregistrées dès le démoulage. La figure 8 présente les déformations, les contraintes résiduelles calculées à partir des déformations de l'anneau et l'évolution des largeurs des fissures.

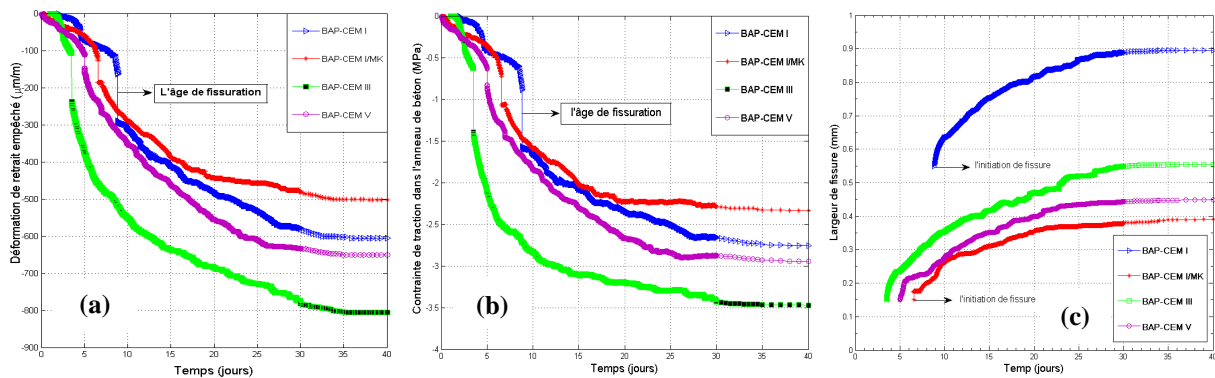


Figure 8. Déformations (a), Contraintes de traction (b) et Evolution des largeurs de fissures (c)-retrait empêché

Les déformations dues au retrait empêché génèrent des contraintes de traction dans l'anneau de béton. Ces contraintes, si elles dépassent un certain seuil proche de la résistance en traction, peuvent entraîner la fissuration du béton et, par conséquent, des problèmes de durabilité. A partir des mesures de déformations de l'anneau de béton et d'acier, nous pouvons calculer les contraintes de traction résiduelle dans ces anneaux. Le calcul des contraintes dans un anneau élastique soumis à une pression interne est un problème classique de la Mécanique des Milieux Continus. Yuan Gao et Jun Zhang [YUA 13] ont proposé une méthode de calcul pour l'anneau de fissuration, dans le cas d'un béton viscoélastique. Ces contraintes sont calculées selon l'équation $\sigma_{eff}(t) = \sigma_{tot}(t) - \sigma_R(t)$ où $\sigma_{eff}(t)$ est la contrainte effective due qu'au seul effet du retrait, $\sigma_{tot}(t)$ est la contrainte totale mesurée par les déformations empêchées et $\sigma_R(t)$ la contrainte due au fluage. Dans cette équation et pour bien considérer la contrainte de traction effective générée dans l'anneau de béton, il faut soustraire l'effet de la relaxation. Sur les courbes présentées dans la figure 8, la chute des déformations indique l'âge de fissuration. Lors du suivi du retrait restreint à l'aide de l'essai à l'anneau en condition de dessiccation, le BAP de référence fissure plus tard (8.83 jours) par rapport aux BAP-CEM III (3.5 jours) et CEM V (5.1 jours). L'utilisation de 15% de métakaolin diminue encore plus l'âge de fissuration (2.27 jours). Ce résultat peut s'expliquer par les résistances plus faibles des BAP avec additions au jeune âge. En revanche, les ouvertures des fissures de ces BAP sont plus petites que celle du BAP de référence. La figure 8 montre que le BAP CEM III présente les plus fortes déformations ce qui corrobore avec les résultats du retrait libre. Les amplitudes du retrait

empêché des BAP à base de CEM I et CEM V sont comparables: $610 \mu\text{m/m}$ et $650 \mu\text{m/m}$ respectivement à 40 jours. La substitution du CEM I par 15% de MK entraîne une diminution du retrait empêché de 18%.

3.6. Propriétés de transports

3.6.1. Migration des ions chlorures

L'évolution de la concentration en chlorures dans le compartiment aval en fonction du temps est présentée sur la figure 9. Les résultats montrent l'effet positif indéniable des additions utilisées sur la réduction de la cinétique de migration des chlorures dans les BAP. Le coefficient de diffusion effectif obtenu pour le BAP de référence est égal à $3.8510^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ alors qu'il est égale à $1.3310^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le BAP CEM III, $2.05 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le BAP CEM V et $0.89 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le BAP avec du métakaolin, soit une réduction d'un facteur de 4.3 pour le BAP CEM I-MK.

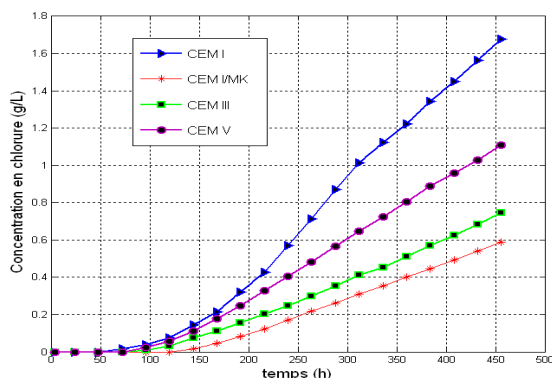


Figure 9. Evolution de la concentration des chlorures dans le compartiment aval des cellules de diffusion

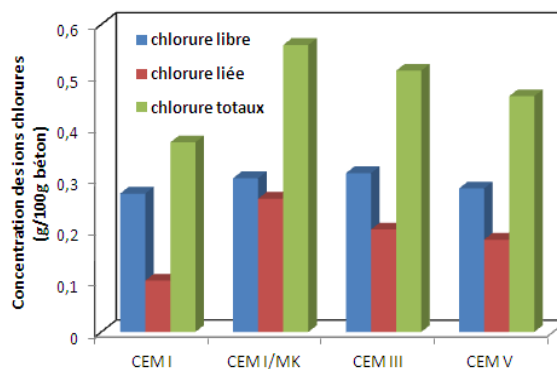


Figure 10. Teneur en chlorures liés, libres et totaux des BAP

On observe aussi une diminution du temps de retard en fonction de la nature des additions. En effet le temps de retard, mesurant la durée de la phase transitoire est d'environ 72h, 110h, 90h et 120 h pour le BAP de référence, le BAP CEM III, le BAP CEM V et le BAP CEMI-MK. Ces résultats nous renseignent sur le réseau poreux et sur la microstructure des différents BAP qui paraît beaucoup plus tortueuse pour le BAP avec métakaolin suivi du BAP CEM III et en moindre mesure pour le BAP CEM V. Il est effectivement connu que les laitiers de haut fourneau et les cendres volantes augmentent la tortuosité et diminuent la connectivité des pores ce qui améliore les propriétés de transport. Ces résultats sont en accord avec les valeurs de porosité accessible à l'eau. Les résultats des mesures des chlorures liés corroborent avec ces constats (figure 10). Le BAP CEM I-MK présente la plus forte teneur en chlorures totaux, ce qui est en adéquation avec une matrice contenant une plus grande quantité d'hydrates. Une teneur plus élevée de 34% par rapport au BAP de référence. Pour le BAP CEM III, la teneur en chlorures liés est plus importante que celle du BAP de référence, ceci peut être expliqué par la capacité de fixation plus élevée de cette matrice cimentaire. Le même constat avec une plus faible amplitude peut être fait pour le BAP CEM V.

3.6.2. Perméabilité intrinsèque

La figure 11 présente l'évolution de la perméabilité intrinsèque des différents BAP. Les résultats correspondent aux moyennes arithmétiques obtenues sur trois éprouvettes. Les résultats montrent que la perméabilité intrinsèque est directement influencée par la nature du liant. L'effet positif des additions est là encore bien vérifié. Alors que la perméabilité intrinsèque du BAP de référence est égale à $6.54 10^{-16} \text{ m}^2$, celle du BAP CEM III est plus faible égale à $1.99 10^{-16} \text{ m}^2$ et $3.1 10^{-16} \text{ m}^2$ pour le CEM V. Ici aussi, le BAP CEM I-MK présente les meilleures performances avec une perméabilité 4 fois plus faible que celle du BAP de référence. Ces résultats peuvent être expliqués par la microstructure très probablement plus tortueuse avec une porosité plus fine due à l'utilisation du MK et en moindre mesure le ciment CEM III et enfin le CEM V. Ces résultats sont en accord avec les valeurs obtenues de porosité accessible à l'eau. Le coefficient de diffusion D_e est corrélé à la perméabilité intrinsèque comme le montre la figure 12. Des travaux antérieurs [SUG 96] ont également mentionné l'existence d'une grande corrélation entre la perméabilité au gaz et la diffusion des ions chlorures. Selon Sugiyama et al. [SUG 96], la corrélation entre les coefficients de perméabilité et ceux de la diffusion est due au fait que ces deux propriétés physiques sont liées en grande partie au même facteur qui est le rapport Eau/Liant.

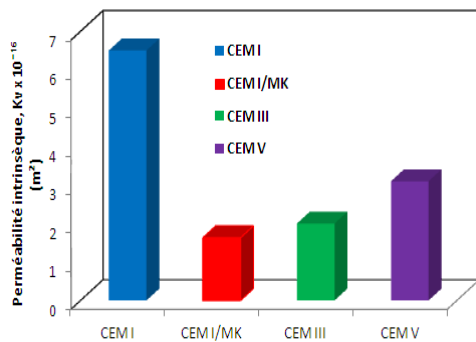


Figure 11. Perméabilité intrinsèque des BAP étudiés

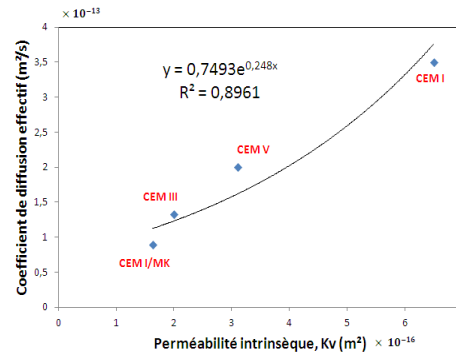


Figure 12. Evolution du coefficient de diffusion effectif en fonction de la perméabilité intrinsèque.

Conclusion

Un des freins de l'utilisation plus massive des BAP est leur coût plus élevé, leur retrait souvent plus grand et le manque de recul concernant leur durabilité. Cette étude contribue à la formulation et la caractérisation de BAP plus écologiques basés sur l'utilisation d'additions minérales en substitution du ciment portland. Trois types d'additions sont traités : du métakaolin (MK), du laitier de haut fourneau et des cendres volantes. Quatre BAP ont été formulés à partir d'une même composition où seule la nature du liant change : CEM I (BAP de référence), CEM I+15% de MK, CEM III et CEM V. L'effet de la nature du liant sur : la cinétique de développement de la résistance à la compression R_c , le retrait plastique, le retrait empêché, le retrait libre a été quantifié. Deux indicateurs de durabilité ; le coefficient de migration des chlorures et la perméabilité au gaz ont été évalués. Les résultats montrent que :

- Les différentes additions étudiées améliorent indéniablement les propriétés de transport à moyen terme. L'effet du MK est plus important que celui du CEM III suivi du CEM V.
- La substitution partielle du CEM I par 15% de MK permet le développement de BAP de très bonnes performances globales : une résistance à la compression plus élevée dès au moins 28 jours de cure, un coefficient de migration des ions chlorures et une perméabilité au gaz plus faibles d'au moins un facteur de 4, un retrait de dessiccation et des ouvertures de fissures sensiblement plus faibles. En revanche, R_c au jeune âge est légèrement inférieure ce qui explique une fissuration apparue plus tôt en cas de retrait empêché. L'utilisation du MK nécessite en revanche un dosage plus élevé en superplastifiant ce qui générera certainement un surcoût.
- La substitution totale du CEM I par du CEM III présente des avantages certains en terme d'augmentation importante de R_c à partir de 28 jours, de la diminution indéniable de la perméabilité et de la diffusivité. En revanche, de faibles R_c à court terme et un retrait de dessiccation très important sont développés.
- Des premières analyses de la microstructure basées sur les mesures d'eau et des chlorures libres et liés ainsi que sur les résultats des essais de transport permettent d'apporter des éclaircissements pour expliquer les différents résultats obtenus.

4. Bibliographie

- [AMB 94] Ambroise J., Maximilien S., Pera J., «Properties of metakaolin blended cements», *Adv Cem Based Mater* 1994;1-4:161-8.
- [KHA 05] J.M. Khatib., J.J. Hibbert., «Selected engineering properties of concrete incorporating slag and Métakaolin», *Construction and Building Materials* 19, 460-472(2005)
- [SUG 96] Sugiyama T., Bremner T.W., and Tsuji Y., «Determination of chloride diffusion coefficient and gas permeability of concrete and their relationship», *Cem. and Concr Res*, Vol. 26, No. 5, pp. 781-790, 1996.
- [TUR 04] Turcry P., Loukili A., «Evaluation of plastic shrinkage cracking of self-consolidating concrete», *ACI Materials journal*, 2006, 272-279
- [WIL 96] Wild S., Khatib JM., Jones A., «Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticized metakaolin concrete», *Cem Concr Res* 1996;26:1537-44.
- [YUA 13] Yuan Gao., Jun Zhang, Po Han., «Determination of stress relaxation parameters of concrete in tension at early-age by ring test», *Construction and Building Materials* 41 (2013) 152-164