

INFLUENCE DES PARAMÈTRES RHÉOLOGIQUES DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS SUR LEUR DURABILITÉ

INFLUENCE OF RHEOLOGICAL PARAMETERS ON DURABILITY OF SELF CONSOLIDATED CONCRETE

B. AÏSSOUN^{1,2} ; K. KHAYAT^{1,3} ; J.-L. Gallias² ; A. KACI²

¹ Département de Génie civil de l'Université de Sherbrooke 2500 boul. de l'université J1K 2R1 Sherbrooke Canada

² L2MGC Université de Cergy Pontoise 5 Mail Gay-Lussac, 95031 Neuville-sur-Oise cedex, France

³ Engineering Research Lab. Rolla Missouri University of Science and Technology 224, MO 65409 U.S.A

1. INTRODUCTION

La réussite de la mise en place et de la consolidation des bétons traditionnels dans les coffrages dépend essentiellement de la formulation du béton, de sa consistance et des moyens de coulage et de vibration mis en œuvre. Plusieurs règles de l'art ont été établies quant aux conditions de coulage et de vibration à respecter en fonction de la consistance du béton et de la complexité du coffrage afin d'assurer le bon enrobage des armatures, l'absence de défauts de compacité et la qualité du parement. Ces caractéristiques sont, avec la formulation du béton et la cure, les principaux paramètres garantissant la pérennité du béton.

Dans le cas des bétons autoplaçants (BAP), grâce à leur grande fluidité, la mise en place dans les coffrages a lieu par écoulement libre sous l'effet du poids propre et leur consolidation résulte de l'action des forces d'Archimède sur les bulles d'air incluses dans le béton. Ce sont donc les propriétés d'écoulement du béton qui doivent jouer un rôle important sur les propriétés de durabilité. [CHI 03] ont été les premiers à étudier la relation possible entre les propriétés à l'état frais des bétons fluides, avec des rapports E/C supérieurs à 0,6 mais pas autoplaçants ($270\text{mm} \leq \text{étalement} \leq 490\text{mm}$) et leur durabilité. Bien qu'une relation globale entre sorptivité et propriétés d'écoulement fût établie, le rôle spécifique des propriétés rhéologiques ne peut

pas être facilement évalué dans la mesure où plusieurs paramètres varient simultanément et le nombre de bétons étudiés n'est pas important. De plus, les paramètres rhéologiques ont été déterminés par des calculs sur la base d'essais empiriques.

Notre objectif est d'étudier l'effet spécifique des propriétés d'écoulement des BAP à l'état frais sur leur durabilité. Pour cela, 17 formulations de BAP ont été étudiées. Elles se différencient par les dosages en superplastifiant (SP) et en agent de viscosité (VMA) permettant de modifier les propriétés rhéologiques. Les autres paramètres de formulation sont maintenus constants. Les propriétés rhéologiques du béton à l'état frais ont été caractérisées par des essais empiriques (mesures d'étalement, de T500 et d'indice de ségrégation) et des mesures rhéologiques. La sorptivité a été choisie comme indice de durabilité du béton. Elle caractérise l'évolution de l'absorption de l'eau par le béton par capillarité en conditions partiellement saturées. Ce travail de recherche fondamentale ouvre la voie d'une optimisation de la durabilité des BAP et à ce titre il peut intéresser tous les utilisateurs des BAP.

2. MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

2.1. Formulation des bétons

Toutes les formulations de BAP étudiées peuvent être utilisées pour la construction des ouvrages d'art ou pour l'industrie de la préfabrication. Ils respectent les exigences normatives de la norme canadienne CSA-A23.2-09 vis-à-vis des environnements climatiques sévères. Dans le cadre de la normalisation française et européenne (NF EN 206.1), ils répondent aux spécifications des bétons exposés aux classes d'exposition XF4 et XD3.

Les bétons sont composés d'un ciment, d'un sable, d'un gravillon, d'un superplastifiant, d'un agent entraîneur d'air et éventuellement d'un agent de viscosité. Un ciment ternaire, nommé Gub-F/SF, a été utilisé dans cette étude. Il est composé d'environ : 75% de ciment à usage général (type GU selon la norme canadienne/CSA-A3001-08), 5% de fumée de silice et de 20% de cendre volante. Il est généralement recommandé pour les bétons susceptibles d'être soumis à des conditions environnementales sévères. Le squelette granulaire a été optimisé avec un logiciel d'optimisation granulaire [SED 00] de manière à avoir une compacité maximale. Les classes granulaires du sable et des gros granulats sont respectivement 0/5 et 5/14 et leur granulométrie est conforme à la norme CSA A23.2-2A. L'agent de viscosité de type hydroxypropyl-methyl cellulose, sous forme de poudre, dilué dans de l'eau (concentration massique 0,106 kg/l) a été utilisé. Le superplastifiant utilisé est un polycarboxylate ayant une densité de 1,07 et un extrait sec de 30,2%. L'agent entraîneur d'air utilisé est une solution liquide d'acides gras sulfonés de densité relative 1,007 ayant un pH de 9,5 et un extrait sec de 10,5%.

Les dix-sept formulations étudiées ici présentent un dosage en ciment, un rapport E/L constant et un squelette granulaire identique. Les dosages en superplastifiant (SP), en agent de viscosité (AV) et en agent entraîneur d'air (AEA) ont été modifiés (tableau 1) afin de couvrir différentes zones rhéologiques correspondant à des seuils de cisaillement et à des viscosités faibles, moyennes et élevées. D'une manière générale, la variation du seuil de cisaillement est corrélée empiriquement à la variation de l'étalement et la variation de la viscosité est corrélée empiriquement à la variation du temps T₅₀₀.

No. Bétons.	Groupe 1
Ciment (kg/m ³)	425
Eau (kg/m ³)	170
Rapport E/C	0.4
Rapport S/G (par volume)	1
Sable (kg/m ³)	823
Gros granulat (kg/m ³)	860
Superplastifiant (SP en %)	0.17-0.63
AV (%)	0-0.5
AEA (%)	0.002-0.004
Diamètre d'étalement	450-700
T ₅₀₀ (s)	2-9

Tableau 1 : Composition des bétons étudiés.

Nous avons réparti les 17 formulations BAP étudiées en 4 groupes (figure 1). Le premier groupe est constitué de cinq bétons (béton 1 à 5) obtenus en variant les dosages en superplastifiant et en agent de viscosité de manière à obtenir un étalement de 500 à 600 mm et un temps T₅₀₀ de 2 à 4s. Le deuxième groupe est composé de cinq bétons (désigné 6 à 10) ayant des étalements compris entre 600 et 700 mm et le temps T₅₀₀ entre 2 et 4s. Le troisième groupe (bétons 11 à 15) est composé de cinq bétons avec des étalements compris entre 500 et 700 mm et des temps T₅₀₀ compris entre 4 et 9s. Les deux bétons restants (béton 16 et 17) constituant le quatrième groupe ont un étalement de 450 et 490 mm et par conséquent ne figurent pas sur le schéma, puisque le T₅₀₀ ne peut pas être mesuré dans ce cas.

2.2. Mesures expérimentales

L'étude de l'éventuelle relation entre les paramètres rhéologiques et la durabilité, est appuyée sur deux campagnes d'essais. La première est réalisée parallèlement à la confection des éprouvettes, en l'occurrence à l'état frais.

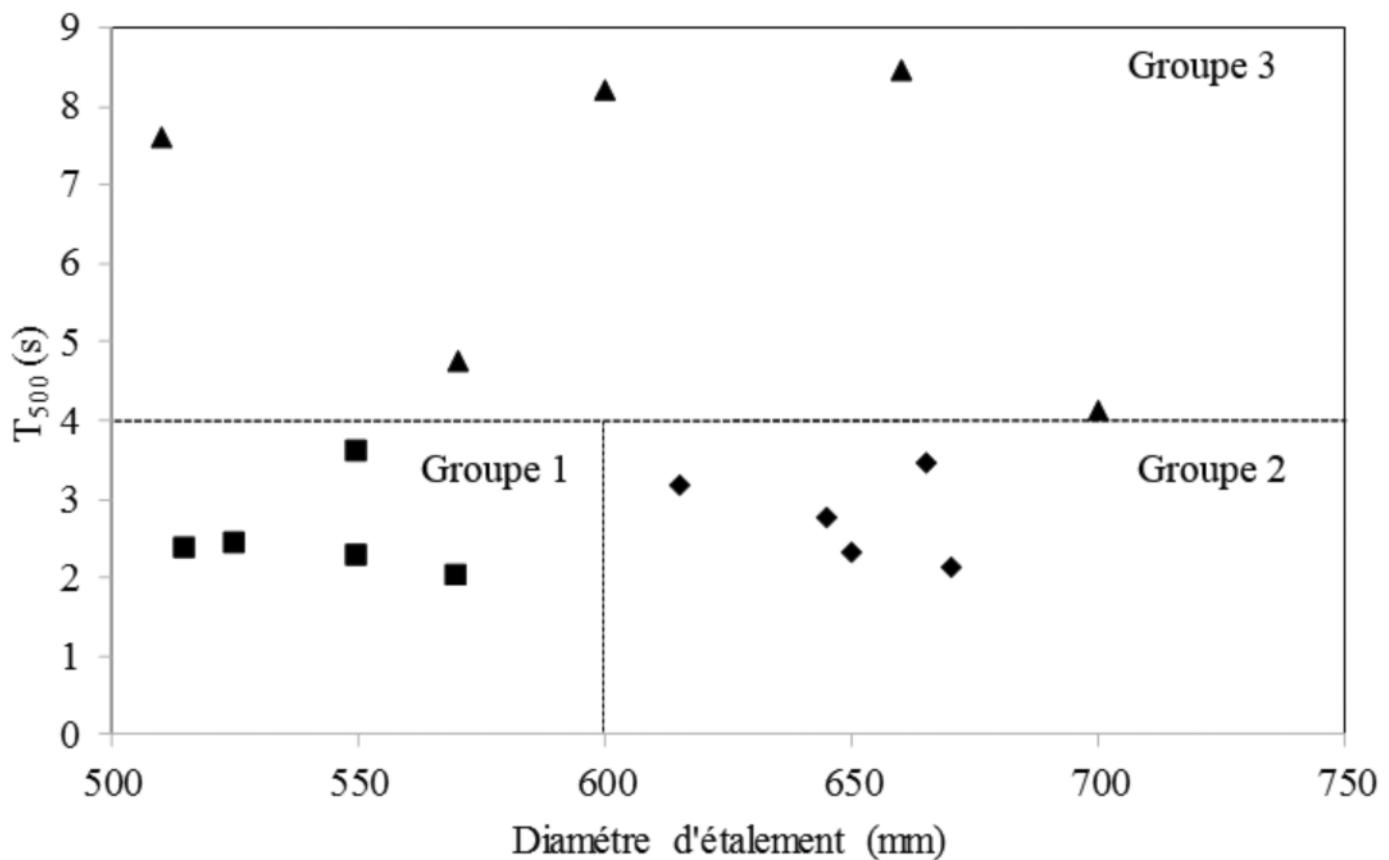


Figure 1 : Bétons formulés à différents comportements rhéologiques.

Les paramètres rhéologiques sont mesurés moyennant des essais empiriques (mesure de l'étalement et du T_{500}) et des essais au rhéomètre. Quand à la deuxième campagne, elle est effectuée sur des bétons mûris pendant 28 jours dans un environnement contrôlé (chambre à 23 °C et à 100% d'humidité relative). La sorptivité obtenue à partir de l'essai d'absorption capillaire, a été choisie comme indicateur de durabilité et par conséquent est le paramètre principal d'étude à l'état durci. D'autres essais complémentaires ont été effectués pour estimer la porosité accessible par l'eau à l'état durci du béton. Il s'agit de l'essai de densité et d'absorption décrit par la norme ASTM C642. La hauteur d'ascension de l'eau dans le béton a été calculée à partir des résultats des essais de l'absorption capillaire et de la porosité accessible par l'eau.

2.2.1. Mesures à l'état frais

Le test d'étalement a été choisi en premier lieu pour définir le domaine rhéologique de l'étude. Il a été effectué conformément à la norme ASTM C 1611 permettant de mesurer également le T_{500} , c'est-à-dire le temps nécessaire en secondes pour que l'étalement du béton autoplâçant atteigne un diamètre de 500 mm (Figure 2). Cette norme est équivalente à la norme française NF EN 12350-8. D'autres essais de convenance ont été également effectués pour la mesure du volume d'air équivalente à la méthode de la colonne d'eau de la norme NF EN 12350-7, de la masse volumique (ASTM C 231 équivalente à NF EN

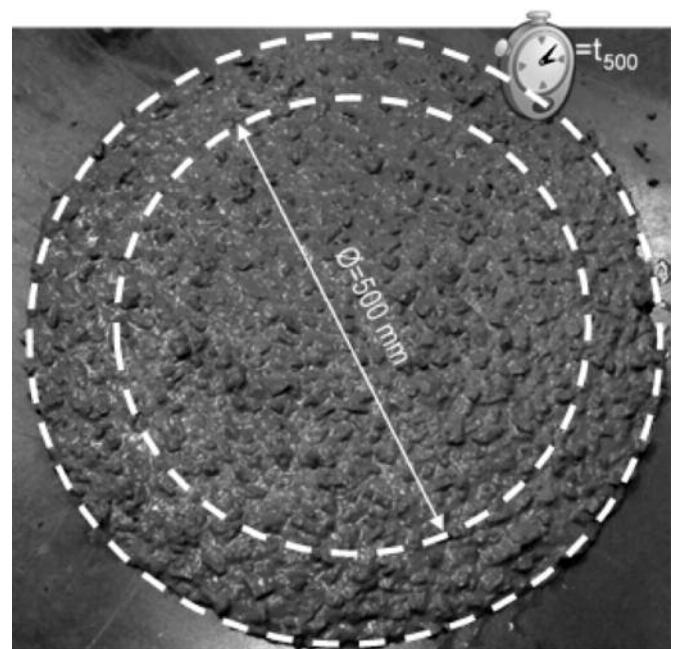


Figure 2 : Essai d'étalement et mesure du temps à 500 mm d'étalement (T_{500}).

12350-6) et de l'indice de ségrégation statique “ S_s ” (ASTM C 1610). L'essai français correspondant à l'essai de ségrégation statique ASTM C 1610 est l'essai au tamis de la norme NF EN 12350-11. Les deux essais visent à caractériser le potentiel de ségrégation, mais ils se basent

sur de modes opératoires différents. La norme française mesure le pourcentage de laitance récupéré à travers un tamis sur 5kg de béton tandis que la norme ASTM C1610 s'intéresse à la répartition des gros granulats à travers une colonne de 660 mm de hauteur. L'essai ASTM C1610 n'a été effectué que sur des bétons qui ont des étalements supérieurs à 600 mm car en dessous de cette valeur les bétons ne présentent pas de risque de ségrégation. Il n'y a pas d'études à ce jour concernant l'équivalence des résultats obtenus par ces deux normes.

Le rhéomètre de dernière génération Contec 5 a été utilisé pour déterminer les paramètres rhéologiques. C'est un rhéomètre de type Couette à cylindre intérieur de 10 cm de rayon et de 12,5 cm de hauteur et à cylindre extérieur de 14,5 cm de rayon rainuré pour éviter le glissement. Cela fait un entrefer de $4.5\text{cm} > 3D_{\max}$. Le cylindre extérieur est animé d'un mouvement de rotation uniforme et le cylindre intérieur est maintenu immobile. Les couches du béton dans l'entrefer sont alors soumises à un mouvement relatif les unes par rapport aux autres correspondant à une vitesse de cisaillement donnée et soumises à une contrainte de cisaillement en tout point de l'échantillon. Les paramètres rhéologiques du béton (seuil de cisaillement et paramètres de viscosité) sont déterminés sur la base d'un modèle rhéologique à partir de la relation entre le moment nécessaire à la rotation et la vitesse de rotation mesurés par le rhéomètre (figure 3).

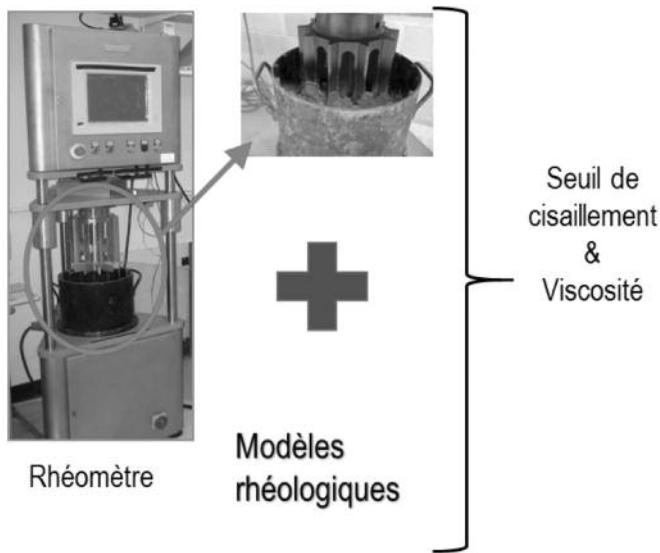


Figure 3 : Détermination des paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité) à l'aide d'essais rhéométriques.

Les essais rhéologiques ont été effectués dans une salle où la température et l'humidité relative sont identiques pour tous les bétons. Le béton est pré-cisaillé pendant 20 s à vitesse maximale (0,7 tps). Ensuite suit une phase de descente constituée de dix paliers de vitesses allant de 0,5 tps à 0,025 tps pendant 64 s. Pour chaque palier cinquante mesures de couple ont été enregistrées. La valeur retenue correspond au régime établi où il est clairement identifié une zone de stabilité (moyenne des moments mesurés). Les valeurs aberrantes des moments, qui peuvent être essentiellement dues à une augmentation locale du seuil par la formation momentanée d'un blocage de gros granulats sont

ignorées. De plus, une mesure supplémentaire de couple a été effectuée pour une valeur de cisaillement correspondant à deux tiers de la vitesse maximale (soit 0,31 tps). Cette mesure permet de vérifier si le béton a ségrégué pendant l'essai rhéologique [HEI 08]. Toutes les mesures rhéologiques ont été terminées 20 mn après le début du malaxage garantissant une faible évolution de l'hydratation (période dormante).

En général, le comportement rhéologique des bétons ordinaires suit une loi linéaire et le modèle de Bingham est suffisant pour décrire le comportement rhéologique. Ce n'est pas le cas des bétons fortement adjuvants. Le modèle d'Herschel-Bulkley (HB) (équation [1]) semble répondre mieux pour décrire de tels comportements.

$$\tau = K\gamma^n + \tau_0 \quad [1]$$

Avec τ_0 : Seuil de cisaillement, K : indice de viscosité et n : indice de fluidité.

2.2.2. Mesures à l'état durci

La caractérisation de la durabilité des bétons durcis a été effectuée sur la base d'un essai d'absorption capillaire (ou de sorptivité). C'est un essai qui consiste à mesurer par pesées successives, la quantité d'eau absorbée par un échantillon de béton préalablement séché jusqu'à poids constant (figure 4). Cet essai permet de déterminer la sorptivité (exprimée en $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}^{1/2}$). C'est un indice de durabilité qui représente la vitesse d'absorption de l'eau par le béton dé-saturé. En d'autres termes, la sorptivité est la pente de la courbe qui relie l'absorption capillaire à la racine carrée du temps. [GAG 11] ont montré qu'il existe une bonne corrélation entre la sorptivité des bétons traditionnels et leur écaillage qui est aussi une propriété caractéristique de la durabilité suite aux cycles de gel-dégel et notamment s'il y a eu usage de sels déverglaçants.

L'essai d'absorption capillaire a été effectué sur des échantillons de 50 mm d'épaisseur prélevés au cœur de carottes de 100 mm de diamètre (Figure 5b). Les carottes ont été prélevées à partir de la surface latérale de blocs de dimensions 500 x 400 x 200 mm (H x L x e) dans le sens de l'épaisseur (figure 5a). Le coulage des blocs de bétons et les essais rhéologiques ont été effectués simultanément pour éliminer l'effet du temps d'attente sur les propriétés rhéologiques des blocs de bétons.

L'essai d'absorption capillaire a été effectué suivant les recommandations de l'Association Française de Génie Civil [GRA 07]. Les échantillons ont été séchés à 80°C dans une étuve ventilée jusqu'à ce que la variation de masse entre deux pesées successives espacées de 24h soit inférieure à 0,1%. Ce seuil est atteint au bout de 30 jours environ. Pour les pesées pendant le séchage, les échantillons sont préalablement refroidis à humidité relative de 50% et à une température de 20°C. Lorsque le séchage est complet, toutes les faces extérieures des échantillons cylindriques sauf les faces étudiées, ont été imperméabilisées après les avoir laissé refroidir sous une humidité relative de 60%. Les mesures des masses sèches sont ensuite effectuées et les échantillons sont placés dans un bassin d'eau de 10 mm d'épaisseur, faces étudiées immergées. La quantité d'eau absorbée dans le temps par ascension capillaire a été déterminée par une mesure pondérable à diffé-

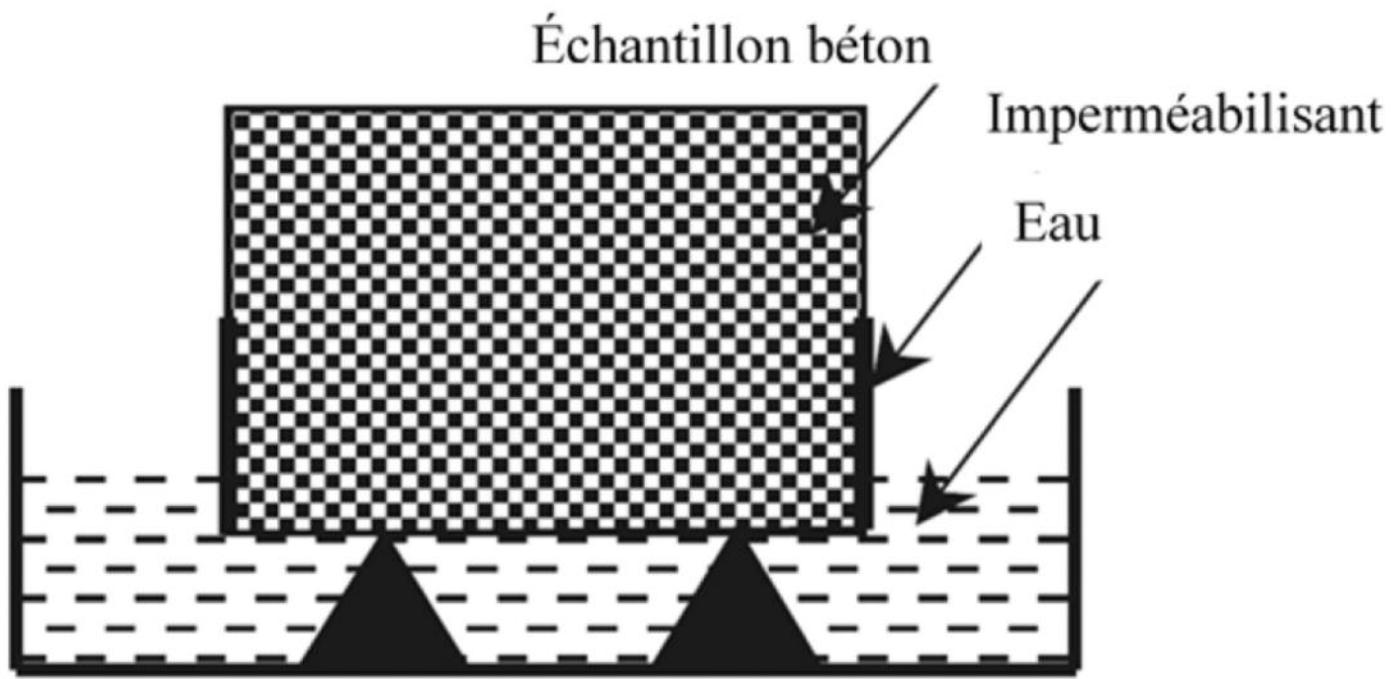


Figure 4 : Principe de mesure de l'absorption capillaire.

rentes échéances de temps : 30mn, 1, 3, 6, 9, 24, 48, 72 hrs. L'ascension de l'eau dans l'échantillon de béton se fait rapidement dans les premières minutes et diminue au fur et à mesure dans le temps. La sorptivité, s , a été déterminée suivant une loi linéaire qui relie l'absorption capillaire, I , et la racine carrée du temps (équation [2]) dans les intervalles de temps 0-1h, 1-6h, 6-24h et 24-72h. Chaque résultat représente la moyenne de 3 mesures sur échantillons.

$$I = s \sqrt{t} + b \quad [2]$$

Avec I : absorption capillaire en cm^3/cm^2 , s : sorptivité en $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{t}^{1/2}$, b : ordonnée à l'origine ($0 \leq t = 0$ et $>0 \geq t > 0$). La hauteur d'ascension de l'eau a également été déterminée. Elle peut être considérée comme un critère de durabilité dans la mesure où elle renseigne sur la profondeur de pénétration de l'eau dans le béton d'enrobage. Le principe de calcul de la hauteur d'ascension est donné par l'équation [3].

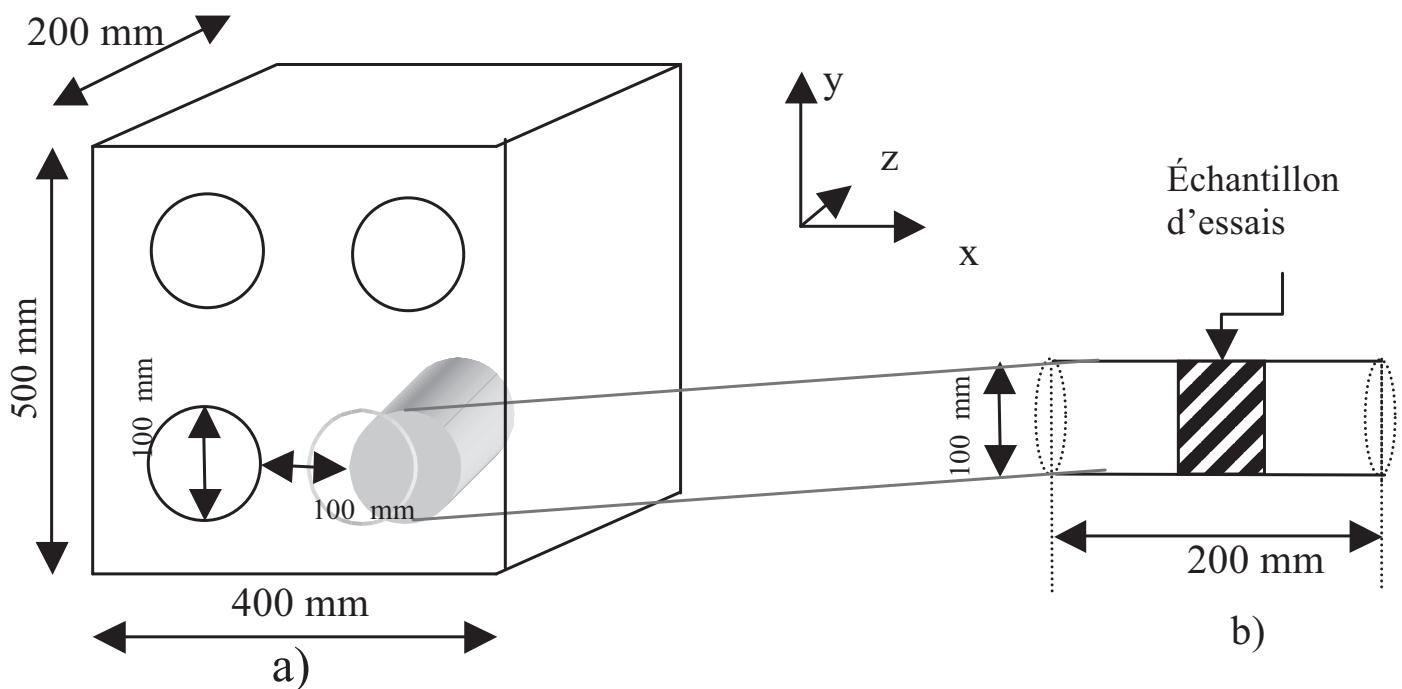


Figure 5. Bloc de béton (a) et prélevement des échantillons sur carottes pour essai d'absorption capillaire (b)

$$H_{th}(\%) = \frac{I}{p} \quad [3]$$

Où H_{th} est la hauteur d'ascension, I est le volume d'eau absorbée par cm^2 de surface exprimée (équation [2]) en cm^3/cm^2 et p est la porosité accessible par l'eau obtenue par l'essai ASTM C642.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les propriétés des bétons étudiés sont résumées dans le tableau 2. La masse volumique de tous les bétons étudiés varie entre 2170 et 2320 kg/m^3 . Les paramètres rhéologiques K , τ_0 et n du modèle Herschel Bulkley ont été calculés à partir des équations proposées par [HEI 08]. Les essais d'absorption capillaire ont été poursuivis jusqu'à 72 heures, car à cette date, la plupart des échantillons atteignent généralement 80% de leur stabilisation. Deux bétons (N°5 et 7) ont été choisis pour la poursuite de l'essai jusqu'à 14 jours pour la confirmation de la tendance observée. Ces bétons ont été sélectionnées parce qu'ils contiennent respectivement un faible et fort dosage en agent de visco-

sité. Après 14 jours d'essai de sorptivité, d'autres phénomènes comme la carbonatation pourraient se produire et compromettre les résultats. La sorptivité S_s a été mesurée sur 4 intervalles de temps : entre 0 et 1 heure (désignée S0-1), entre 1 et 6 heures (S1-6), entre 6 et 24 heures (S6-24) et enfin entre 24 et 72 heures (S24-72). Les valeurs de sorptivité des BAP sont données avec une précision de $\pm 0,00005 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}^{1/2}$. Notons également que les sorptivités mesurées ne dépassent en aucun cas $0,002 \text{ cm/s}^{1/2}$. Plusieurs études [CON 85 ; HAL 89] considèrent que la sorptivité d'un béton est « bonne » si elle est inférieure à $0,005 \text{ cm/s}^{1/2}$. Les résultats obtenus montrent que tous les bétons étudiés ont une faible sorptivité.

3.1. Influence des paramètres rhéologiques sur la sorptivité

Les figures 6a et 6b représentent l'évolution de la sorptivité des BAP entre 0 et 1h en fonction des paramètres empiriques tels que l'étalement et le T_{500} et les figures 7a et 7b représentent l'évolution de la même sorptivité en fonction des paramètres du modèle Herschel-Bulkley

Groupe	Bétons				Essais empiriques					Paramètres Rhéologiques (modèle H.B.)		
No	No	SP (%)	AV (%)	SF (mm)	ρ (Kg/m^3)	Air (%)	T_{500} (s)	S_s (%)	τ_0 (Pa)	K (Pa.s ⁿ)	n	
1	1	0.21	0.00	515	2239	7.0	2.34	1.1	87	34	0.801	
	2	0.21	0.00	525	2320	6.0	2.41	—	85	34	0.874	
	3	0.17	0.00	570	2175	8.0	2.01	1.6	88	34	1.052	
	4	0.21	0.04	550	2217	8.2	2.25	1.2	105	44	0.902	
	5	0.25	0.07	550	2226	8.0	3.59	—	52	74	0.755	
2	6	0.27	0.06	615	2249	7.0	3.19	2.5	56	68	0.791	
	7	0.24	0.04	645	2203	8.2	2.75	2.7	37	69	0.680	
	8	0.19	0.00	650	2218	8.0	2.31	2.3	29	50	0.770	
	9	0.30	0.07	665	2250	6.5	3.47	5.0	28	57	0.816	
	10	0.21	0.00	670	2245	7.0	2.13	3.2	35	38	0.896	
3	11	0.21	0.12	510	2204	8.4	7.61	—	90	137	0.667	
	12	0.19	0.08	570	2171	8.0	4.75	1.6	60	108	0.742	
	13	0.30	0.12	600	2287	6.2	8.22	1.6	46	114	0.745	
	14	0.63	0.20	660	2193	7.0	8.47	1.6	16	166	0.690	
	15	0.53	0.12	700	2190	6.0	4.12	2.6	9	111	0.745	
4	16	0.22	0.07	450	2225	6.5	—	—	127	95	0.747	
	17	0.19	0.00	490	2274	6.0	—	—	98	41	0.753	

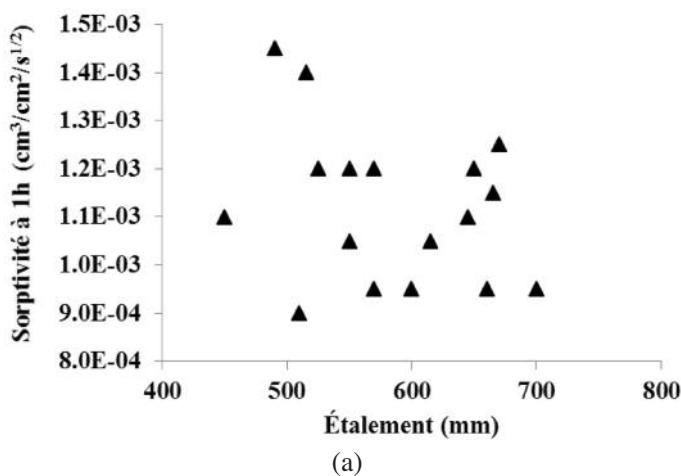
Tableau 2. Propriétés des bétons à l'état frais.

(équation [1]). Aucune corrélation forte ne se dégage entre l'étalement et la sorptivité (Fig. 6a). Le même constat est fait pour le seuil de cisaillement (Fig. 7a). En revanche, il existe une corrélation entre le temps T_{500} et la sorptivité et entre l'indice de viscosité K et la sorptivité (Fig. 6b et 7b). La sorptivité diminue lorsque T_{500} ou K augmentent. Cependant, l'augmentation du T_{500} au-delà de 4s n'a plus d'influence significative sur la sorptivité. De plus, l'indice de viscosité K est mieux corrélé que le temps T_{500} avec la sorptivité. En effet, l'augmentation du coefficient de consistance de 74 à 108 Pa.sⁿ par exemple a entraîné une diminution de la sorptivité entre 0 et 1h de 18%. À l'issue de ces résultats, on peut affirmer que K est le paramètre rhéologique le plus influant sur la sorptivité des bétons. En outre, il est remarqué que les bétons du groupe 3 ayant des T_{500} supérieur à 4s avec des coefficients de consistance supérieurs à 100 Pa.sⁿ ont systématiquement les sorptivités les plus faibles.

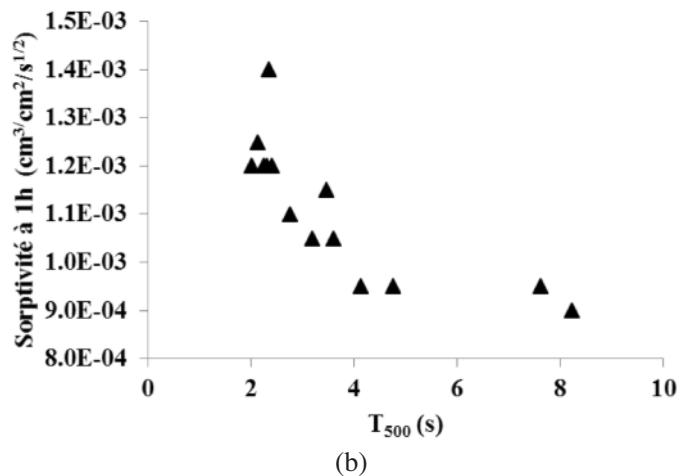
Il faut souligner que la corrélation indice de viscosité – sorptivité est beaucoup plus forte que la corrélation dosage en agent de viscosité – sorptivité (non présentée ici). Ce qui exclut l'hypothèse d'une modification directe de la sorpti-

vité par la présence de l'agent de viscosité et priviliege celle d'une action indirecte de l'agent de viscosité sur la sorptivité via son influence sur les propriétés rhéologiques du béton et plus particulièrement sur l'indice de viscosité K.

Les sorptivités mesurées à différents intervalles de temps et les hauteurs d'ascension correspondantes sont représentées en fonction de l'indice de viscosité des bétons étudiés (figures 8a et 8b). On constate que les sorptivités diminuent d'une manière sensible lorsque l'indice de viscosité des bétons augmente pour des durées d'absorption inférieures à 6h. Au-delà de 6h, la variation reste négligeable ce qui diminue le rôle de la viscosité. Pour expliquer le rôle de la viscosité sur la sorptivité, il suffit de considérer que les pores les plus gros se remplissent plus rapidement et par voie de conséquence la sorptivité des premières heures caractérise essentiellement le volume relatif des pores les plus gros. L'augmentation de l'indice de viscosité des bétons agit donc comme réducteur du volume relatif des plus gros pores. L'augmentation de la viscosité serait donc responsable de l'affinement des pores sans que le volume total des pores soit modifié compte tenu que le rapport E/C

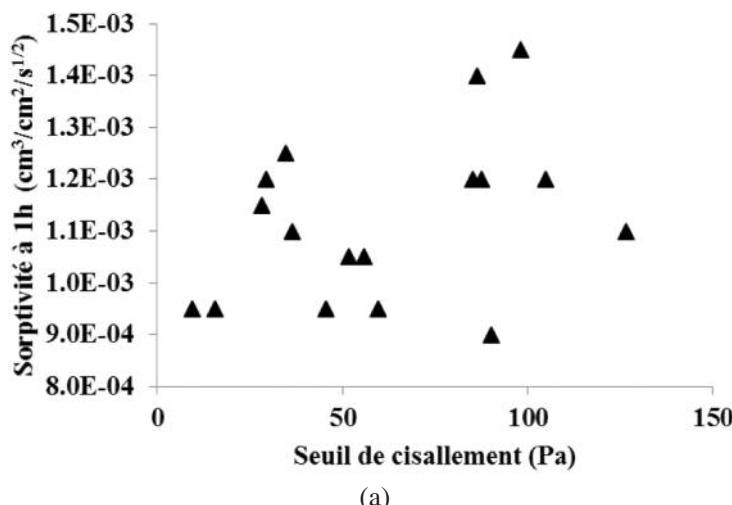


(a)

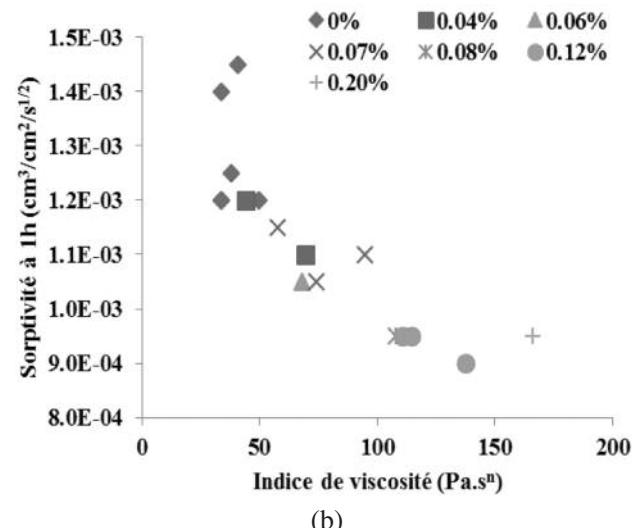


(b)

Figure 6. Variation de la sorptivité à 1h en fonction de (a) l'étalement et (b) du T_{500} .

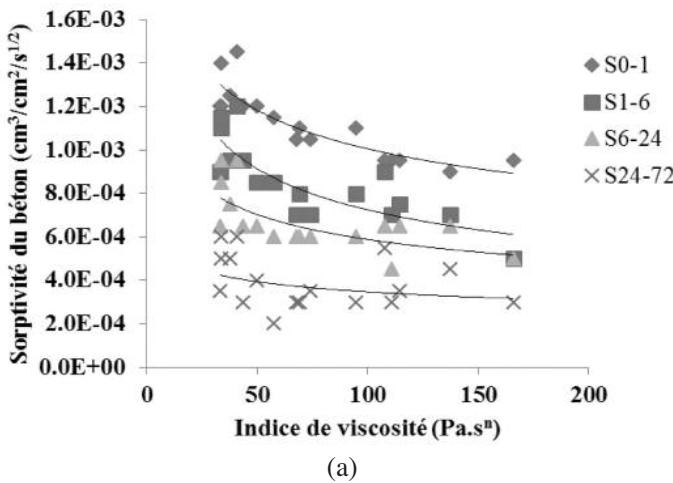


(a)

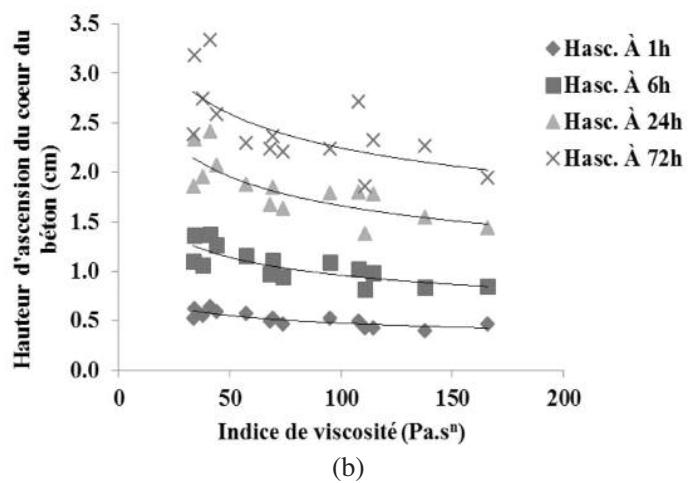


(b)

Figure 7. Variation de la sorptivité à 1h en fonction (a) du seuil de cisaillement et (b) de l'indice viscosité.



(a)



(b)

Figure 8. Variation de la sorptivité (a) et de la hauteur d'ascension (b) en fonction de l'indice de viscosité à différents intervalles de temps.

de nos formulations reste constant. Au-delà de 6h, les pores de plus petits diamètres sont essentiellement remplis et l'indice de viscosité ne joue pas un rôle significatif sur ces derniers. Le diamètre des pores capillaires fins serait semblable pour tous les bétons étudiés. Ces résultats semblent confirmer ceux de [BEN 08, 10, 14] qui ont montré que l'augmentation de la viscosité des bétons peut doubler leur durée de vie et améliorer leurs résistances aux sulfates. Ils ont également montré qu'à l'échelle nanométrique, l'utilisation d'agent de viscosité permet d'augmenter la viscosité de la solution interstitielle des pores, de densifier la pâte de ciment et de diminuer la pénétration des chlorures même si l'hydratation est retardée à cause de la viscosité de la solution interstitielle qui ralentit le processus de dissolution et de diffusion des ions aux jeune âge. Nos résultats montrent également que l'augmentation de la viscosité des BAP agit sur la progression de l'eau dans l'échantillon pendant les premières 6h. Le même raisonnement que précédemment sur l'indice de viscosité permet d'expliquer le résultat : la viscosité du béton agit sur le volume relatif des pores de plus gros diamètres.

4. CONCLUSIONS

Cette étude a montré que, pour les formulations de BAP étudiées, l'augmentation de la viscosité par le biais d'un agent de viscosité permet de réduire la sorptivité optimisant ainsi leur durabilité vis-à-vis du transport des agents agressifs. L'action de la viscosité sur la sorptivité est probablement due à une réduction du volume relatif des pores les plus gros dans le béton.

Ainsi, pour une formulation de BAP donnée, dont les caractéristiques rhéologiques peuvent être modifiées par des dosages variés en superplastifiant et en agent de viscosité, la sorptivité la plus faible est atteinte lorsque le T_{500} , mesuré lors d'un essai d'étalement sur chantier, est supérieur à 4s ou aussi lorsque l'indice de viscosité, déterminé par des essais rhéométriques au laboratoire sur la base du modèle d'Herschel-Bulkley, est supérieure à 100 Pa.sⁿ. Cette étude a montré également que les autres paramètres rhéologiques tels que l'étalement du béton ou le seuil de

cisaillement et l'exposant n déterminés par des essais rhéométriques au laboratoire sur la base du modèle d'Herschel-Bulkley n'ont pas d'effets sur la sorptivité.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [BEN 14] Bentz DP, Davis JM, Peltz MA, Snyder KA, Influence of internal curing and viscosity modifiers on resistance to sulfate attack, Materials and Structures, Vol. 47, no4, 2014, p.581-589.
- [BEN 10] Bentz DP, Snyder KA, Peltz MA, Doubling the service life of concrete structures. II: Performance of nanoscale viscosity modifiers in mortars. Cement and Concrete Composites, Vol. 32, 2010, p.187-193.
- [BEN 08] Bentz DP, Snyder KA, Cass LC, Peltz M.A., Doubling the service life of concrete structures. I: Reducing ion mobility using nanoscale viscosity modifiers. Cement and Concrete Composites, Vol. 30, 2008, p.674-678.
- [CHI 03] Chidiac SE, Maadani O, Razaqpur AG, Mailvaganam NP, Correlation of rheological properties to durability and strength of hardened concrete. J Mater Civ Eng, Vol.15, 2003, p.391-399.
- [CON 85] Concrete Society Working Party, Permeability of concrete and its control, Article d'un jour de conference, 1985, Londres.
- [GAG 11] Gagne R, Houehanou E, Jolin M, Escaffit P., Study of the relationship between scaling resistance and sorptivity of concrete, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.38, 2011, p.1238-1248.
- [GRA 07] *GranDuBé : Grandeur associée à la Durabilité des Bétons*, Ginette Arliguie and Hugues Hornain (dir.), Presses Ponts et Chaussées, 2007, p.437.
- [HAL 89] Hall C. Water sorptivity of mortars and concretes: a review, Magazine of Concrete Research, Vol.41, 1989, p.51-61.
- [HEI 08], Heirman G, Vandewalle L, Van Gemert D, Wallevik O., Integration approach of the Couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer, J Non Newtonian Fluid Mech, 2008, Vol.150, p.93-103.
- [SED 00] Sedran T., de Larrard F. Logiciel d'optimisation granulaire, *Manuel d'utilisation de René-LCPC*, 2000.