
Contrôle de l'homogénéité des voiles en bétons auto-plaçants à l'aide de la gammadensimétrie

Y. Vanhove¹, C. Djelal¹, P. Brisset², G. Schwendenmann¹

*1 Laboratoire d'Artois Mécanique Thermique et Instrumentation
Rue de l'Université
62400 BÉTHUNE, France.
c.djelal@wanadoo.fr*

*2 Commissariat à l'Énergie Atomique
DRT/DTCS/SST
91191 GIF SUR YVETTE, France.
patrick_brisset@cea.fr*

RÉSUMÉ. Le béton autoplaçant (BAP) est apprécié pour ses facilités de remplissage des coffrages sans recours à la vibration et pour sa résistance à la ségrégation. Afin d'évaluer la capacité de remplissage du béton autoplaçant sans ségrégation, une technique basée sur l'atténuation des rayons gamma a été adaptée afin de mesurer les variations locales de la densité du béton. Des échantillons de béton prélevés dans des voiles de grandes hauteurs ont permis d'étudier l'influence du cheminement du BAP dans le coffrage et à travers les armatures métalliques. L'interface entre le béton et le coffrage a également été étudiée.

ABSTRACT. Self-consolidating concrete (SCC) is appreciated by its facility to fill formwork without the need for mechanical compaction and its segregation resistance. To evaluate the filling ability of Self consolidating concrete without segregation, a technique based on the gamma-ray attenuation was adapted to measure local changes in concrete density. Concrete samples cored in the high concrete wall have allowed studying the influence of the SCC flowing into the formwork and through the metallic reinforcements. The concrete wall interface was also studied.

MOTS-CLÉS : Béton autoplaçant, Gammadensimétrie, homogénéité, aspect des parements
KEYWORDS: Self Consolidating Concrete, Gammadensimetry, homogeneity, facing aspect

1. Introduction

Les bétons auto-plaçants (BAP) sont des bétons très fluides qui se mettent en place par effet gravitaire sans apport intérieur ou extérieur de vibration. La fluidité de ces bétons permet d'envisager le coulage d'ouvrages très fortement ferraillés et d'améliorer l'esthétique des parements après décoffrage. Cependant, la forte ouvrabilité de ces bétons peut conduire à un mauvais maintien en suspension des constituants du mélange. La phase solide tend à être ségrégée par taille sous l'action de la pesanteur ou selon le taux de cisaillement imposé. Par conséquent, l'homogénéité du béton mis en place est l'une des propriétés à l'état frais les plus recherchées pour les BAP.

Dans l'objectif d'une meilleure maîtrise de ces bétons et pour en faciliter le développement industriel, l'institut de recherche expérimentale (IREX) a mis en place le projet National béton autoplaçant B@P. Une des missions du projet National B@P a été d'évaluer l'homogénéité du béton en fonction du mode de mise en place, des vitesses de coulage ou encore du cheminement du béton dans le coffrage. Ce chantier a été une occasion unique de mesurer l'homogénéité des voiles en conditions réelles. De nombreux outils (vidéo-endoscopie, colonne LMDC, géo-endoscopie,...) ont été développés pour permettre l'étude de l'homogénéité d'un béton. Certains de ces outils permettent d'effectuer des essais in-situ, d'autres nécessitent de prélever des échantillons. Ces deux approches peuvent être réalisées à l'aide de la gammadensimétrie pour mettre en évidence les zones plus ou moins denses dans un béton (Schwendenmann *et al.*, 2005). Néanmoins compte tenu des contraintes liées aux normes de sécurité pour l'utilisation des radioéléments in-situ, l'ensemble de l'étude a été effectué en laboratoire sur des échantillons carottés dans les voiles et les dalles.

Le chantier expérimental de Guerville comprend 4 dalles (5 mètres de larges, 17 mètres de longueur et 0,15 mètre d'épaisseur), 3 voiles de 5 m de hauteur et 15 m de longueur pour le cheminement du BAP et 3 voiles de 10 mètres de hauteur et 5 m de large pour l'étude de la ségrégation et des poussées latérales. Ces voiles de grande hauteur permettent une meilleure appréciation de la stabilité du béton et l'effet de la hauteur de chute sur la ségrégation.

Pour cette étude, nous nous sommes intéressés au voile 4. Ce voile a permis d'étudier le comportement du béton pour une mise en place par pompage à partir du haut du coffrage. L'analyse des éprouvettes carottées sur ce voile a permis de mettre en évidence l'influence du cheminement du BAP dans le coffrage et à travers les armatures métalliques. L'interface entre le béton et le coffrage, responsable dans certains cas de la qualité des parements, a également été étudiée.

2. Présentation du voile 4 du chantier de Guerville

2.1. Conditions expérimentales

Le voile 4 a une hauteur de 10 mètres, une largeur de 5 mètres et une épaisseur de 0,20 mètre. Le BAP de classe C25/30 a été introduit en haut du coffrage par pompage à l'aide d'un tuyau plongeur de 6 m. Deux toupies (6 m^3 et 7 m^3) ont été nécessaires pour le remplissage du coffrage d'une contenance de 10 m^3 . Une vitesse relative de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ a donc été utilisée.

2.2. Caractéristiques et composition du BAP

La formulation du béton testé est présentée Tableau 1. Le BAP a été formulé par le CTG italcementi.

Tableau 1. Composition du BAP du voile 4

Constituants	Kg/m ³
Ciment CEM II/B 32,5 R CP1	333
Filler Calcaire	242
Sable 0/4	645
Gravillon 3/8	809
Superplastifiant	6,1
Agent de cohésion	0,66
Eau efficace	204
E/L	0,35

Pour caractériser la consistance du béton (AFGC, 2000), un essai d'étalement (flow test) a été réalisé. Cet essai consiste à mesurer l'étalement du béton lorsque celui-ci est libéré d'un tronc de cône. La valeur moyenne obtenue avec cette composition est de 760 mm (Tableau 2). Le deuxième essai de caractérisation est une évaluation de la stabilité du béton à l'aide d'un tamis. La résistance à la ségrégation est mesurée à partir du pourcentage de laitance passant au tamis. Une valeur maximale autour de 15 % est recommandée. Le tableau 2 résume les résultats des essais de caractérisation. La mobilité du béton dans un espace confiné est évaluée à partir d'un essai à la boîte en L (L-box). Le coefficient de remplissage doit être supérieur à 0,8 (AFGC, 2000). En dessous de cette valeur, le risque de blocage du béton lié à la concentration en acier est élevé.

Tableau 2. Caractéristiques du BAP

	<i>1ère toupie</i>	<i>2ème toupie</i>
Masse volumique (kg/m ³)	2275	2274
Volume (m ³)	6	7
Étalement (mm)	760	760
Stabilité (%)	18	16
L- box	1	0,96

Les incertitudes de mesure sont évaluées à $\pm 0,15$ sur l'essai de la boîte en L, à ± 3 cm pour l'essai d'étalement. Pour le pourcentage de laitance au tamis, l'incertitude de mesure est supérieure à 3 % pour des valeurs de stabilité au-delà de 15 %.

3. Description de la mesure gammadensimétrique

L'absorptiométrie gamma est une méthode efficace pour suivre l'évolution de la masse surfacique d'un milieu (Knoll, 1979). La méthode consiste à déterminer les variations de cette masse surfacique à partir de l'atténuation subie par un faisceau de rayonnement gamma traversant une éprouvette. La matrice solide est supposée indéformable.

Nous avons choisi une source en Baryum 133. Le ¹³³Ba émet des photons suivant deux raies énergétiques différentes : 80 et 350 keV. La première raie peut être utilisée pour effectuer des mesures dichromatiques, capables de quantifier les concentrations de trois phases dans un mélange. Dans le cadre de notre étude, 80keV est une énergie insuffisante pour traverser plusieurs centimètres de béton par conséquent, on considérera uniquement la raie énergétique supérieure. 350 keV est un bon compromis entre une énergie trop faible qui ne traverserait pas l'échantillon et une énergie trop forte qui n'offrirait pas une sensibilité suffisante.

3.1. Principe de mesure

Les caractéristiques physiques des matériaux peuvent être étudiée grâce aux rayonnements ionisants (Belaribi, 1997). Une caractéristique fondamentale du rayonnement gamma est son absorption par la matière en exponentielle, décrit par la loi de BEER-LAMBERT :

$$dI = -\mu \cdot \rho \cdot dl \quad [1]$$

Où dI est la réduction de l'intensité I d'un faisceau mono-énergétique et parallèle de photons gamma qui traverse une épaisseur dl de matériau absorbant de masse volumique ρ considéré comme homogène (figure 1).

Le coefficient d'absorption massique μ dépend de la nature de l'absorbant et de l'énergie du rayonnement absorbé.

L'intégration de l'équation [1] sur une épaisseur l conduit à :

$$I = I_0 \exp(-\mu \cdot \rho \cdot l) \quad [2]$$

Où I et I_0 représentent respectivement le nombre de photons gamma incidents et transmis à travers une épaisseur l de matériau. I_0 est obtenu en effectuant une mesure sans échantillon, I est la même mesure mais après avoir placé l'échantillon à analyser entre la source de rayonnement et le cristal détecteur.

Dans un intervalle de temps Δt , elle conduit à :

$$N = N_0 \exp(-\mu \cdot \rho \cdot l) \quad [3]$$

Où N et N_0 sont respectivement le nombre de photons gamma incidents et transmis à travers une épaisseur l de matériau pendant l'intervalle de temps Δt .

La valeur de la masse volumique apparente est donnée par la relation suivante :

$$\rho_0(x, t) = \frac{1}{\mu_s(t) l_s} \ln \left(\frac{N_0}{N(x, t)} \right) \quad [4]$$

Cette équation nécessite de connaître le coefficient d'atténuation massique μ_s de la phase solide. Compte tenu du caractère évolutif du matériau, μ_s représente une valeur moyenne obtenue pour l'ensemble de l'échantillon.

3.2. Dispositif de mesure

Le dispositif est composé d'un émetteur et d'un détecteur de rayonnements ionisants (Figure 1).

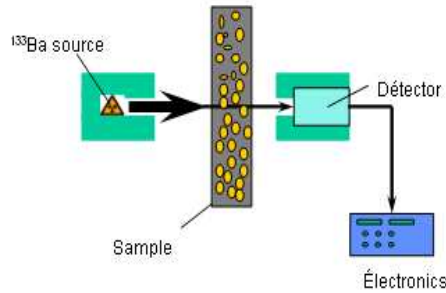


Figure 1. Dispositif de mesure

Dans notre cas, la mesure par absorptiométrie gamma a demandé les éléments suivants : un émetteur constitué d'une source radioactive de baryum 133 et de son collimateur. Une chaîne de détection constituée d'un détecteur de type scintillateur (cristal d'Iodure de Sodium dopé au Thallium), d'un photo-multiplicateur, d'un

système d'amplification et de filtrage et d'un analyseur multicanaux qui comptabilise et discrimine le signal obtenu suivant son amplitude et l'envoi pour stockage sur l'ordinateur de pilotage du système.

4. Résultats et discussion

4.1. Distribution verticale des densités

La densité la plus forte se situe au niveau du tube plongeur (figure 2). A ce niveau, le béton est comprimé par la pompe à béton, ce qui a pour effet de resserrer le squelette granulaire.

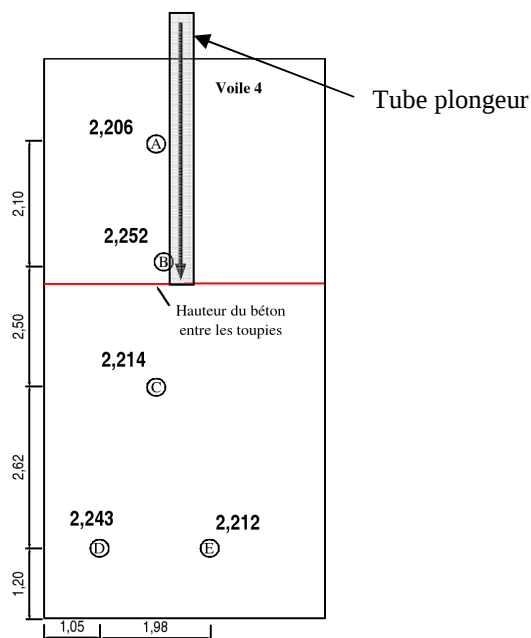


Figure 2. Distribution des densités sur le voile

Deux zones d'influence peuvent être différenciées : les zones situées au dessus et en dessous du tube plongeur. Il faut remarquer que ces zones coïncident avec la limite de remplissage entre les deux toupies (figure 2). Pour chacune d'elles, une diminution de la densité en partie haute et une augmentation en partie basse est notée. La partie inférieure subit l'effet de la hauteur de chute. Les gros éléments se retrouvent plus nombreux sur les cotés ce qui entraîne une densité plus importante (figure 2).

4.2. Distribution des densités suivant l'épaisseur du voile

La figure 3 présente la répartition des densités à l'interface béton/coffrage.

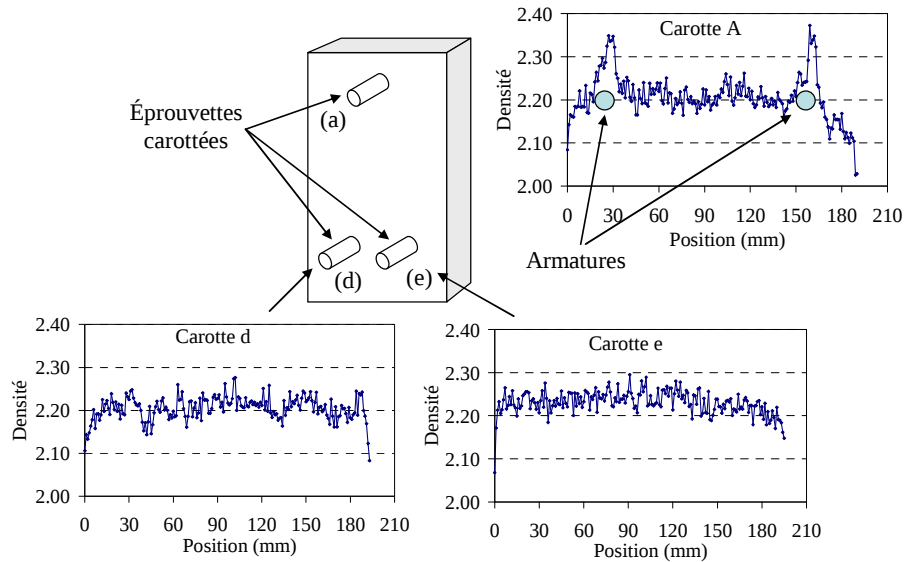


Figure 3. Répartition de la densité dans l'épaisseur du voile

Les mesures suivantes ont été réalisées sur trois carottes du voile. La figure 3 montre les trois graphiques représentant les valeurs de densité calculées dans l'épaisseur du voile. La carotte prélevée en partie supérieure du voile (point a) est traversée par deux barres d'armatures. En dehors de ces deux zones, la densité entre les armatures est relativement stable, ce qui montre que le béton n'a pas été gêné dans son écoulement. Par contre, les deux zones situées à proximité des parois présentent une densité plus faible que la zone centrale. Les deux autres graphes ont été réalisés à partir des données recueillies sur les deux carottes situées en bas du voile (figure 3). Ces deux carottes ont été prélevées afin de mesurer l'influence de l'éloignement du point de remplissage. La densité relevée au point d et e est stable dans le cœur des éprouvettes carottées ce qui traduit une bonne homogénéité du béton.

Sur les trois graphiques de la figure 3, il est possible d'observer une diminution de la densité du béton près du coffrage. Cette variation de densité est due à l'effet de paroi. Entre le haut et le bas du voile, la densité reste au voisinage de 2,1 ce qui peut être le signe d'un parement homogène.

5. Conclusion

Le voile a été rempli par pompage par le haut du coffrage, mais contrairement aux règles de l'art, le tuyau de pompage n'a pas pu être introduit très loin, ce qui a engendré une hauteur de chute importante. L'observation des résultats montre que le béton mis en place dans ce voile n'a pas souffert de cette hauteur de chute.

L'évaluation de l'homogénéité du BAP avec la gammadensimétrie a permis d'apporter certaines observations sur son comportement lors de sa mise en place.

- Une reprise de bétonnage est présente lorsque le tube plongeur ne descend pas dans le premier béton coulé,

- une bonne homogénéité dans l'épaisseur du voile est notée. L'écoulement du BAP n'est pas perturbé par les armatures dans le sens de la largeur du voile.

- A l'interface béton/coffrage, la densité est plus faible que dans le cœur du béton, ce qui est dû à un effet de paroi.

Un mauvais enrobage des armatures et un mauvais remplissage entre les armatures et le coffrage pourraient nuire à la durabilité et à l'esthétique de l'ouvrage.

6. Bibliographie

AFGC groupe de travail bétons autoplaçants, les bétons autoplaçants : recommandations provisoires, Annales du BTP, n° 3, 2000.

Belaribi N., Pons G., Perrin B., Delayed behaviour of concrete : Influence of additions and aggregate characteristics in relation to moisture variations, *Cement and Concrete Research*, vol. 27, N° 9, 1997, p. 1429-1438.

Knoll G.F., Radiation detection and measurement, John Willey and sons, 1979.

Schwendenmann G., Vanhove Y., Djelal C., Brisset P., Legoupil S., Study of segregation in a self compacting concrete wall using gammadensitometry, *SCC2005, Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Chicago, 30-2 Oct.-nov. 2005, vol. 2, Evanston, CACBM, p. 793-798.