

Applicabilité de la maturométrie sur pièces minces en béton bas carbone

Agathe Bourchy^{1*}, Ibrahim Dahiru², Jean-Michel Torrenti³, Gaël Le Bloa⁴

¹ MAST, Université Gustave Eiffel, Champs-sur-Marne, France, agathe.bourchy@univ-eiffel.fr, corresponding author*

² MAST, Université Gustave Eiffel, Champs-sur-Marne, France, ibrahim.dahiru@univ-eiffel.fr

³ UMR MCD, Université Gustave Eiffel, Champs-sur-Marne and ESITC Paris, France, jean-michel.torrenti@univ-eiffel.fr

⁴ Hilti Western Europe, France, gael.lebloa@hilti.com

RESUME

Dans le domaine de la construction, le développement des performances mécaniques du béton est un paramètre clé. Plus les résistances en compression se développent rapidement, plus vite il sera possible de décoffrer, et meilleure sera la productivité du chantier (Senouci & El-Rayes, 2009). A partir de l'évolution de température, il est possible de prédire la résistance en compression du béton, particulièrement au jeune âge, grâce à la maturométrie (Carino, 1984). Cependant, la maturométrie a été créée et utilisée majoritairement pour le ciment Portland (OPC) et les structures massives dans lesquelles l'augmentation de température est importante (Yikici & Chen, 2015). Avec pour objectif de réduire les émissions carbone au niveau mondial, le monde du génie civil se tourne vers des liants contenant une part importante d'additions.

Il se pose donc la question de l'applicabilité de la maturométrie avec le modèle actuel (utilisant la loi d'Arrhénius) sur ce type de matériaux à plus faible exothermie et sur des structures de bâtiments classiques pour prédire leur montée en résistance en compression. Pour cela, des voiles en béton de 20 cm d'épaisseur fabriqués à partir de deux bétons préparés avec des liants contenant plus de 50 % en poids de laitier de haut fourneau (BFS) sont testés au laboratoire et sur chantier. Sur chantier, des suivis de température et des mesures de résistance en compression sont réalisés durant un mois sur ces voiles en utilisant des capteurs sans fil Hilti Concrete Sensors. Au laboratoire, des mesures de dégagement de chaleur par calorimètre quasi-adiabatique (QAB) et un suivi des montées en résistance sont également effectuées sur les formules de béton testées.

La comparaison des résultats expérimentaux avec des modélisations numériques avec CESAR TEXO met en avant la possibilité d'étendre l'utilisation de la maturométrie via des solutions industrialisées afin de prédire l'évolution des résistances en compression sur des structures minces de bâtiments réalisés en béton bas carbone.

Mots-clés maturométrie, béton bas carbone, calorimétrie quasi-adiabatique, modèle d'Arrhénius, technique de monitoring du béton.

I. INTRODUCTION

Avec l'objectif de neutralité carbone d'ici à 2050, l'Europe entend limiter les émissions carbone des industries fortement émettrices, telles que les sociétés pétrolières, d'aciéries ou de construction. Les matériaux cimentaires représentent approximativement 8% des émissions carbonées mondiales, dont environ 95% sont dues à la production de clinker (Ali et al., 2011, Kajaste and Hurme, 2016, Andrew, 2019). Pour cela, de plus en plus de matériaux et bétons bas carbone sont utilisés dans la construction de bâtiments ou d'infrastructure (Wimpenny, 2009). La substitution du ciment par des additions bas carbone s'accompagne généralement d'une montée plus lente des résistances mécaniques, allongeant de ce fait les délais de construction. Afin de remédier au mieux aux contretemps générés, la maturométrie peut être utilisée avec pour objectif d'optimiser la durée de coffrage et la rotation des banches. Celle-ci est actuellement utilisée pour des structures massives ou des structures fines en béton à forte exothermie.

Les bétons bas carbone étant généralement peu exothermiques, l'objectif de cet article est d'étudier le possible gain de temps vis-à-vis du décoffrage et de la rotation des banches grâce à l'utilisation de la maturométrie sur des structures fines type voile de bâtiment. Deux formules de bétons bas carbone contenant à minima 50 % de laitier de haut fourneau (BFS) sont caractérisés en laboratoire et sur chantier. Les résultats expérimentaux sont analysés et utilisés dans la modélisation thermique des pièces de béton afin d'évaluer les potentiels gains de temps.

II. FORMULATIONS ET PROPRIÉTÉS DES BÉTONS

Les bétons étudiés sont formulés selon les exigences requises de deux chantiers de construction vis-à-vis des résistances mécaniques désirées à 28 jours et des faibles échauffements générés pour la réalisation de radier. Ils sont obtenus soit à partir d'un mélange massique 50-50 de CEM I 52,5N SR3 et de laitier (noté BFS50) soit à partir d'un CEM III/B 42,5L contenant 66 % de laitier (noté BFS66). Ces deux formulations ont été sélectionnés pour cette étude afin de permettre l'évaluation de l'intérêt de la maturométrie sur structures fines en bétons faiblement exothermiques. Le TABLEAU 1 présente la composition des 2 bétons. Le slump était respectivement de 10 et 20 cm pour BFS50 et BFS66. Cette différence s'explique par la variation de quantité de liant total, de laitier, de rapport E/L et de superplastifiant entre les deux formulations.

TABLEAU 1. Composition des bétons

| | BFS50 | BFS66 |
|--------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| Type de ciment | CEM I 52,5N SR3 (Vicat) | CEM III/B 42,5L – 66% BFS (Ecocem) |
| Ciment (kg/m ³) | 150 | 420 |
| Laitier (kg/m ³) | 150 | - |
| Sable 0-1 (kg/m ³) | 201 | 182 |
| Gravillon 0-4 (kg/m ³) | 785 | 710 |
| Gravillon 4-10 (kg/m ³) | 402 | 363 |
| Gravillon 10-20 (kg/m ³) | 438 | 396 |
| E _{eff} /L | 0,57 | 0,42 |
| Adjuvant (%) | 0,01 | 0,01 |

Sur chantier, pour chaque béton, un voile de 20 cm d'épaisseur, 1 m de large et respectivement 1,1 m et 1,2 m de haut et contenant un maillage métallique inséré à 10 cm d'épaisseur a été réalisé pour BFS50 et BFS66. Dans chaque voile, 3 capteurs de température (Hilti Concrete Sensor fonctionnant en Bluetooth) sont placés sur la ligne centrale à environ 10 cm du bas du voile (C) et 60 cm (B), et un dernier excentré à environ 10 cm de la surface du voile (A) cf. FIGURE 1. Enfin, un capteur extérieur enregistre la température ambiante durant l'essai.

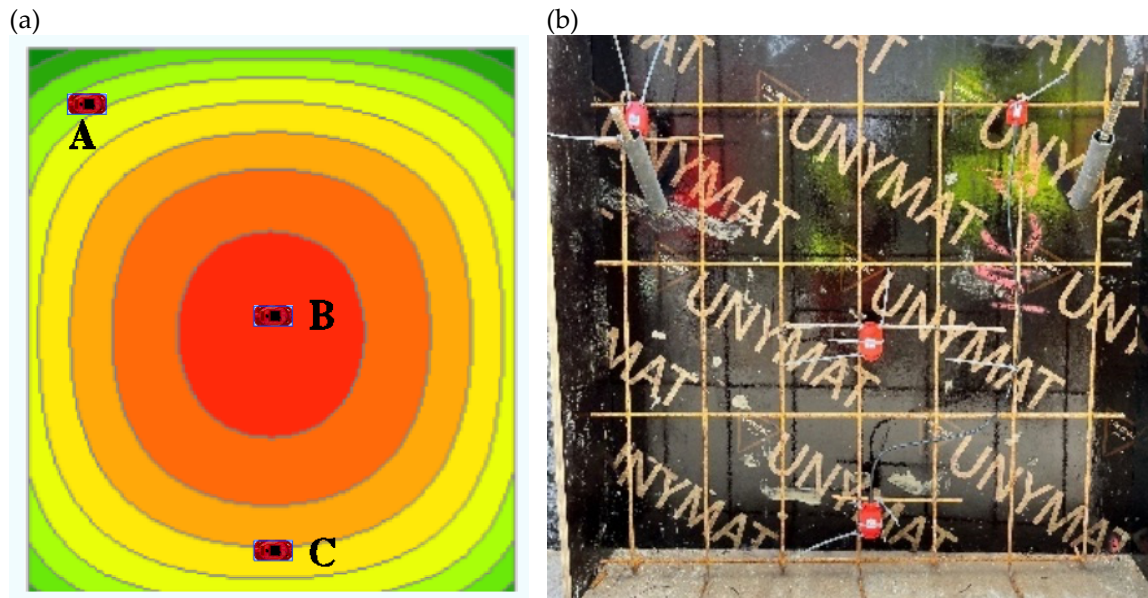


FIGURE 1. Localisation des capteurs de température dans le voile de béton réalisé (a) dans le plan moyen modélisé (b) photo du voile de béton sur chantier avec les positions des Hilti Concrete Sensors

Le TABLEAU 2 donne l'évolution des résistances mécaniques en compression des bétons mesurées sur chantier (conservées sur site pendant 24h puis selon NF EN 12390-3 (AFNOR, 2019)) et lors des essais en laboratoire à 20 °C. Avec l'augmentation de la quantité de laitier, la montée en résistance ralentit. Cependant, sur le long terme, la réactivité pouzzolanique du laitier et la diminution du E_{eff}/L permet un développement plus important des résistances.

TABLEAU 2. Evolution de la résistance en compression des bétons

| | Lieu | Rc 1 jour (MPa) | Rc 2 jour (MPa) | Rc 7 jour (MPa) | Rc 28 jour (MPa) |
|-------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| BFS50 | Chantier | 6,8 | 9,6 | 17,2 | 28,1 |
| | Laboratoire 20 °C | 3,2 | 6,5 | 20,3 | 42,1 |
| BFS66 | Chantier | 1,0 | - | 28,1 | 41,3 |
| | Laboratoire 20 °C | 4,3 | 8,8 | 30,1 | 54,6 |

II. DÉGAGEMENT DE CHALEUR ADIABATIQUE DES BÉTONS

Afin de mesurer le dégagement de chaleur des bétons, des essais quasi-adiabatique (QAB) normalisés (NF EN 12390-14 (AFNOR, 2018)) sont réalisés à 20 °C pendant deux semaines. Un essai complémentaire à 38 °C est effectué pour estimer l'énergie d'activation du béton.

A partir de l'évolution de la température durant l'essai et des caractéristiques du QAB, il est possible de calculer la chaleur accumulée dans le calorimètre et la chaleur évacuée vers l'extérieur par pertes thermiques (Boulay et al., 2010). La somme des deux donne la chaleur d'hydratation Q du béton (Eq. 1). Le calcul prend en compte la capacité thermique du béton (C_{th} en J/kg/K) et du calorimètre (C_{cal} en J/kg/K), la masse de l'échantillon (m_c en kg), la différence de température entre l'échantillon et la référence ($\bar{\theta}_i$) pendant le pas de temps Δt_i en h, et les coefficients caractéristiques du calorimètre ($\alpha_i = a + b\theta_i$ avec a en J/h/K et b en J/h/K²).

$$Q = \left(\frac{C_{th} + C_{cal}}{m_c} \right) \theta_t + \frac{1}{m_c} \sum_{i=1}^n \alpha_i \bar{\theta}_i \Delta t_i \quad \text{Eq. 1}$$

Afin d'obtenir l'évolution de la température en conditions adiabatiques (T_{adia}), il est nécessaire de compenser les pertes thermiques par rapport à la température ambiante (T_{amb}) à partir de la chaleur d'hydratation à l'instant i (Q_i) (Eq. 2).

$$T_{adia} = T_{amb} + \left(\frac{Q_i}{C_{th}} \right) m_c \quad \text{Eq. 2}$$

La température adiabatique étant supérieure à celle mesurée durant l'essai, il est nécessaire de corriger le temps pour prendre en compte la thermo-activation des réactions d'hydratation. La cinétique d'hydratation $\dot{\xi}$ est modélisée selon une loi d'Arrhenius (Eq. 3), prenant en compte l'affinité chimique $\tilde{A}(\xi)$ (avec le degré d'hydratation ξ), la température absolue T , l'énergie d'activation E_a du matériau et la constante des gaz parfaits R (Ulm and Coussy, 1996, Lacarrière et al., 2019).

$$\dot{\xi}(t) = \tilde{A}(\xi) \exp\left(-\frac{E_a}{R} \frac{1}{T}\right) \quad \text{Eq. 3}$$

Le temps équivalent est calculé selon Eq. 4, pour la température mesurée ($T_{mesuré}$) et corrigée ($T_{corrigé}$) en estimant le temps nécessaire à chaque température pour avoir le même incrément de degré d'hydratation.

$$dt_{corrigé} = dt_{mesuré} \exp\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{corrigé}(t)} - \frac{1}{T_{mesuré}(t)} \right)\right) \quad \text{Eq. 4}$$

A partir des essais QAB réalisés à 20 °C et 38 °C, les énergies d'activation des bétons ont pu être déterminées. Les ratio E_a/R sont présentés dans le TABLEAU 3. Contrairement à ce qui peut être observé dans la littérature, où l'augmentation de la quantité de laitier induit une augmentation de E_a/R (4000 à 5500 K pour 50% de laitier utilisé) (Yang et al., 2020, Kanavaris et al., 2023, Barnett et al., 2006), l'ajout croissant de laitier diminue le rapport E_a/R dans deux bétons étudiés. La différence de fabrication des liants (ciment ou addition), la différence de formulation des bétons ou la composition chimique des laitiers peuvent être des facteurs induisant la tendance contraire observée (Ogirigbo and Black, 2016). Il est également possible que l'énergie d'activation ne soit pas constante, mais évolue au cours de l'hydratation, avec une première E_a élevée durant la période dormante puis une plus faible durant l'hydratation (Laplante et al., 1996).

TABLEAU 3. Rapport énergie d'activation – constante des gaz parfaits des bétons

| | BFS50 | BFS66 |
|-------------|--------------|--------------|
| E_a/R (K) | 3670 | 2587 |

La prolongation des courbes adiabatiques prenant en compte la thermo-activation est faite selon Eq. 5, avec β et τ des constantes fittées expérimentalement et la chaleur d'hydratation à l'infini Q_∞ calculée selon le modèle empirique de Waller (Waller, 1999).

$$Q = Q_\infty \cdot \exp\left(-\left(\frac{\tau}{t}\right)^\beta\right); t > t_1 \quad \text{Eq. 5}$$

La FIGURE 2 présente l'évolution de température mesurée en QAB, et le processus appliqué pour déterminer les courbes adiabatiques des bétons BFS50 (en noir) et BFS66 (en bleu).

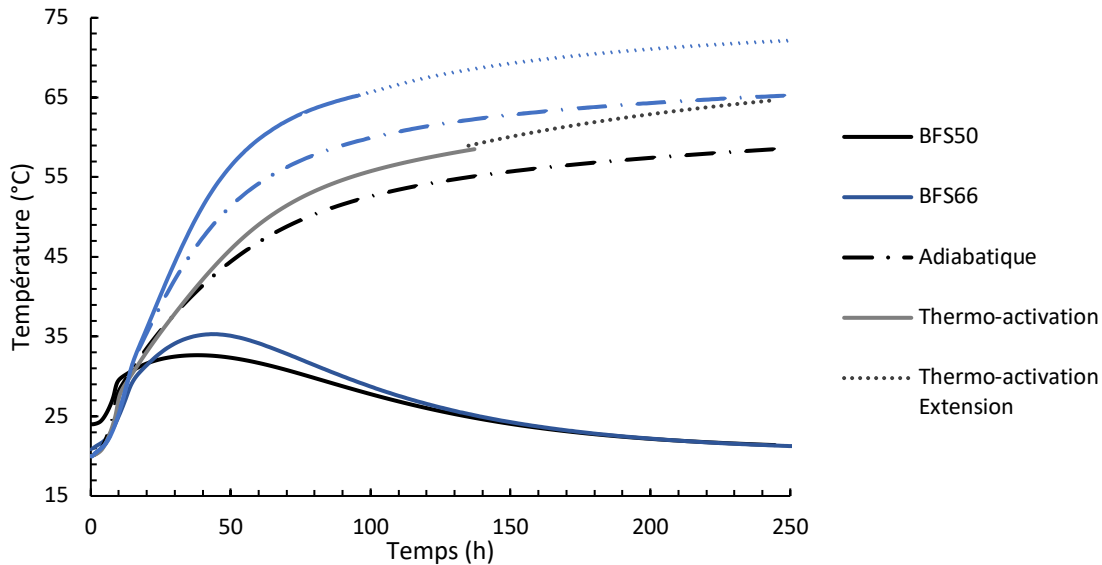


FIGURE 2. Evolution de la température mesurée en QAB (ligne pleine foncée), après correction adiabatique (tirets), après prise en compte de la thermo-activation (ligne pleine claire) et en pointillé clair la prolongation de la courbe adiabatique thermo-activée selon Eq. 5 des bétons BFS50 (noir) et BFS66 (bleu)

Afin de visualiser la différence de comportement thermique et cinétique des deux bétons étudiés, les courbes adiabatiques thermo-activées sont présentées sur la FIGURE 3. Contrairement à ce qui est observé dans la littérature, l'augmentation de la quantité de laitier n'induit pas une diminution du dégagement de chaleur malgré un léger ralentissement de la cinétique d'hydratation au jeune âge. Les gammes de variations sont cependant en accord avec (Al-Hasani et al., 2022, Moon et al., 2018, Bourchy, 2018). Ceci peut être dû à la formulation du béton tel que le rapport E_{eff}/L (plus élevée pour BFS50 que BFS66) et la quantité de liant total (plus faible pour BFS50 que BFS66). En effet, la dilution du liant par l'augmentation du E_{eff}/L modifie les réactions chimiques et donc le dégagement de chaleur, la microstructure (augmentation de la porosité), et les propriétés développées (mécaniques, durabilité) (Hu et al., 2014, Bourchy et al., 2019, Yio et al., 2014, Yu et al., 2018). Cette dilution de liant par le rapport E_{eff}/L , additionnée initialement à une quantité de liant total plus faible est en accord avec la plus faible évolution de température mesurée pour le béton BFS50.

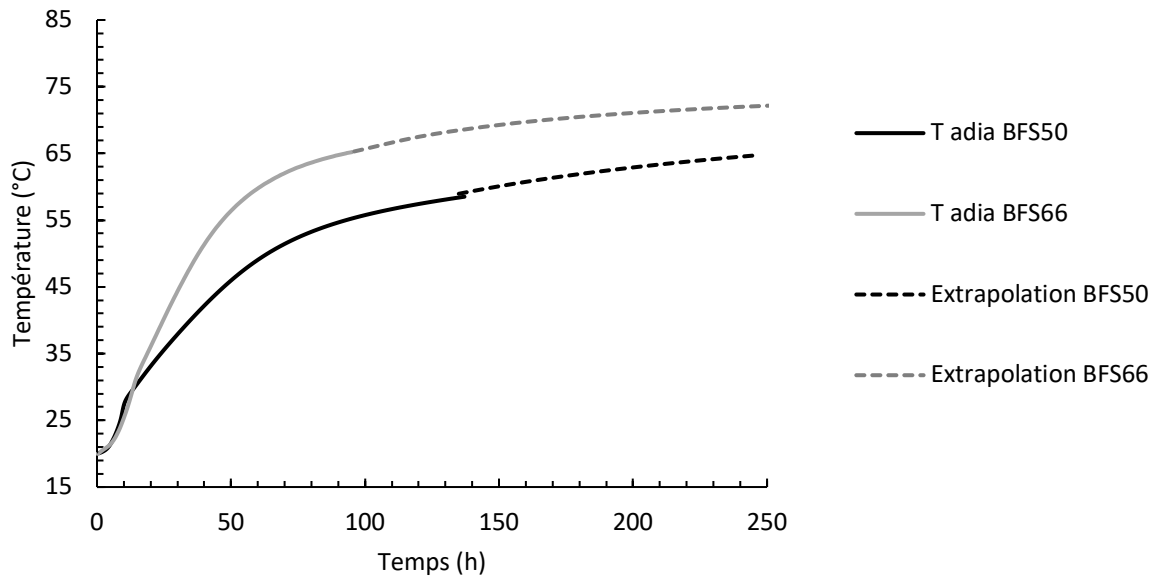


FIGURE 3. Comparaison de l'évolution de la température en conditions adiabatiques thermo-activées pour les bétons BFS50 (noir) et BFS66 (gris)

III. EVOLUTION THERMIQUE DES VOILES DE BETONS

La température dans les voiles réalisés sur chantier a été suivi pendant un mois. Les 300 premières heures de mesures sont présentées sur les FIGURE 4 et FIGURE 5 respectivement pour BFS50 et BFS66. Les coffrages ont été respectivement retirés à 45 et 27 heures pour BFS50 et BFS66.

Tout d'abord, l'augmentation de la quantité de laitier utilisé dans le béton diminue l'échauffement mesuré dans le voile. En effet, la température maximale mesurée ainsi que l'écart entre le capteur central et les capteurs inférieur et supérieur est moindre pour BFS66 que pour BFS50.

Cependant, il est possible de voir que la présence des coffrages impacte la température mesurée dans les voiles. Avant retrait des coffrages, les capteurs centraux sont les moins sensibles à ces variations étant donné leur position dans le voile. Une fois les coffrages retirés, quelle que soit le béton, les températures relevées dans les voiles suivent les variations thermiques ambiantes. A noter que le voile de BFS50 semble être plus fortement influencé que le voile de BFS66. Ceci peut s'expliquer par la plus grande variation thermique ambiante durant l'étude du voile de BFS50 que BFS66 (15 °C et 5 °C respectivement) due à la période d'essai (juin et avril respectivement).

D'après Jayamaha et al., le plus important transfert thermique vers l'extérieur pour le voile de BFS50 que BFS66 peut être expliqué par le plus grand rapport E/L et la plus grande quantité de granulats dans la formule de béton (Jayamaha et al., 1996).

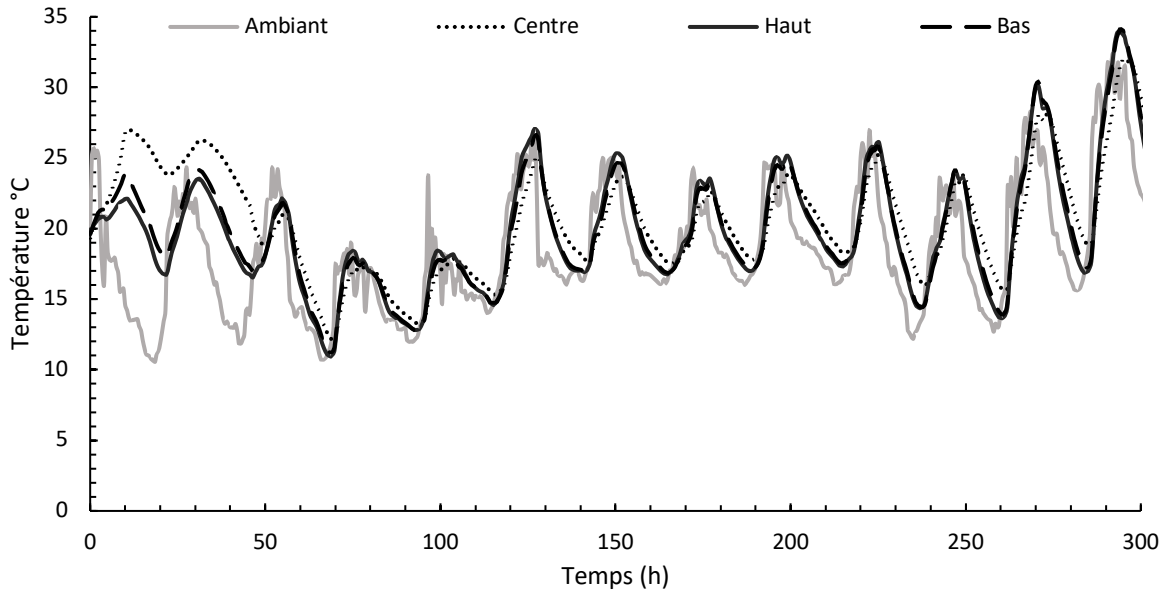


FIGURE 4. Evolution de la température dans le voile de béton BFS50 (noir) et en ambiance (gris)

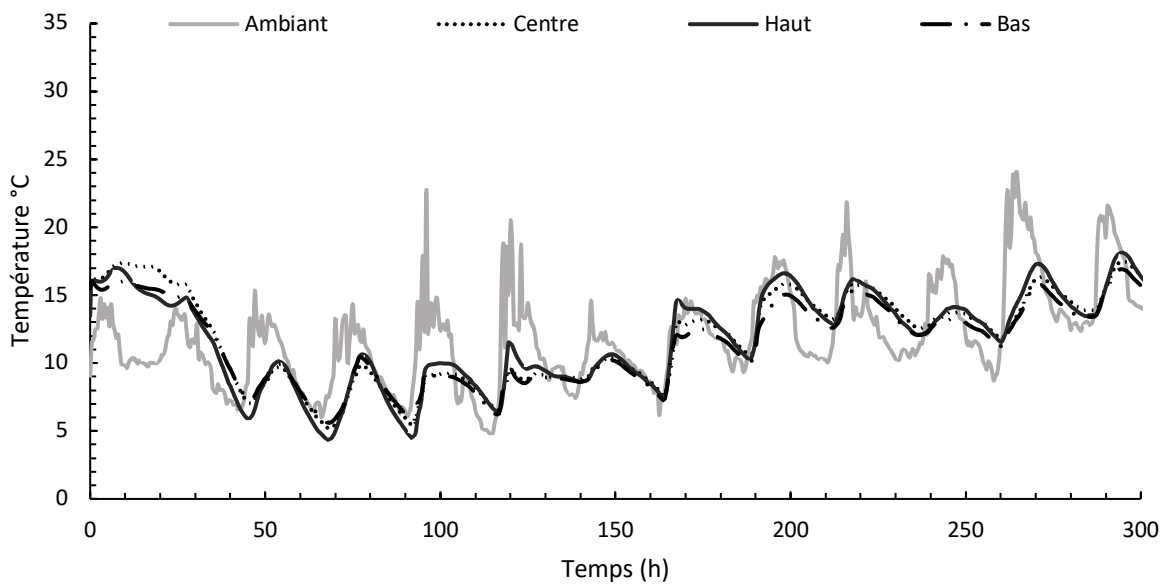


FIGURE 5. Evolution de la température dans le voile de béton BFS66 (noir) et en ambiance (gris)

IV. MODÉLISATION DU COMPORTEMENT AU JEUNE ÂGE – APPLICATION AU CAS D'UN VOILE

III.1 Modélisation

Un code aux éléments finis est communément utilisé pour modéliser les effets thermiques des réactions d'hydratation en considérant l'équation d'Arrhenius (Eq. 3) et l'équation de chaleur Eq. 6 (Azenha et al., 2021). CESAR TEXO a été utilisé pour cette étude.

$$C_{th} \frac{dT}{dt} + k \nabla^2 T = \dot{Q} \quad \text{Eq. 6}$$

avec k la conductivité thermique (J.h/m/°C).

Dans le module TEXO de CESAR, la résolution simultanée de deux équations est faite à partir de la courbe de température adiabatique afin de déterminer l'affinité chimique (Eq. 7).

$$\tilde{A} \left(\xi = \frac{T(t)}{T_\infty} \right) = \frac{T'(t)}{T_\infty} \xi_\infty \exp \left(\frac{Ea}{RT(t)} \right) \quad \text{Eq. 7}$$

III.2 Application au cas d'un voile

Le modèle est appliqué au cas d'un voile de 20 cm d'épaisseur comme testé expérimentalement. L'évolution de la température dans le voile est calculée pour les deux bétons de l'étude afin de reproduire celle mesurée expérimentalement. Après une étude préliminaire permettant d'ajuster au mieux le calcul pour les bétons bas carbone étudiés, les paramètres du calcul utilisés sont répertoriés dans le TABLEAU 4. Seuls des coefficients d'échanges sont considérés concernant la présence ou l'absence d'un coffrage, non l'épaisseur.

TABLEAU 4. Paramètres utilisés dans le calcul

| | BFS50 | BFS66 |
|--|----------------------|-----------------------|
| Conductivité thermique K (W/(m·K)) | 1,67 | |
| Capacité calorifique, C_{th} (J/(m ³ ·K)) | 2 400 000 | |
| Coefficient d'échange du béton coffré avec l'extérieur (W/(m ² ·K)) | 3,50 (coffrage bois) | 1,75 (coffrage acier) |
| Coefficient d'échange du béton décoffré avec l'extérieur (W/(m ² ·K)) | 50,00 | 12,00 |

Les FIGURE 6 et FIGURE 7 présentent la comparaison de l'évolution de la température des bétons BFS50 et BFS66 mesurée au centre du voile sur chantier et modélisée avec prise en compte de la période de coffrage ou non (comme expérimentalement, coffrages respectivement retirés à 45 et 27 heures pour BFS50 et BFS66).

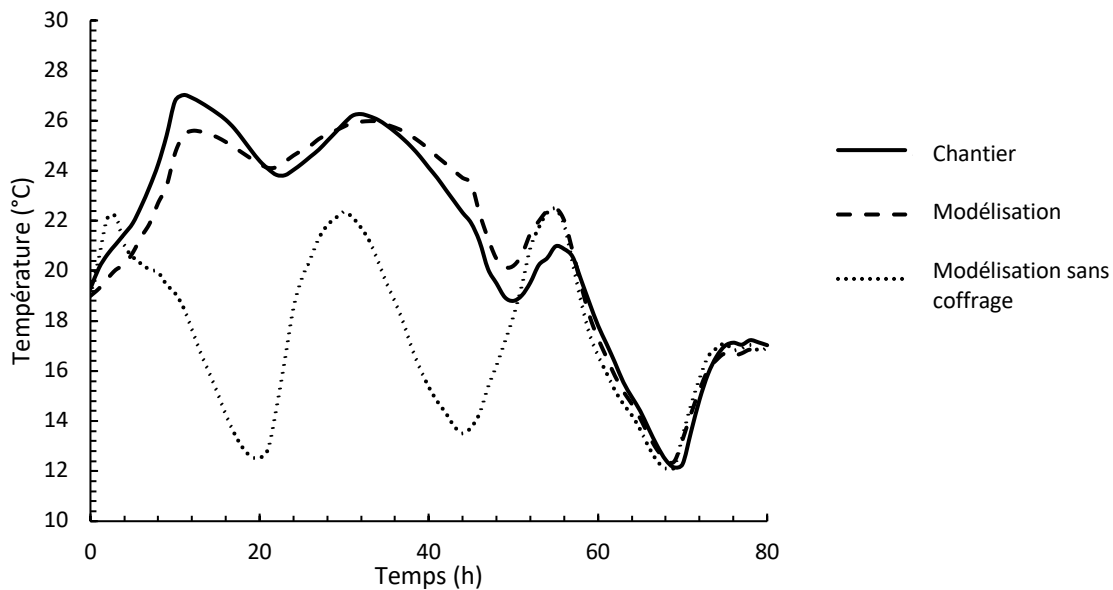


FIGURE 6. Evolution de la température mesurée sur chantier, modélisée avec et sans coffrage dans le voile de béton BFS50

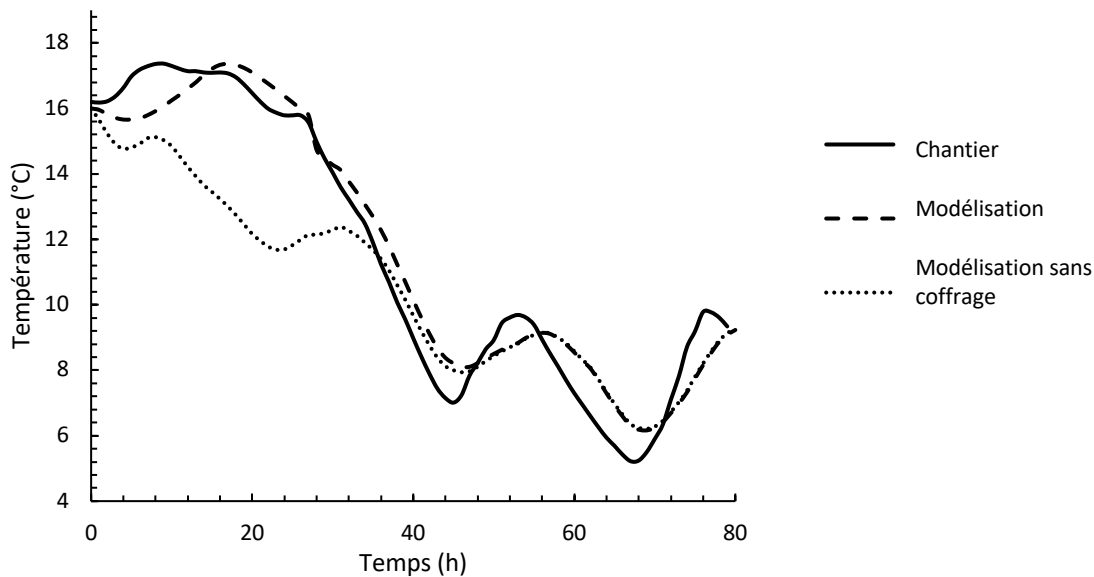


FIGURE 7. Evolution de la température mesurée sur chantier, modélisée avec et sans coffrage dans le voile de béton BFS66

L'impact du coffrage sur l'évolution de la température dans le voile est mis en relief avec la modélisation réalisée. Si le coffrage n'est pas présent, entre 5 et 12 °C de différence peuvent être observés par rapport à la température relevée avec coffrage. Ceci met en évidence, et ce quelle que soit la quantité de laitier, l'impact du coffrage sur l'évolution de la température dans la pièce de béton et donc indirectement l'effet sur la cinétique d'hydratation du matériau.

III.3 Maturométrie appliquée au cas du voile

Les courbes maîtresse d'évolution des résistances en compression des bétons à 20 °C peuvent être déterminées à partir des résistances mesurées (TABLEAU 2) selon Eq. 8.

$$f_c(t) = f_{c\infty} \frac{k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \quad \text{Eq. 8}$$

Avec $f_{c\infty}$, t_0 et k sont des paramètres fittés sur les résultats expérimentaux. Le TABLEAU 5 récapitule les valeurs obtenues pour les paramètres de Eq. 8 et la FIGURE 8 donne l'allure des courbes maîtresses pour BFS50 et BFS66.

TABLEAU 5. Paramètres utilisés dans Eq. 8 fittés expérimentalement

| | BFS50 | BFS66 |
|---------------------|--------------|--------------|
| t_0 (h) | 6,7 | 15,4 |
| $f_{c\infty}$ (MPa) | 49,7 | 57,8 |
| k (-) | 0,068 | 0,117 |

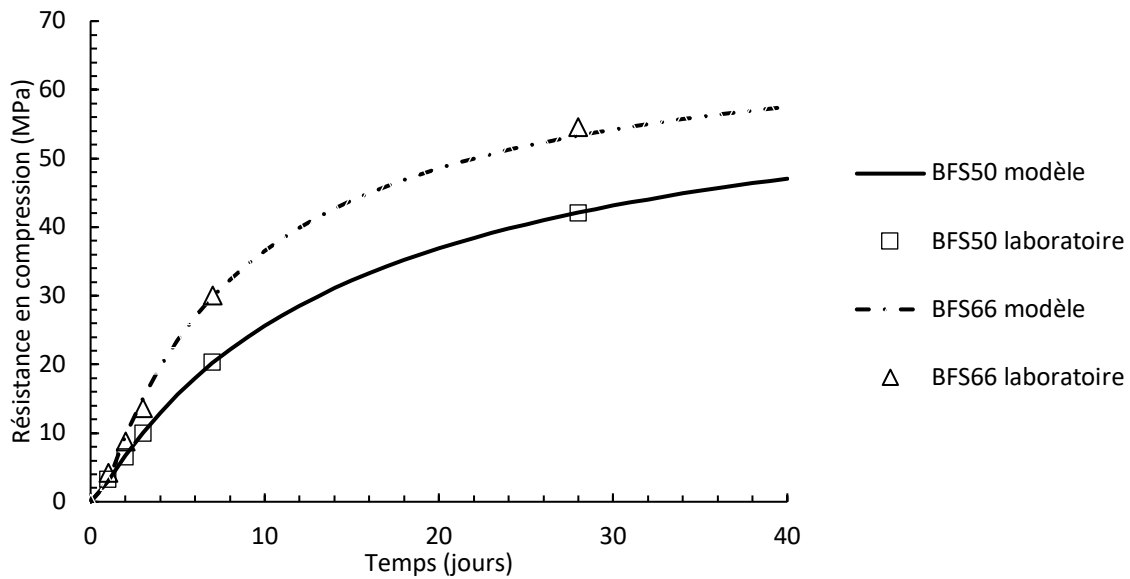


FIGURE 8. Courbes maîtresses des résistances en compression des bétons BFS50 et BFS66 fittées sur les valeurs expérimentales

A partir des courbes maîtresse et de l'évolution de la température mesurée dans le voile, il est possible de prédire la résistance en compression qui y est développée. La FIGURE 9 présente la comparaison des résistances mesurées et prédites pour les voiles de BFS50 et BFS66. Pour les deux bétons étudiés, les résistances mesurées au jeune âge semblent être sous-estimées par le modèle alors qu'à long terme, elles sont surestimées. A un jour, pour BFS66, la prédiction est cependant plus élevée que celle mesurée sur chantier contrairement à ce qui a pu être observé en laboratoire (3 MPa de plus que l'éprouvette de contrôle sur chantier). Etant donné la basse température ambiante lors de l'essai chantier de BFS66, et le stockage des éprouvettes de contrôle en extérieur, il est possible que les réactions d'hydratation aient été ralenties, entraînant ainsi la faible résistance mesurée.

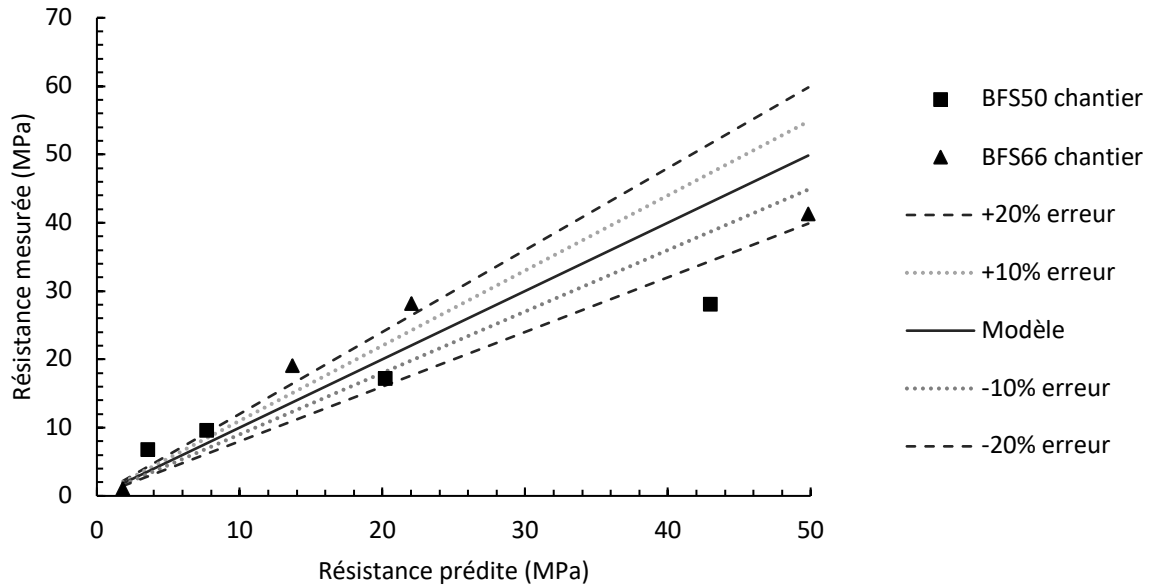


FIGURE 9. Comparaison des résistances en compression mesurées et prédites pour les voiles de bétons BFS50 (carré) et BFS66 (triangle)

En considérant la valeur de 2 MPa nécessaire pour décoffrer (Nilimaa et al., 2023), les courbes maîtresses indiquent l'âge du béton pour atteindre cette résistance à 20 °C (i.e. sur éprouvette de contrôle). L'âge équivalent est estimé selon Eq. 9 et les courbes d'évolution de la température dans les voiles.

$$t_{eq} = t_{20^{\circ}C} \exp \left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T(t)} - \frac{1}{293} \right) \right) \quad \text{Eq. 9}$$

Le TABLEAU 6 donne la comparaison du temps pour atteindre 2 MPa entre les mesures sur éprouvette de contrôle et l'application de la maturométrie par calcul d'âge équivalent. L'intérêt de la méthode est particulièrement mis en avant pour BFS66, c'est-à-dire celui contenant un pourcentage de laitier élevé, couramment utilisé dans les bétons bas carbone avec un gain de temps entre 5 à 13h. Le temps de décoffrage peut ainsi être optimisé vis-à-vis des temps morts sur chantier.

TABLEAU 6. Comparaison des temps de décoffrage pour les bétons BFS50 et BFS66 avec application de la maturométrie

| | Laboratoire (h) | Chantier (h) | Conditions adiabatiques (maturométrie) (h) | Centre du voile (maturométrie) (h) |
|-------|-----------------|--------------|--|------------------------------------|
| BFS50 | 18 | 10 | 15 | 16 |
| BFS66 | 22 | 31 | 18 | 26 |

A noter cependant, que selon l'exothermie du béton générée par les réactions d'hydratation, l'effet cross-over à plus ou moins long terme reste l'un des challenge de la maturométrie (Kanavaris et al., 2023). En effet, une température plus élevée au jeune âge peut engendrer une hydratation plus rapide et donc des résistances plus élevées à court terme mais des résistances plus faibles à long terme par rapport à une conservation à 20 °C. Par exemple, pour ces deux bétons, la comparaison des résistances mesurées à 20 et 38 °C permet d'observer à respectivement 50 et 13 jours un effet cross-over pour BFS50 et BFS66.

IV. CONCLUSIONS

Avec l'objectif de réduire les émissions carbone de 50 % d'ici à 2030, les bétons bas carbone sont de plus en plus utilisés dans la construction. La montée en résistance potentiellement plus lente que celle de bétons moins substitués en additions des bétons bas carbone peut cependant être un frein à leur utilisation, particulièrement lorsque des vitesses de roulement de coffrages élevées sont nécessaires à l'avancement du chantier.

Durant cette étude, les montées en résistances et évolutions de température dans des voiles de bétons contenant à minima 50 % massique de laitier de haut fourneau ont été suivies en laboratoire et sur chantier à l'aide de capteurs de température sans fil (Hilti Concrete Sensor).

L'étude a permis de montrer que la maturométrie peut permettre de prédire avec acuité les résistances mécaniques de pièces fines réalisées avec ce type de béton en considérant l'historique thermique réel de ces pièces (intérieur et extérieur) et ainsi réduire les temps de coffrage. Malgré la faible exothermie des bétons bas carbone et de ce fait le fort impact de la température ambiante, le gain de temps peut être significatif. Cette étude pourrait être poursuivie en considérant des coffrages chauffants, la prise en compte des effets cross-over à plus long terme ou d'autres formules de bétons bas carbone, comme les LC3.

RÉFÉRENCES

- AFNOR 2018. *NF EN 12390-14 Essai pour béton durci - Partie 14 : méthode semi-adiabatique de détermination de la chaleur dégagée par le béton au cours de son processus de durcissement.*
- AFNOR 2019. *NF EN 12390-3 Essais pour béton durci partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes.*
- AL-HASANI, L. E., PARK, J., PEREZ, G., HERNDON, H. N., BROWN, J. B., CHO, Y. K., GENTRY, T. R. & KURTIS, K. E. 2022. Quantifying concrete adiabatic temperature rise based on temperature-dependent isothermal calorimetry; modeling and validation. *Materials and Structures*, 55, 191.
- ALI, M. B., SAIDUR, R. & HOSSAIN, M. S. 2011. A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2252-2261.
- ANDREW, R. M. 2019. Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 1675-1710.
- AZENHA, M., KANAVARIS, F., SCHLICKE, D., JĘDRZEJEWSKA, A., BENBOUDJEMA, F., HONORIO, T., ŠMILAUER, V., SERRA, C., FORTH, J., RIDING, K., KHADKA, B., SOUSA, C., BRIFFAUT, M., LACARRIÈRE, L., KOENDERS, E., KANSTAD, T., KLAUSEN, A., TORRENTI, J.-M. & FAIRBAIRN, E. M. R. 2021. Recommendations of RILEM TC 287-CCS: thermo-chemo-mechanical modelling of massive concrete structures towards cracking risk assessment. *Materials and Structures*, 54, 135.
- BARNETT, S. J., SOUTSOS, M. N., MILLARD, S. G. & BUNGEY, J. H. 2006. Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies. *Cement and Concrete Research*, 36, 434-440.
- BOULAY, C., TORRENTI, J. M., ANDRÉ, J.-L. & SAINTILA, R. 2010. Quasi-adiabatic calorimetry for concretes: Influential factors. *Bulletin du Laboratoire des Ponts et Chaussées*, 278, 19-36.
- BOURCHY, A. 2018. *Relation chaleur d'hydratation du ciment : montée en température et contraintes générées au jeune âge du béton.* These de l'Université Paris-Est.
- BOURCHY, A., BARNES, L., BESSETTE, L., CHALENCON, F., JORON, A. & TORRENTI, J. M. 2019. Optimization of concrete mix design to account for strength and hydration heat in massive concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 103, 233-241.
- HU, J., GE, Z. & WANG, K. 2014. Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times. *Construction and Building Materials*, 50, 657-663.

- JAYAMAHA, S. E. G., WIJEYSUNDERA, N. E. & CHOU, S. K. 1996. Measurement of the heat transfer coefficient for walls. *Building and Environment*, 31, 399–407.
- KAJASTE, R. & HURME, M. 2016. Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4041-4052.
- KANAVARIS, F., SOUTSOS, M. & CHEN, J. F. 2023. Effect of Temperature on the Early-age Hydration and Setting Behaviour of Mixes Containing GGBS. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 22, 14-32.
- LACARRIÈRE, L., KNOPPIK, A., LEAL DA SILVA, W. R., HONORIO, T., ŠMILAUER, V., ASAMOTO, S. & FAIRBAIRN, E. M. 2019. Hydration and heat development. Thermal Cracking of Massive Concrete Structures: State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254-CMS.
- LAPLANTE, P., ROUSSEL, S. & LECRUX, S. Technique maturométrique : La loi d'Arrhenius au service des chantiers. International Conference on Concrete: From Material to Structure 1996 Arles, France.
- MOON, H., RAMANATHAN, S., SURANENI, P., SHON, C.-S., LEE, C.-J. & CHUNG, C.-W. 2018. Revisiting the Effect of Slag in Reducing Heat of Hydration in Concrete in Comparison to Other Supplementary Cementitious Materials. *Materials*, 11, 10.
- NILIMAA, J., GAMIL, Y. & ZHAKA, V. 2023. Formwork Engineering for Sustainable Concrete Construction. *CivilEng*, 4, 4.
- OGIRIGBO, O. R. & BLACK, L. 2016. Influence of slag composition and temperature on the hydration and microstructure of slag blended cements. *Construction and Building Materials*, 126, 496-507.
- ULM, F. J. & COUSSY, O. 1996. Strength growth as chemo-plastic hardening in early age concrete. *Journal of engineering mechanics*, 122, 1123-1132.
- WALLER, V. 1999. *Relation entre composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression*. Thesis, Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- WIMPENNY, D. 2009. Low carbon concrete-options for the next generation of infrastructure. *Concrete Solutions*, 9, 41-41.
- YANG, H. M., KWON, S. J., MYUNG, N. V., SINGH, J. K., LEE, H. S. & MANDAL, S. 2020. Evaluation of strength development in concrete with ground granulated blast furnace slag using apparent activation energy. *Materials*, 13, 442.
- YIO, M. H. N., PHELAN, J. C., WONG, H. S. & BUENFELD, N. R. 2014. Determining the slag fraction, water/binder ratio and degree of hydration in hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 56, 171-181.
- YU, Z., YANG, L., ZHOU, S., GONG, Q. & ZHU, H. 2018. Durability of cement-sodium silicate grouts with a high water to binder ratio in marine environments. *Construction and Building Materials*, 189, 550-559.