

Utilisation de la maturométrie pour optimiser le décoffrage des bétons bas carbone en bâtiment

Agathe Bourchy¹, Jean Michel Torrenti^{1,2}, Gael Le Bloa³

¹ Université Gustave Eiffel, département MAST

² ESITC Paris

³ Hilti

RESUME Afin de réduire l'impact carbone des constructions, l'utilisation de bétons bas carbone est de plus en plus fréquente. Cependant, ces bétons ont souvent une montée en résistance plus lente ce qui conduit à des délais de décoffrage plus longs. Trois formules de béton ayant un poids carbone différents sont utilisées pour la modélisation d'un voile de bâtiment. Une mesure de la température à l'aide de capteurs noyés dans le béton, combinée à une analyse maturométrique des courbes de dégagement de chaleur dans les voiles, est utilisée pour estimer le temps de décoffrage de chaque voile. Les résultats montrent que cette technique permet d'optimiser les délais de réalisation et diminuer l'inconvénient lié à une montée en résistance plus lente des bétons bas carbone.

Mots-clefs béton, bas carbone, maturométrie

I. INTRODUCTION

L'utilisation de bétons bas carbone est de plus en plus fréquente dans la construction de bâtiments ou d'infrastructure (Wimpenny, 2009). Il est en effet nécessaire de réduire l'impact carbone des constructions en béton (Cabeza et al. 2013). Cette réduction s'accompagne souvent d'une montée en résistance plus lente de ces bétons bas carbone. Les délais de réalisation sont alors allongés. La maturométrie est une des solutions possibles pour optimiser la durée avant décoffrage et la rotation des banches. Mais, les bétons bas carbone sont aussi en général peu exothermiques. L'objectif de cet article est d'étudier le gain potentiel que l'emploi de la maturométrie pourrait avoir sur le temps de décoffrage d'un voile de bâtiment. Pour cela 3 formules de bétons sont testées allant d'un béton « classique » à un béton très bas carbone. Après avoir présenté ces matériaux et leur caractérisation, la simulation numérique de voiles contenant ces bétons est réalisée et analysée pour en déduire les gains de temps potentiels.

II. FORMULATIONS ET PROPRIÉTÉS DES BÉTONS

Les bétons sont formulés à partir de 3 ciments fabriqués par co-broyage d'un clinker C3A-0 et de laitier (Bourchy, 2018). Le clinker C3A-0, fabriqué de manière industrielle, est reçu en granules. Il ne contient pas de C₃A et la quantité de C₄AF est de 17,6 % massique. Les teneurs en SO₃ et Na₂O_{eq} sont respectivement égales à 1,9 % et 0,5 %. Trois ciments C3A-0_5S, C3A-0_42,5S et C3A-0_80S

sont fabriqués avec, respectivement, 5 %, 42,5 % et 80 % de laitier de haut fourneau. Ces pourcentages ont été choisis pour bien mettre en évidence l'influence de la substitution du clinker par le laitier sur une grande amplitude de la plage possible. L'ensemble des caractéristiques des matériaux et de la procédure de co-broyage sont disponibles dans la thèse de Bourchy. La figure 1 présente les courbes de dégagement de chaleur des ciments dans l'essai de calorimétrie quasi-adiabatique dit bouteille de Langavant – norme NF EN 196-9 (AFNOR, 2010). On constate que l'ajout de laitier permet de réduire et de décaler le dégagement de chaleur.

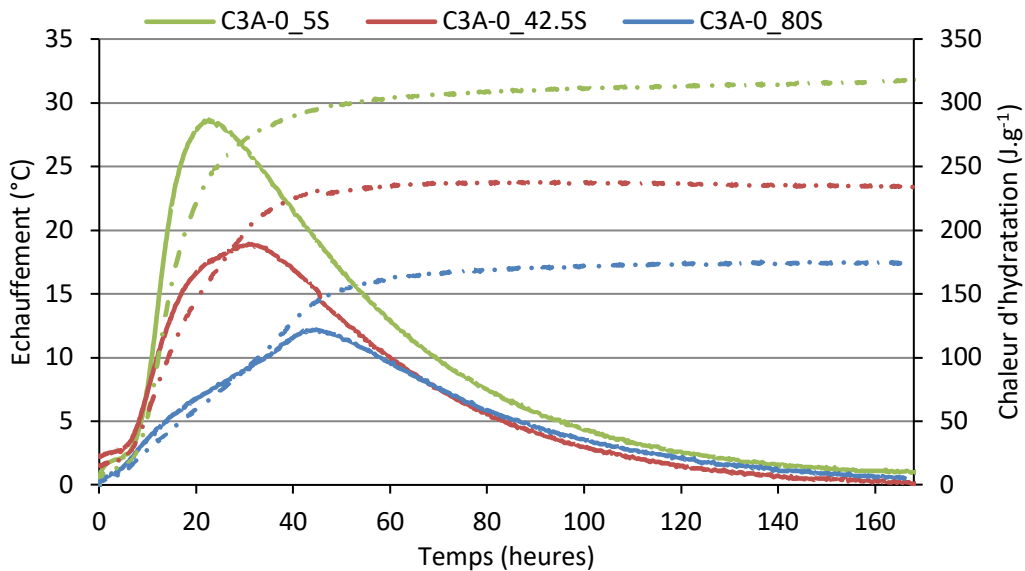


FIGURE 1. Evolution des échauffements et des chaleurs d'hydratation mesurés par calorimètre de Langavant pour les trois ciments sélectionnés pour les essais béton à base de C3A-0_S

Les bétons, nommés B7, B8 et B9, sont formulés à partir des 3 ciments présentés et proviennent aussi des travaux de thèse de Bourchy. Le tableau 1 présente la composition des 3 bétons. Ils sont formulés de manière à obtenir une résistance en compression à 28 jours comprise entre 45 et 50 MPa et un slump voisin de 15 cm. C'est ce qui explique une diminution du E/C et l'utilisation d'un superplastifiant lorsque le pourcentage de laitier augmente dans le ciment.

Béton	B7	B8	B9
Ciment	C3A-0_5S	C3A-0_42,5S	C3A-0_80S
Liant (kg)	360	360	360
Sable 0 - 4	829	854	862
Gravillon 4 - 11	332	342	345
Gravillons 11 - 22	682	702	709
E/L	0,49	0,42	0,39
Adjuvant (%)	0,00	0,20	0,50

TABLEAU 1. Composition des bétons

Le tableau 2 donne l'évolution des résistances mécaniques en compression des bétons. On constate, comme attendu, que la montée en résistance du B9, qui contient plus de laitier est la plus lente. Le E/C plus faible permet aussi de compenser la résistance à 28 jours.

	B7	B8	B9
Rc 1 jour (MPa)	10,9	5,8	0,0
Rc 7 jours (MPa)	34,0	32,1	33,9
Rc 28 jours (MPa)	46,4	48,1	45,4

TABLEAU 2. Evolution de la résistance en compression des bétons

II. DÉGAGEMENT DE CHALEUR ADIABATIQUE DES BÉTONS

Le dégagement de chaleur des bétons a été mesuré à l'aide d'un essai quasi-adiabatique dit QAB qui est normalisé : norme NF EN 12390-14 (Afnor, 2018). Le calorimètre QAB est constitué d'un caisson à double paroi (externe en PVC, interne en polyester armé de fibres de verre) et rempli de mousse polyuréthane de 14 cm d'épaisseur comme isolant. Les éprouvettes utilisées pour réaliser les essais sont des cylindres Ø16 x H32 cm. Pour estimer la quantité de chaleur dégagée lors de l'hydratation du béton, il faut prendre en compte la chaleur accumulée dans le calorimètre et la quantité de chaleur évacuée vers l'extérieur (pertes) comme indiqué dans la norme NF EN 12390-14 selon le mode opératoire décrit dans (Boulay et al., 2010a). Les pertes sont estimées à l'aide d'un étalonnage du calorimètre (Boulay et al., 2010b). La norme ne s'intéressant qu'à la chaleur dégagée, elle n'indique pas la seconde correction qu'il convient de faire pour obtenir la courbe adiabatique : en effet, en raison de la thermo-activation des réactions d'hydratation, la cinétique est accélérée en cas de température plus élevée. La température corrigée des pertes étant plus élevée que celle mesurée durant l'essai, il faut donc effectuer une correction sur le temps. Celle-ci repose sur l'hypothèse que la thermo-activation de la cinétique d'hydratation suit une loi d'Arrhenius (Ulm & Coussy, 96) (Lacarrière et al., 2019). Cette loi (équation 1) indique que la vitesse d'hydratation $\dot{\xi}$ est proportionnelle à une affinité chimique $\tilde{A}(\xi)$ (où ξ est le degré d'hydratation) et à une exponentielle faisant intervenir la température absolue T et une énergie d'activation E_a (qu'on exprime historiquement en la divisant par R la constante des gaz parfaits) :

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

La correction en temps se fait alors en introduisant un temps équivalent calculé en exprimant l'équation 2 pour $T_{\text{mesuré}}$ et pour $T_{\text{corrigé}}$ et en calculant le temps nécessaire à chaque température pour avoir le même incrément de degré d'hydratation :

$$dt_{\text{corrigé}} = dt_{\text{mesuré}} \exp\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{corrigé}}(t)} - \frac{1}{T_{\text{mesuré}}(t)}\right)\right) \quad [\text{eq.2}]$$

Cette correction nécessite donc de connaître l'énergie d'activation. Ici ce paramètre n'a pas été déterminé expérimentalement pour les bétons. Pour l'estimer on peut utiliser des relations basées sur la composition du ciment (Riding et al., 2011) ou sur l'évolution des résistances à 2 jours (Bresson, 1980). On sait aussi que l'ajout de laitier a tendance à augmenter l'énergie d'activation.

Yang et al. ont ainsi montré que l'utilisation de 50 % de laitier faisait passer le rapport E_a/R de 4000 à 5500 K (Yang et al., 2020). Kanavaris a obtenu des résultats tout à fait similaires (Kanavaris et al., 2023). Enfin, Briffaut (2012) a montré que c'était le couple affinité chimique – énergie d'activation qui était important (i.e. si on change l'énergie d'activation il faut aussi changer l'affinité chimique). Le tableau 3 donne les valeurs du rapport E_a/R pour les 3 bétons étudiés. Ces valeurs sont estimées à partir des résultats de microcalorimétrie isotherme à différentes températures (5, 20 et 30°C) des trois ciments C3A-0_5S, C3A-0_42,5S et C3A-0_80S (Bourchy, 2018). L'hypothèse que l'énergie d'activation est constante est une simplification. Pour des bétons ayant une période dormante très longue, il pourrait être envisagé d'avoir un couple d'énergie d'activation pour la période dormante et pour la période où la réaction d'hydratation se développe comme proposé par Laplante (1996).

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

	B7	B8	B9
E_a/R (K)	4700	5500	7000

Les figures 2a et 2b illustrent le résultat de l'application de la procédure pour déterminer les courbes adiabatiques des bétons B7 et B9. On constate qu'il manque à ces courbes une partie du dégagement de chaleur. En effet, l'essai QAB ne permet pas d'avoir toute la courbe car, sur la fin de cet essai, la contribution de la correction devient bien plus importante que celle de la chaleur mesurée dans l'éprouvette de béton. Or, le degré d'hydratation est relié à la chaleur adiabatique par la relation (équation 3) :

$$\frac{\xi(t)}{\xi_\infty} = \frac{Q(t)}{Q_\infty} = \frac{T(t) - T(t=0)}{T_\infty - T(t=0)} \quad [\text{eq.3}]$$

avec ξ_∞ le degré d'hydratation maximal qui peut être estimé de manière empirique (Waller, 99), Q_∞ la chaleur maximale atteinte compte tenu de la formulation ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$) et $T_\infty = Q_\infty / C_{th}$ la température maximale atteinte, avec C_{th} la capacité calorifique du béton ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).

Il est donc nécessaire de prolonger les courbes adiabatiques. Ici, cela est fait en calant sur la fin de la courbe adiabatique (pour éviter le début de la courbe) une courbe d'équation 4 :

$$Q = Q_\infty \cdot \exp\left(-\left(\frac{t}{t_1}\right)^\beta\right); t > t_1 \quad [\text{eq. 4}]$$

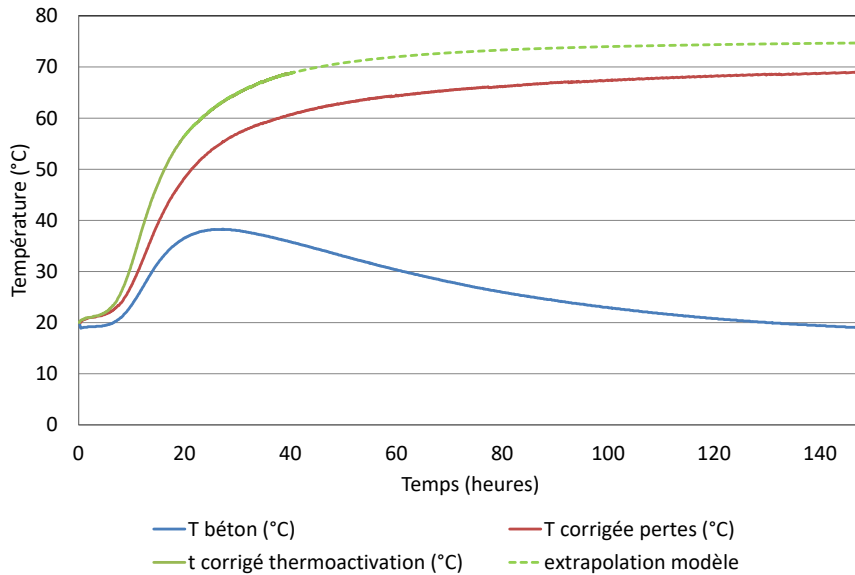


FIGURE 2.a. Evolution de la température mesurée en QAB (bleu), de la température après correction adiabatique (rouge) et après prise en compte de la thermoactivation (vert) du béton B7 ; en pointillé vert la prolongation de la courbe adiabatique à l’aide de l’équation 4

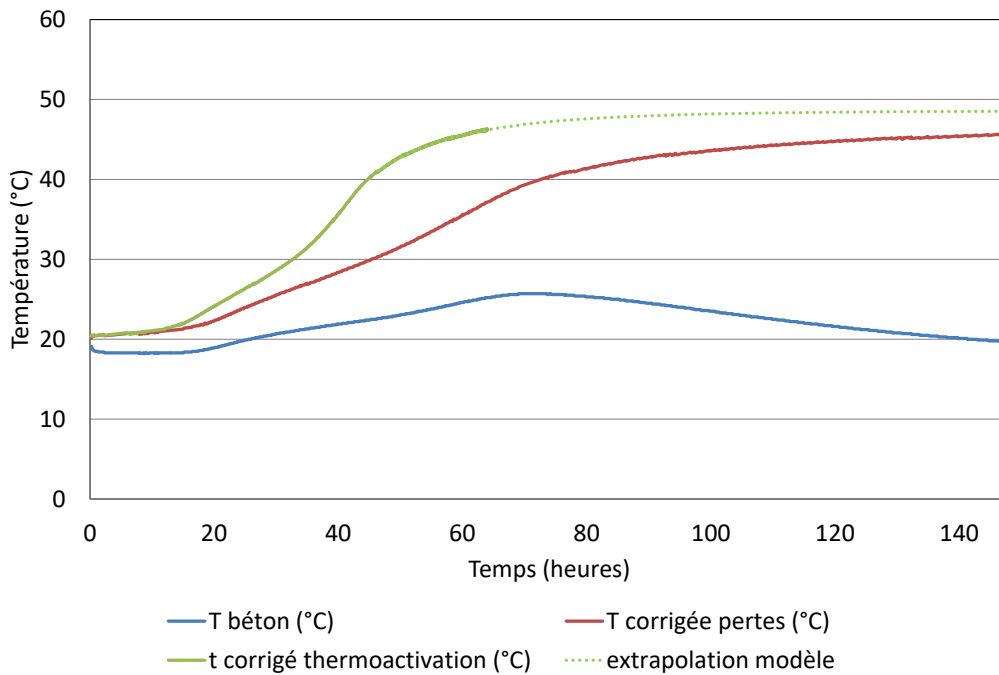


FIGURE 2.b. Evolution de la température mesurée en QAB (bleu), de la température après correction adiabatique (rouge) et après prise en compte de la thermoactivation (vert) du béton B9 ; en pointillé vert la prolongation de la courbe adiabatique à l’aide de l’équation 4

Finalement, la figure 3 compare les courbes adiabatiques des 3 bétons. On constate bien l’effet du laitier sur le dégagement de chaleur : la chaleur dégagée totale diminue et la cinétique de dégagement de chaleur est plus lente avec la quantité de laitier.

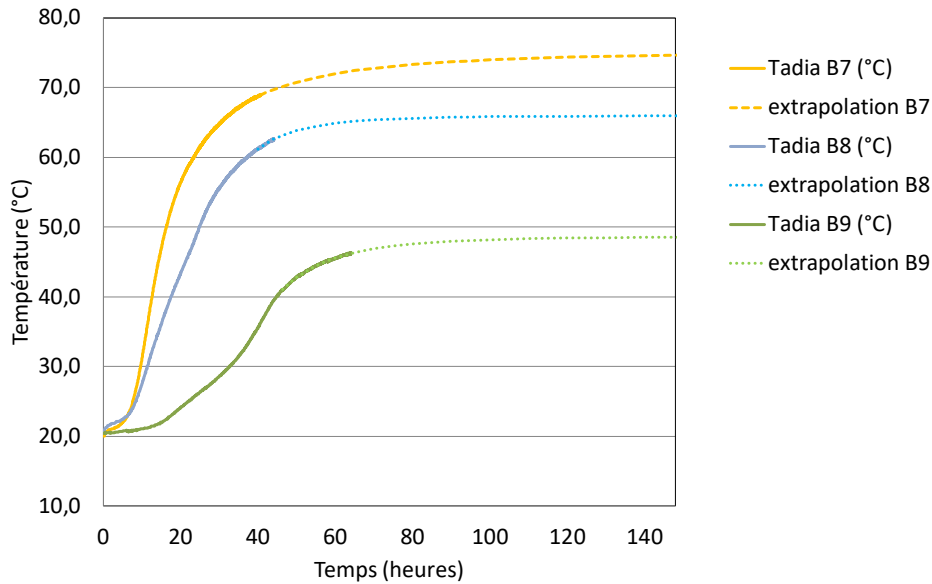


FIGURE 3. Comparaison des courbes d'évolution de la température en conditions adiabatiques pour les bétons B7, B8 et B9

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

III.1 Modélisation

La modélisation des effets thermiques de la réaction d'hydratation se fait classiquement (Azenha et al., 2021)) dans un code aux éléments finis (ici c'est CESAR et son module TEXO qui sont utilisés) au moyen de l'équation de la chaleur (équation 5) :

$$C_{th} \frac{dT}{dt} + k \nabla^2 T = \dot{Q} \quad [\text{eq. 5}]$$

avec k la conductivité thermique ($\text{J.h}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$).

L'autre équation à considérer est l'équation d'Arrhenius (équation 1). Ces deux équations doivent être résolues simultanément. Dans le module TEXO de CESAR, l'affinité chimique est déterminée à partir de la courbe de température adiabatique qui est donc une donnée essentielle (équation 6) :

$$\tilde{A} \left(\xi = \frac{T(t)}{T_\infty} \right) = \frac{T(t)}{T_\infty} \xi_\infty \exp \left(\frac{Ea}{RT(t)} \right) \quad [\text{eq. 6}]$$

III.2 Application au cas d'un voile

Le modèle est appliqué au cas d'un voile de 20 cm d'épaisseur. Les évolutions de la température dans le voile sont calculées pour les 3 bétons de l'étude. Les paramètres du calcul sont les suivants :

- Température initiale du béton = 20°C
- Température extérieure constante et égale à 20°C
- Capacité calorifique $C_{th} = 2400000 \text{ J.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$
- Conductivité thermique $k = 8000 \text{ J.h}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
- Coefficient d'échange du béton avec l'extérieur : $h = 14800 \text{ J.h}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$

Ces valeurs sont des valeurs standards pour des bétons, proposées dans la notice du code CESAR. Pour une application particulière, notamment avec des bétons bas carbone, il conviendra de d'estimer ces paramètres plus précisément.

La figure 4.a présente l'évolution de la température dans le cas du béton B7 pour 3 points situés au centre du voile, à 5 cm de la surface et à la surface. Le gradient de température entre le cœur et la surface reste limité à 2°C. La figure 4.b donne une vue des isovaleurs de température pour $t = 19$ h soit près du pic de température pour le voile B7.

La figure 5 présente l'évolution comparée des températures selon le béton utilisé. Comme attendu on retrouve l'effet de la substitution en laitier sur les températures maximales.

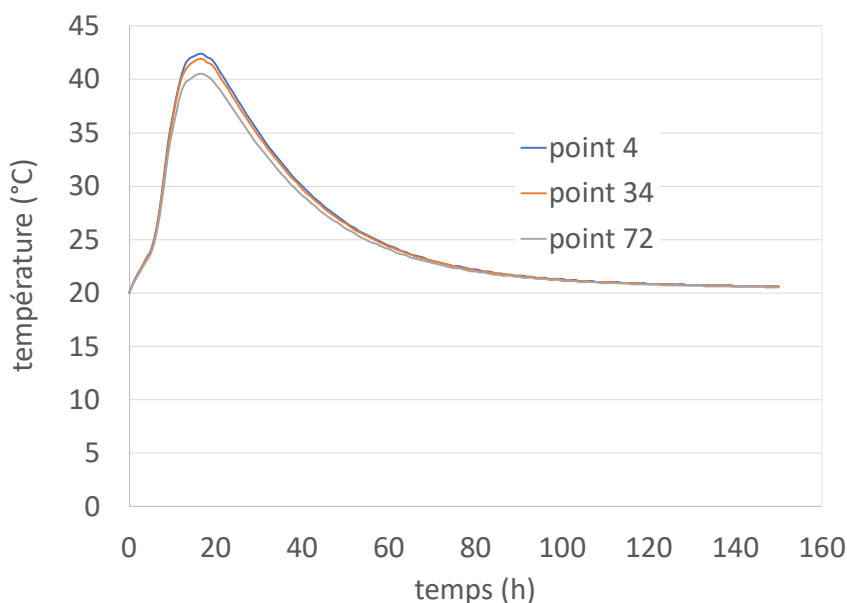


FIGURE 4.a. Evolution de la température dans le voile pour le béton B7. Le point 4 est situé au centre, le point 34 à 5 cm de la surface et le point 72 à la surface.

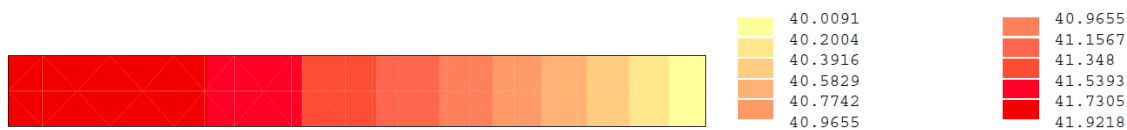


FIGURE 4.b. Isovaleurs de la température dans le voile pour le béton B7 à $t = 19$ h.

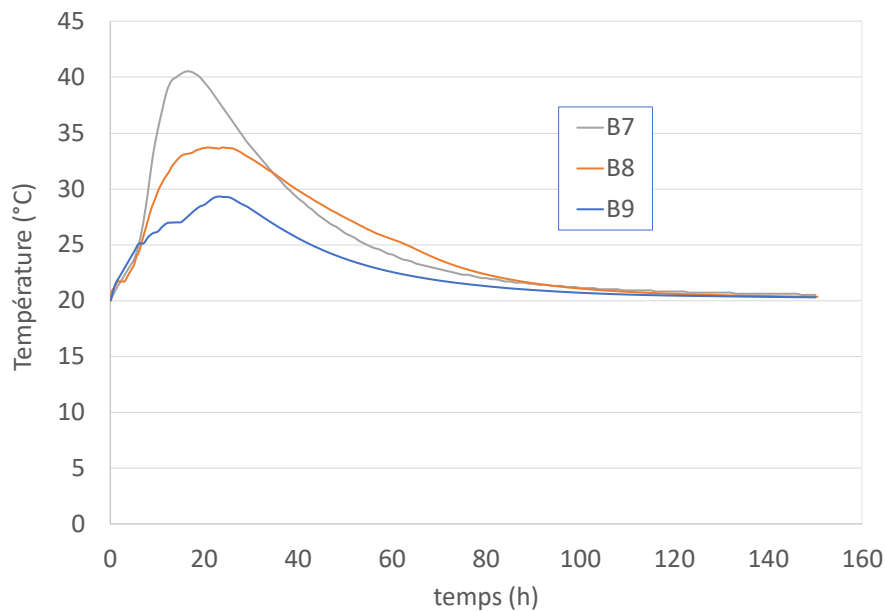


FIGURE 5 Evolution de la température à la surface du voile pour les bétons B7, B8 et B9

III.3 Maturité appliquée au cas du voile

A partir de l'évolution des résistances des 3 bétons (tableau 2), on peut déterminer les courbes maîtresses d'évolution de la résistance pour une température de conservation égale à 20 °C. La courbe d'évolution s'exprime par l'équation 7 :

$$f_c(t) = f_{c\infty} \frac{k(t-t_0)}{1+k(t-t_0)} \quad [\text{eq. 7}]$$

où $f_{c\infty}$ et k sont des paramètres fittés sur les résultats expérimentaux. Pour le paramètre t_0 , celui-ci est déterminé pour les bétons B7 et B8 à l'aide des mesures faites par Bourchy (2018) à l'aide de l'appareil FreshCon (Reinhardt & Grosse, 2004), (Boulay et al., 2014). Pour le béton B9, t_0 est pris égal à 24 h sur la base de l'essai mécanique. Le tableau 4 récapitule les valeurs obtenues pour les paramètres de l'équation 7 et la figure 6 donne l'allure des courbes maîtresses pour les 3 bétons.

TABLEAU 4. Paramètres de l'équation 7

	B7	B8	B9
t_0 (h)	10,0	7,5	24,0
$f_{c\infty}$ (MPa)	49,7	57,8	50,3
k (-)	0,016	0,008	0,014

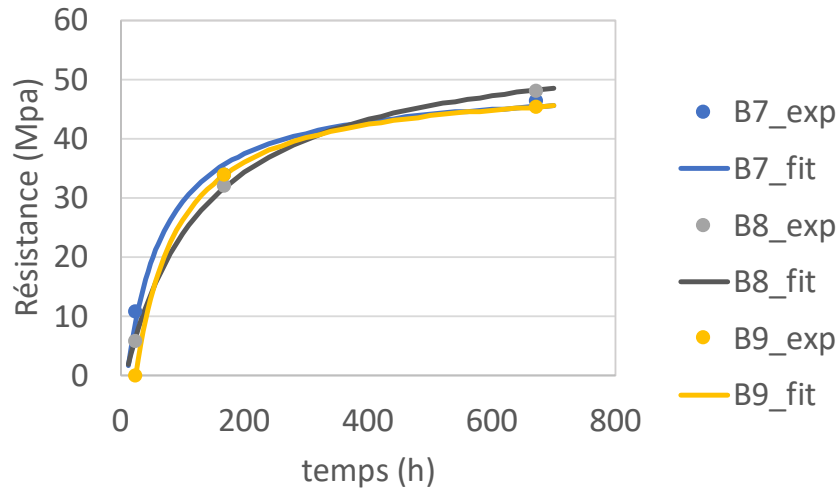


FIGURE 6 Courbes maîtresses des 3 bétons

En supposant qu'il faille une résistance au moins égale à 12 MPa pour décoffrer, les courbes maîtresses donnent l'âge du béton pour atteindre cette résistance à 20 °C (i.e. sur éprouvette de contrôle). A partir des courbes d'évolution de la température dans les voiles on peut estimer l'âge équivalent par l'équation 8 déduite de la loi d'Arrhénius :

$$t_{eq} = t_{20^{\circ}C} \exp \left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T(t)} - \frac{1}{293} \right) \right) \quad [\text{eq.8}]$$

Le tableau 5 donne la comparaison du temps pour atteindre 12 MPa entre mesure sur éprouvette de contrôle et maturométrie (calcul de l'âge équivalent). On peut voir l'intérêt de la méthode qui permet, même pour des bétons bas carbone, d'optimiser le temps de décoffrage.

TABLEAU 5. Comparaison des temps de décoffrage

	B7	B8	B9
Éprouvettes de contrôle t _{décoffrage} (h)	30	42	46
Maturométrie t _{décoffrage} (h)	16	24	30

IV. CONCLUSIONS

Une montée en résistance qui peut être plus lente que celle de bétons « classiques » est un inconvénient des bétons bas carbone. Notre étude a montré que la maturométrie peut permettre de réduire en partie cet inconvénient en tenant compte de l'histoire réelle des températures. Même pour des bétons n'ayant pas une exothermie très importante, le gain peut être significatif. Cette étude est une étude préliminaire qui doit être approfondie, notamment en l'appliquant in-situ à l'aide de capteurs noyés dans le béton, adaptés aux conditions de chantier, avec des conditions aux limites de température variables, voire avec des coffrages chauffants en optimisant leur utilisation. Cette étude pourrait être également étendue à d'autres liants bas-carbone comme les LC3.

RÉFÉRENCES

- Afnor (2010), NF EN 196-9, Méthodes d'essai des ciments - Partie 9 : chaleur d'hydratation - Méthode semi-adiabatique
- 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.
- Azenha, M., Kanavaris, F., Schlicke, D., Jędrzejewska, A., Benboudjema, F., Honorio, T., ... & Fairbairn, E. M. (2021). Recommendations of RILEM TC 287-CCS: thermo-chemo-mechanical modelling of massive concrete structures towards cracking risk assessment. *Materials and structures*, 54(4), 135.
- Boulay, C., André, J. L., & Torrenti, J. M. (2010a). Projet de mode opératoire pour la détermination et la chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment d'un béton placé dans un calorimètre quasi adiabatique pour béton (QAB). *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, (278).
- Boulay, C., Torrenti, J. M., André, J. L., & Saintilan, R. (2010b). Calorimétrie quasi adiabatique pour bétons : facteurs d'influence. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et chaussées*, (278), 19.
- Boulay, C., Staquet, S., Delsaute, B., Carette, J., Crespini, M., Yazoghli-Marzouk, O., ... & Ramanich, S. (2014). How to monitor the modulus of elasticity of concrete, automatically since the earliest age?, *Materials and structures*, 47, 141-155.
- Bourchy A., (2018). Relation chaleur d'hydratation du ciment: montée en température et contraintes générées au jeune âge du béton, thèse de l'Université Paris-Est.
- Bresson J. (1980), La prévision de la résistance des produits en béton, publication technique 56, CERIB.
- Briffaut, M., Benboudjema, F., Torrenti, J. M., & Nahas, G. (2012). Effects of early-age thermal behaviour on damage risks in massive concrete structures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(5), 589-605.
- Cabeza, L. F., Barreneche, C., Miró, L., Morera, J. M., Bartolí, E., & Fernández, A. I. (2013). Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 536-542.
- Kanavaris, F., Soutsos, M. and Chen, J.F. (2023), Effect of Temperature on the Early-age Hydration and Setting Behaviour of Mixes Containing GGBS, *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 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*, 13-46.

Laplante P., Roussel S., Lecrux S., *Technique maturométrique : La loi d'Arrhenius au service des chantiers*, International Conference on Concrete: From Material to Structure Arles, France (1996)

Reinhardt H-W, Grosse CU (2004) Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete. *Constr Build Mater* 18:145–154

Riding, K. A., Poole, J. L., Folliard, K. J., Juenger, M. C., & Schindler, A. K. (2011). New Model for Estimating Apparent Activation Energy of Cementitious Systems. *ACI Materials Journal*, 108(5).

Ulm, F. J., & Coussy, O. (1996). Strength growth as chemo-plastic hardening in early age concrete. *Journal of engineering mechanics*, 122(12), 1123-1132.

Waller V., (1999), *Relations entre composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression*, thèse de l'ENPC.

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(2), 442.