

L'influence du durcissement thermique sur les propriétés de durabilité des éléments préfabriqués en béton

■ J. R. Mackechnie, Concrete NZ, Université de Canterbury, Nouvelle-Zélande
H. Beushausen, Université du Cap, Afrique du Sud
A. Scott et V. Shah, Université de Canterbury, Nouvelle-Zélande

Le type et la durée de la cure des éléments de béton ont été un sujet très discuté parmi les ingénieurs de projet et les producteurs d'éléments préfabriqués ces dernières années. Afin d'accélérer le développement de la résistance initiale, la cure est souvent effectuée à des températures élevées, la durée requise de la cure étant généralement déterminée par le concept de maturité. Cependant, ce type de durcissement thermique est parfois associé à une structure de pores plus grossière du béton et donc à une durabilité réduite. L'effet réel de la cure sur la durabilité des éléments de béton peut être évalué ici en utilisant le concept de performance équivalente. Dans la présente étude, les influences de la température et de la durée du traitement thermique sur les propriétés de durabilité du béton ont été étudiées. Les résultats montrent que dans de nombreux cas, la cure des bétons préfabriqués typiques peut être achevée après 24 heures sans effets négatifs sur la durabilité.

La différence fréquente entre la résistance nominale et la résistance réelle des éléments préfabriqués en béton, ainsi que l'influence de la cure thermique, enlèvent toute pertinence aux directives de cure conventionnelles lorsqu'il s'agit de la production d'éléments préfabriqués en béton [1]. Les différences extrinsèques (traitement) et intrinsèques (matériau) entre le béton coulé sur place et les éléments préfabriqués peuvent permettre de réduire le temps de cure de ce dernier, sans nécessairement affecter négativement la résistance ou la durabilité à long terme du béton. Ce document examine comment le temps de cure requis peut être évalué en utilisant soit la détermination de la maturité soit la détermination de la durabilité équivalente.

Cure thermique et effets sur les propriétés du béton

Le traitement thermique du béton favorise l'hydratation rapide du ciment, augmentant ainsi la résistance initiale, mais il provoque également la disposition des produits d'hydratation près de la surface des grains de ciment, réduisant ainsi l'apport d'eau supplémentaire au grain de ciment, ce qui réduit également le degré d'hydratation supplémentaire [2].

Cela affecte la distribution de la taille des pores dans la texture du béton, qui forme proportionnellement plus de pores moyens et grands en raison du degré réduit d'hydratation, ce qui peut entraîner une réduction de la durabilité [3]. Des températures initiales élevées, supérieures à 60°C, peuvent également rendre la microstructure du béton plus grossière, réduisant ainsi de manière significative l'avantage attendu d'une maturité plus précoce [4].

L'approche de la maturité, qui peut être utilisée pour évaluer le temps de cure nécessaire, est basée sur l'hypothèse que la résistance à la compression permet une évaluation de la structure générale des pores [5]. Cependant, la détermination de la maturité ne permet pas une évaluation directe des propriétés de la structure des pores qui influencent également la durabilité. Ceci est illustré dans la figure 1, où une maturité équivalente des éléments préfabriqués en béton par rapport à la cure humide standard nécessiterait une cure d'une nuit à 60 °C (voir également [6]).

Certaines normes, par ex. la norme australienne AS 3600, autorisent l'utilisation de la méthode de la maturité pour déterminer le temps de cure nécessaire, qui correspond généralement au moment où le béton a atteint 80 % de sa résistance nominale (par ex. 24 MPa pour un béton dont la résistance nominale est de 30 MPa) [7]. Dans la présente recherche, la méthode de durabilité équivalente a été utilisée pour étudier l'effet du durcissement thermique sur les propriétés de résistance et de durabilité du béton.

Essais expérimentaux

Les essais expérimentaux ont été divisés en deux parties : des essais de béton haute résistance ont été réalisés à l'Université du Cap (UCT) en Afrique du Sud et des essais de béton à résistance moyenne à élevée ont été menés à l'Université de Canterbury (UC) en Nouvelle-Zélande. Les expériences menées à l'UCT visaient à étudier l'influence générale des températures de durcissement sur la microstructure du béton. Les expériences menées à l'UC visaient à comparer les performances du béton coulé sur place typique avec celles des éléments préfabriqués en béton, afin d'évaluer les exigences de conception associées.



■ Le Dr James Mackechnie est responsable de l'éducation, de la formation et du développement chez Concrete New Zealand et est basé à Christchurch, en Nouvelle-Zélande. Il est également chercheur principal adjoint à l'université de Canterbury et ancien président de la Learned Society de Concrete New Zealand. Il a plus de trente ans d'expérience dans la recherche et le développement de matériaux de construction en béton dans les domaines de la science, du conseil et de la construction de bâtiments en Nouvelle-Zélande et en Afrique du Sud. Ses recherches portent sur la durabilité du béton et le domaine des additions de béton.
james@concretenz.org.nz



■ Le Prof Dr Hans Beushausen est professeur de science des matériaux de construction et d'ingénierie des structures et directeur de l'Institut de recherche sur les matériaux en béton à l'université du Cap (UCT), en Afrique du Sud. Après avoir terminé ses études d'ingénieur civil à la HAW de Hambourg (fin des années 1990), il a obtenu son MSc à l'UCT en 2000 et son doctorat en 2005. Ses recherches portent sur la technologie du béton, la durabilité et la prédiction de la durée de vie des ouvrages en béton, ainsi que l'assainissement du béton. Il est rédacteur pour le PBI depuis 2004.
Hans.beushausen@uct.ac.za



■ Vineet Shah est chercheur postdoctoral au département de génie civil et des ressources naturelles de l'université de Canterbury, en Nouvelle-Zélande. En 2018, il a obtenu son doctorat en génie civil à l'IIT Delhi, en Inde. Son principal domaine de recherche comprend la caractérisation et l'hydratation des liants à faible teneur en carbone et la compréhension de l'influence du type de liant sur la durabilité à long terme du béton sous l'influence de la carbonatation.
vineet.shah@canterbury.ac.nz



■ Allan Scott est professeur associé de génie civil en matériaux durables à l'université de Canterbury, en Nouvelle-Zélande. Ses recherches portent notamment sur le développement de matériaux de construction durables (tels les systèmes de liants à base de silicate de magnésium), sur la détermination des performances structurelles résiduelles et des processus de dégradation dans les structures en béton armé corrodées et endommagées par des séismes et sur les options d'utilisation des ressources in situ (« in situ resource utilization », ISRU) pour les matériaux de construction extraterrestres.
allan.scott@canterbury.ac.nz

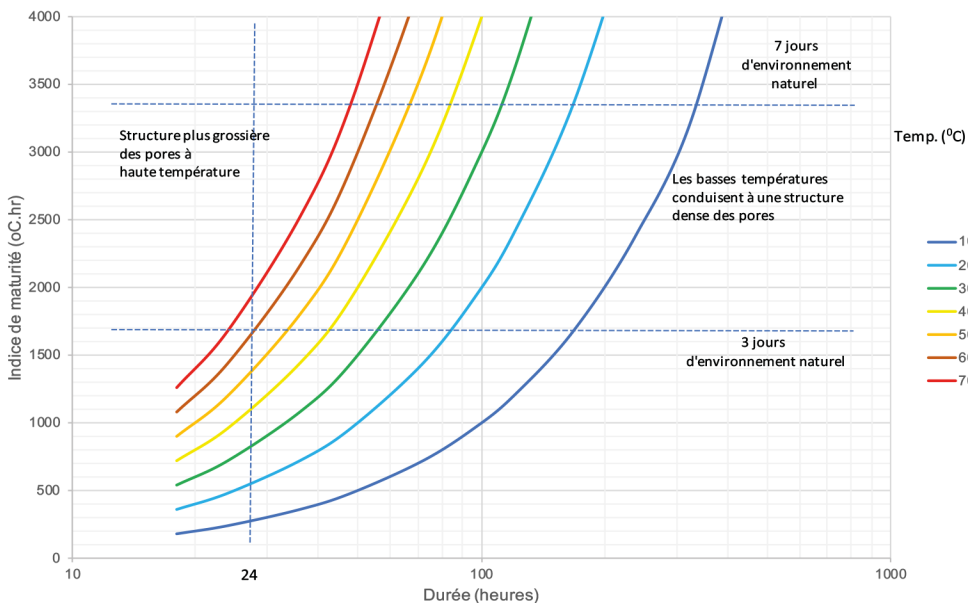


Fig. 1 : relation entre l'indice de maturité et la température de durcissement du béton (d'après [6])

Deux types différents de ciment produits en Nouvelle-Zélande ont été utilisés dans les deux études : un CEM I universel (GP) et un ciment à haute résistance (HE) typique de la production d'éléments préfabriqués. Les adjuvants pour béton utilisés et leur quantité étaient conformes à la pratique courante dans l'industrie des éléments préfabriqués [8].

Béton haute résistance pour la production d'éléments préfabriqués

Les essais expérimentaux à l'UCT ont été réalisés avec deux conceptions de mélange de béton utilisant la composition indiquée dans le tableau 1. Le granulats grossier était constitué de grauwacke et un mélange local (50/50) de sable des dunes naturel et de grauwacke concassé a été utilisé comme granulats fin.

Les essais des bétons comprenaient la détermination du développement de la résistance à la compression (mesurée sur des cubes de 100 mm de longueur d'arête) et la détermination des propriétés de durabilité selon la méthode sud-africaine de perméabilité à l'oxygène [9 - 11]. L'indice de perméabilité à l'oxygène (« Oxygen Permeability Index », OPI) fournit une évaluation pratique et fiable de la structure et de la connectivité des pores du béton. Il est utilisé en Afrique du Sud pour la conception et le contrôle de la qualité des ouvrages en béton dans les classes d'exposition XC (corrosion de l'armature due à la carbonatation). En particulier, cette méthode d'essai permet de déterminer de manière très fiable les influences de la composition du mélange, du compactage et des conditions de cure sur la microstructure du béton.

Tableau 1 : composition du mélange de béton haute résistance

Composition / Propriétés	kg/m ³
Ciment de Portland (GP ou HE)	381
Eau	160
Sable (50/50 dune / concassage)	801
Granulat (19 mm)	1050
SP SikaViscoCrete -90 HE (ml)	1524
Acc SikaRapid -2 (ml)	2960
Valeur e/c	0,42

Tableau 2 : composition des mélanges, béton préfabriqué et béton coulé sur place (référence) (kg/m³)

Composition / Propriétés	GP30 Référence	GP35 Référence	GP40 Référence	HE40 Élément préfabriqué	GP45 Élément préfabriqué	HE45 Élément préfabriqué
Ciment de Portland	265 GP	300 GP	360 GP	360 HE	380 GP	380 HE
Eau	162	165	165	158	165	158
Sable	885	875	875	885	860	870
Granulat grossier	1100	1050	1050	1050	1050	1050
Agent réducteur d'eau (ml)	1080	1500	1800	0	1900	0
Entraîneur d'air (ml)	100	0	0	0	0	0
Superplastifiant (ml)	0	0	0	1900	0	2000
Valeur e/c	0,61	0,55	0,46	0,43	0,43	0,41
fc, 28 jours (MPa)	33,4	42,3	50,9	58,5	56,2	72,6

Les cubes de béton ont été durcis dans cinq conditions de cure différentes, énumérées ci-dessous. Le durcissement thermique a été effectué comme suit : après le coulage, laisser reposer les éprouvettes pendant 4 heures et les sceller avec un film plastique pour éviter la perte d'eau - Placer les moules dans un four à température ambiante et laisser la température s'élever à la valeur requise pendant 2 heures - Exposer les éprouvettes à la température de durcissement pendant 18 heures, puis décoffrer les moules - Stocker à 23 °C et 50 % d'humidité jusqu'à ce que le stade de 28 jours soit atteint.

- Cure à température ambiante normale (23 °C, 50 % d'humidité de l'air)
- Stockage dans l'eau (28 jours)
- Traitement thermique à 40 °C
- Traitement thermique à 55 °C
- Traitement thermique à 70 °C

Mélanges à résistance modérée à élevée

Les compositions de mélange utilisées à l'Université de Canterbury sont énumérées dans le tableau 2. Des études expérimentales ont été réalisées avec deux mélanges de référence et quatre mélanges d'éléments préfabriqués en béton. Le béton de référence a été initialement exposé à une température de 21 °C, conformément aux conditions communément utilisées pour le béton coulé sur place, avant d'être soumis à une cure humide pendant trois ou sept jours. Comme ci-dessus, les mélanges d'éléments préfabriqués ont d'abord été stockés à 21 °C pendant quatre heures. Ensuite, pendant une période de deux heures, la température a augmenté avant que les éprouvettes ne soient exposées à 21, 30, 40 ou 50 °C ; 18 heures plus tard, les éprouvettes cylindriques ont été décoffrées et la surface d'essai a été exposée au séchage (21 °C et 60 % d'humidité de l'air).

La résistance à la carbonatation et aux chlorures du béton a été évaluée après 28 jours de durcissement à l'aide de tests de carbonatation accélérée et de tests de migration des chlorures (NT Build 492) [12 - 14].

Les études expérimentales comprenaient les méthodes d'essai suivantes :

- Résistance à la compression (1, 7 et 28 jours).
- Les tests de migration des chlorures ont été effectués selon la norme NT Build 492, où la migration des chlorures est mesurée après l'application d'une différence de potentiel de 30 V pendant 24 heures [13].
- La carbonatation accélérée a été déterminée selon la norme ISO 1920, en exposant les éprouvettes de béton à une concentration élevée de dioxyde de carbone (2,5 %) pendant une période de 56 jours [14].

Résultats de l'étude

L'influence du durcissement thermique sur le développement de la résistance à la compression

L'influence du traitement thermique sur le développement de la résistance à la compression est illustrée dans les figures 2 et 3 (y compris les barres d'erreur pour l'écart type) en utilisant les résultats obtenus à l'UCT. Comme prévu, le

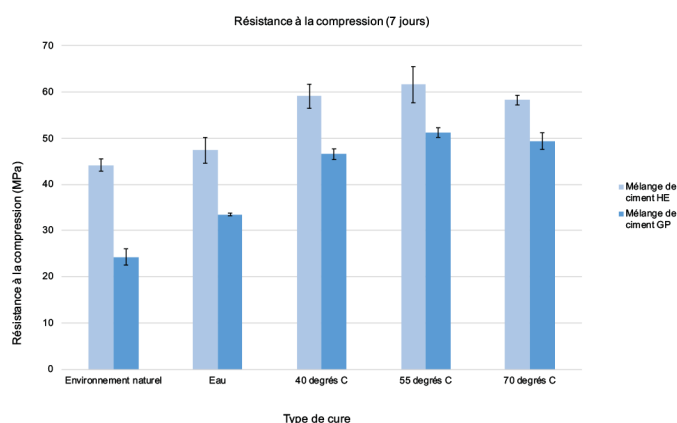


Fig. 2 : influence de la température initiale de la cure sur la résistance à la compression sur 24 heures

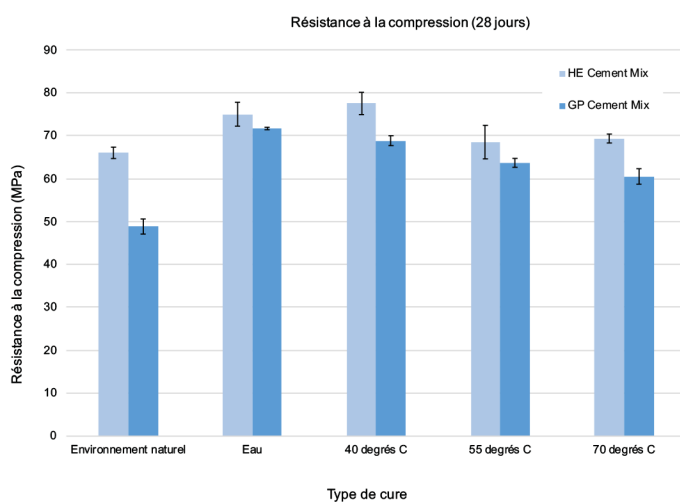


Fig. 3 : influence de la température initiale de la cure sur la résistance à la compression à 28 jours

durcissement thermique conduit à des résistances initiales plus élevées, en particulier à un stade précoce, avec des valeurs significativement plus élevées le premier jour après la production par rapport au béton durci dans l'eau ou dans des conditions ambiantes. Après une période de 28 jours, la résistance à la compression des éprouvettes durcies à la chaleur était toujours supérieure à celle des éprouvettes durcies dans des conditions ambiantes, en particulier pour le béton produit avec du ciment universel (GP). Dans l'ensemble, aucun effet négatif significatif du durcissement thermique sur la résistance à la compression à des stades plus avancés n'a été observé dans cette étude.

Coefficient de perméabilité

Les résultats du test de perméabilité à l'oxygène sont présentés dans la figure 4. Une valeur plus faible indique un béton plus durable. Dans l'ensemble, le durcissement thermique n'a eu aucun effet négatif sur les propriétés de durabilité des compositions de mélange étudiées, quel que soit le type de

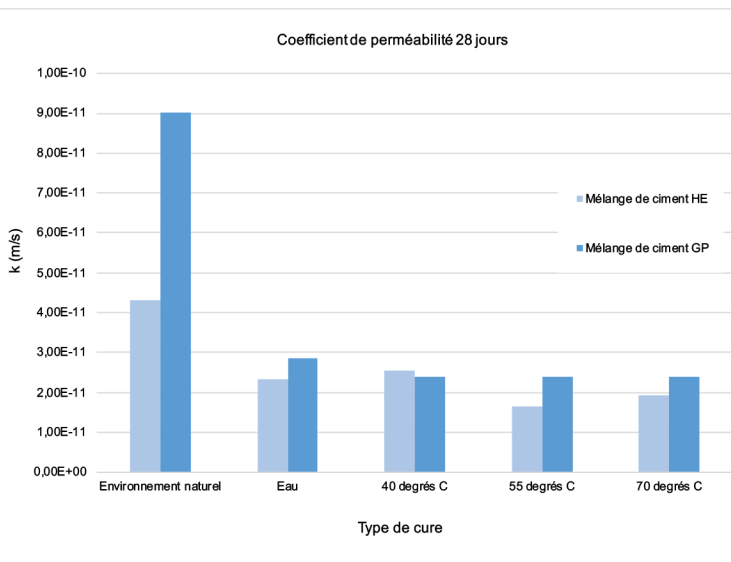


Fig. 4 : influence de la température initiale de la cure sur le coefficient de perméabilité

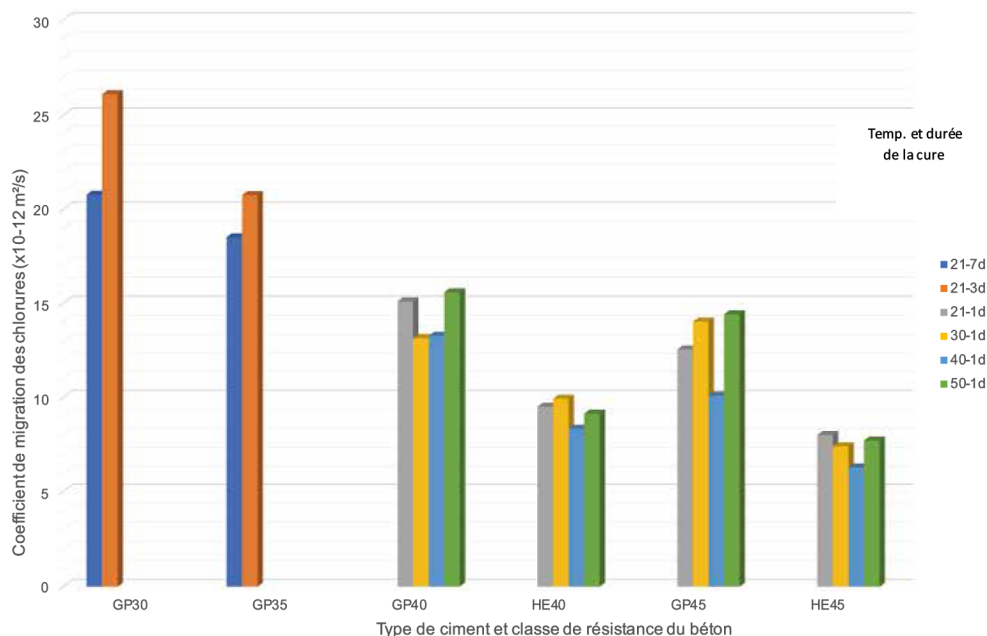


Fig. 5 : coefficients de migration des chlorures mesurés après 28 jours de durcissement

ciment. À toutes les températures de durcissement, le coefficient de perméabilité était conforme aux valeurs mesurées sur des éprouvettes entièrement stockées dans l'eau et était significativement inférieur à celui du béton durci dans des conditions ambiantes simulées.

Résistance aux chlorures

Des essais réalisés à l'Université de Canterbury sur la résistance aux chlorures de béton de classes de résistance 30 et 35 MPa ont montré des valeurs relativement faibles même après un stockage humide de trois ou sept jours (fig. 5). Les coefficients de migration des chlorures déterminés à partir des valeurs d'essai ici étaient supérieurs à $18 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, tandis que le béton préfabriqué a montré une résistance modérée à bonne aux chlorures avec des coefficients de diffusion compris entre $6-15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. La température initiale optimale de la cure était d'environ 40 °C, les coefficients de diffusion étant plus élevés lorsque la température était portée à 50 °C. Un effet similaire du traitement thermique a déjà été décrit par d'autres chercheurs [15, 16]. En général, le béton contenant du ciment HE présentait des coefficients de migration inférieurs à ceux d'un béton similaire fabriqué avec du ciment GP.

Carbonatation accélérée

La carbonatation accélérée a été déterminée selon la norme ISO 1920, en exposant des éprouvettes de béton à 2,5 % de dioxyde de carbone à 28 jours. La profondeur de carbonatation a été déterminée après 56 jours d'exposition dans la chambre de carbonatation (fig. 6). Les résultats montrent que les mélanges d'éléments préfabriqués ont une profondeur de carbonatation similaire ou inférieure et donc une meilleure durabilité par rapport au béton de référence, même sans cure humide active. La profondeur de carbonatation a également diminué avec l'augmentation de la maturité induite par le réchauffement du béton (des températures de durcissement initiales plus élevées ont entraîné une meilleure résistance à la carbonatation).

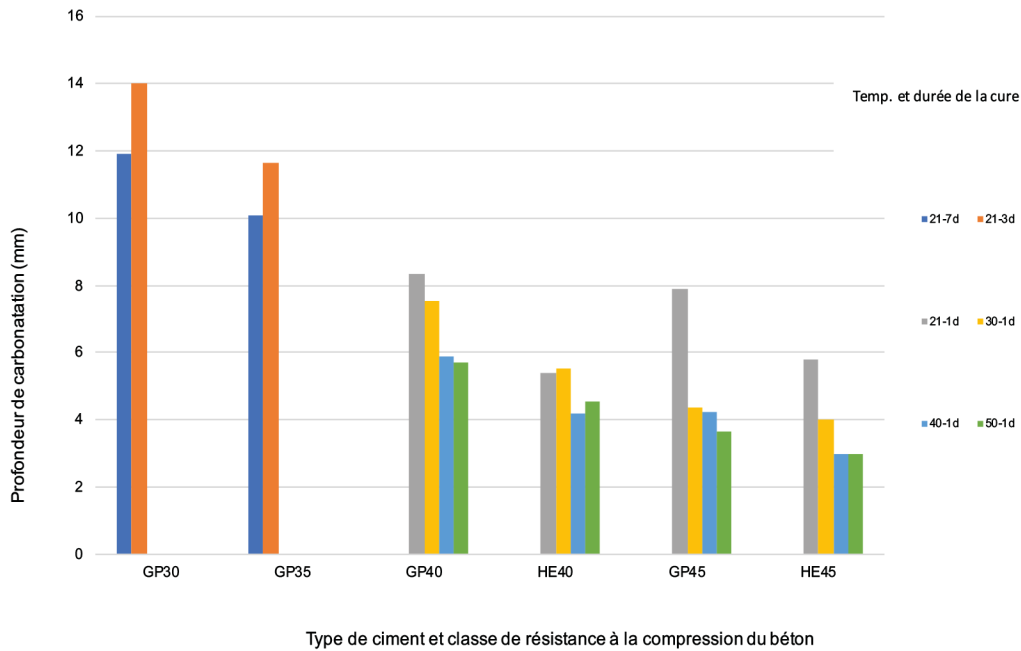
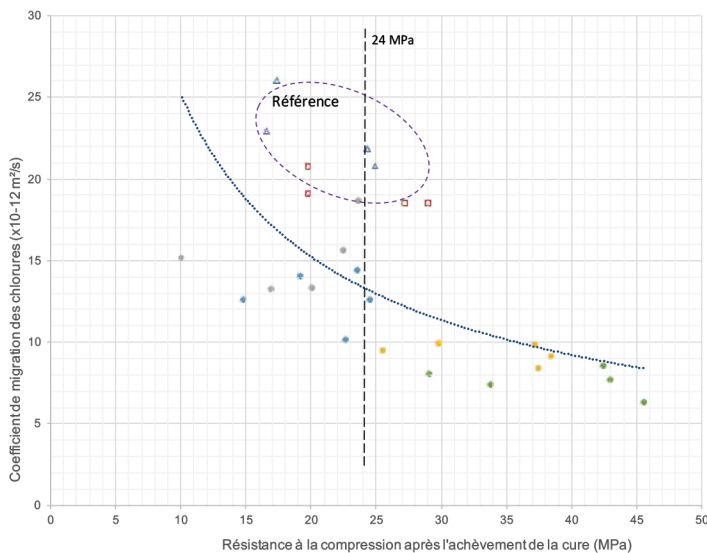


Fig. 6 : résultats des tests de carbonatation accélérée après 56 jours d'exposition

Discussion

Pour la détermination du temps de cure nécessaire, la simple observation de la maturité du béton à des températures de cure élevées ne donne qu'une image inadéquate et n'est gé-

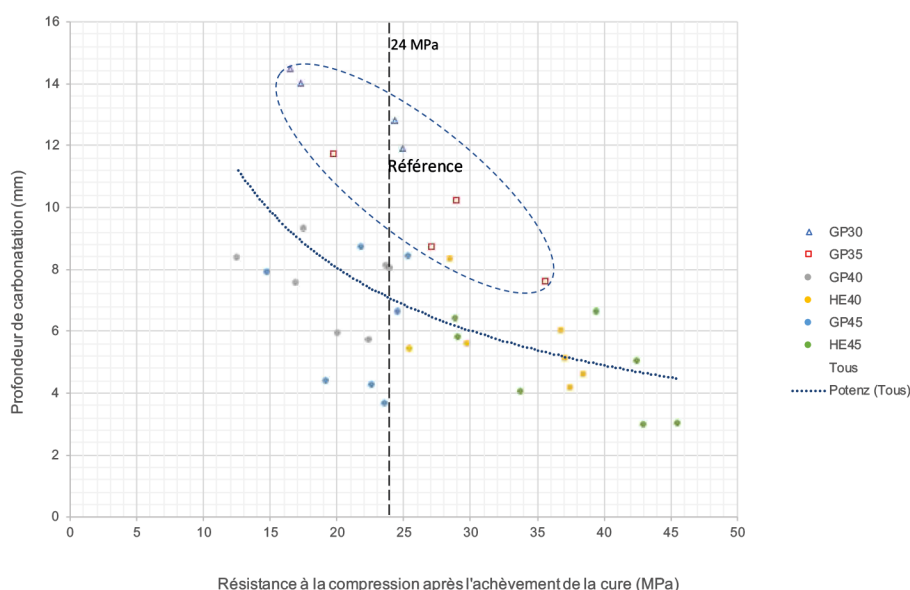
néralement applicable que pour des températures inférieures à 50 °C. En outre, l'estimation de la durabilité du béton à partir de la résistance à la compression est trompeuse, ce qui est particulièrement vrai pour les bétons produits avec des liants à réactivité lente, par ex. béton à cendre volante. Ceci est



- △ GP30
- GP35
- GP40
- HE40
- GP45
- HE45
- Tous

Fig. 7 : comparaison de la résistance à la compression après l'achèvement de la cure avec le coefficient de migration des chlorures à 28 jours

Fig. 8 : comparaison de la résistance à la compression (après l'achèvement de la cure) avec la profondeur de carbonatation



visible sur la figure 7, où la résistance à la compression après l'achèvement de chaque cure est comparée au coefficient de migration des chlorures à 28 jours. Alors que le béton préfabriqué durci pendant 24 heures a montré une relation raisonnable avec la maturité (par ex. une résistance aux chlorures modérée à bonne avec une résistance supérieure à 24 MPa), les bétons de référence dans certains cas avaient des résistances supérieures à 24 MPa mais avaient encore des valeurs de résistance aux chlorures faibles.

De même, l'utilisation de l'approche de l'indice de maturité ne fournit pas une base fiable pour prédire la résistance à la carbonatation, ce qui a été observé principalement pour les bétons de référence ayant une résistance modérée d'environ 30 MPa. Ceci est montré dans la figure 8 - le béton de référence avec une résistance plus faible a constamment montré des profondeurs de carbonatation plus élevées par rapport au béton préfabriqué dans l'essai ISO 1920.

Recommandations

Lorsque les producteurs d'éléments préfabriqués en béton utilisent un béton qui a une résistance plus élevée que la ré-

sistance requise dans la conception structurelle en raison des exigences de résistance initiale, cela permet non seulement une manipulation précoce, mais produit aussi généralement un potentiel de durabilité plus élevé. Cette amélioration de la qualité de la microstructure du béton est également évidente lorsque le durcissement initial est effectué sans traitement actif de l'humidité. Afin d'exploiter les avantages associés à la production, il convient de mettre au point une méthode de contrôle de la qualité qui puisse être utilisée pour optimiser les compositions des mélanges et les méthodes de production. Un moyen pratique d'y parvenir est d'utiliser des méthodes d'essai basées sur la performance en conjonction avec des indicateurs de durabilité.

L'expérience de la fourniture d'éléments préfabriqués en béton suggère que les éléments préfabriqués sont souvent fabriqués à partir de béton dont la résistance est supérieure de deux degrés à celle spécifiée (par ex. classe 40 MPa pour 30 MPa ou 45 MPa pour 35 MPa). La présente étude a montré que cette approche garantit généralement une durabilité suffisante, même si les éléments préfabriqués en béton ne sont pas soumis à une cure active avec de l'humidité.

En général, les ingénieurs de projet et les producteurs d'éléments préfabriqués en béton devraient prendre en compte la résistance supérieure attendue et la meilleure durabilité associée par rapport au béton coulé sur place dans leur conception structurelle et conceptuelle des éléments de construction.

Conclusions

Les résultats de la présente étude montrent que l'approche de l'indice de maturité est peu utile pour estimer le temps de cure requis pour un béton à résistance modérée. Cela était évident lors de la comparaison des performances du ciment HE par rapport au ciment GP et également lors de l'analyse des changements microstructuraux qui se produisent à des températures de durcissement élevées. Les simples calculs de maturité ne constituent souvent pas une base fiable pour évaluer les propriétés de durabilité à des températures de cure élevées (généralement supérieures à 50-60 °C) et pour différents types de béton.

La qualité du recouvrement en béton peut être influencée par la température et la durée de la cure appliquée dans l'usine de préfabrication. Cet effet peut être contrôlé et évalué par la mise en œuvre d'un programme expérimental de contrôle de la qualité approprié, basé sur la mesure d'indicateurs simples de durabilité.

Remerciements

L'Université de Canterbury remercie le financement du secteur des éléments préfabriqués de Concrete New Zealand qui a permis l'achat de la chambre de carbonatation. ■

Bibliographie

- [1] American Society for Testing and Materials, ASTM C1074 - Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method, ASTM, 2017.
- [2] Verbeck, J.G. and Helmuth, R.H., 'Structures and physical properties of cement paste', Proc. 5th Int. Cong. Chem. Cem. Tokyo, (1968).
- [3] Reinhardt, R.-W. and Stegmaier, M., 'Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of SCC', Cement and Concrete Research, 36 (2006) 879-885.
- [4] Detwiler, R.J., Fapohunda, C.A. and Natale, J., 'Use of supplementary cementing materials to increase the resistance to chloride ion penetration of concretes cured at elevated temperatures', ACI Mater. J. 91 (1994), 63-66.
- [5] Ballim, Y. and Graham, P.C., 'A maturity approach to the rate of heat evolution in concretes', Mag. Conc. Res., 55 (2003) 249-256.
- [6] Mackechnie, J., Scott, A. (2019), 'Time to cessation of curing of concrete using the maturity method or by equivalent durability testing', Concrete NZ Conference, 2019.
- [7] Standards Australia, AS 3600:2018 - Concrete structures standard, 2018, Canberra, Australia.
- [8] Mackechnie, J., Scott, A., Beushausen, H., Shah, V. (2021), 'Time to Cessation of Curing for Precast Concrete Based on Equivalent Durability Performance', SESOC Journal - Structural Engineering Society of New Zealand, Vol. 34, April 2021, pp. 66 - 73.
- [9] Nganga, G., Alexander, M.G., Beushausen, H., 'Practical Implementation of the Durability Index performance-based design approach', Construction and Building Materials, Vol 45, August 2013, pp. 251-261, 2013.
- [10] South African Bureau of Standards (SABS). South African National Standard (SANS): Civil engineering test methods Part CO3-1: Concrete durability index testing - Preparation of test specimens (SANS 3001-CO3:2015). Pretoria. SABS Standards Division, 2015.
- [11] South African Bureau of Standards (SABS). South African National Standard (SANS): Civil engineering test methods Part CO3-2: Concrete durability index testing - Oxygen permeability test (SANS 3001-CO3-2:2015). Pretoria. SABS Standards Division, 2015.
- [12] Alexander, M.G. and Beushausen, H. (2019), 'Durability, service life and modelling for reinforced concrete structures - review and critique', Cement and Concrete Research, 122, 17-29.
- [13] Nordtest Method, NT Build 492 - Chloride migration coefficients from non-steady-state migration experiments, 1999, Finland.
- [14] International Standards Organization, ISO 1920-12: Determination of the carbonation resistance of concrete - accelerated carbonation method, Geneva, 2015.
- [15] Wang, Q., Shi, M., Wang, D., 'Influence of elevated curing temperature on the properties of cement paste and concrete at the same hydration degree', Wuhan Univ. of Tech. (2017) 1344-1351.
- [16] Garcia Calvo, J.L., Alonso, M.C., Fernandez Luco, L., Robles Velasco, M., 'Durability performance of sustainable self-compacting concretes in precast products due to heat curing', Constr. Build. Mater. 111, (2016) 379-385.