

Prévention des fissures traversantes pour le bétonnage des bordures du pont Bessières

Autor(en): **Charron, Jean-Philippe / Denarié, Emmanuel / Brühwiler, Eugen**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Tracés : bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **129 (2003)**

Heft 21: **Pont neuf**

PDF erstellt am: **26.11.2023**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-99244>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Prévention des fissures traversantes pour le bétonnage des bordures du pont Bessières

La fissuration du béton au jeune âge est une problématique qui préoccupe l'ingénieur civil depuis longtemps. Bien qu'il ne soit pas directement à l'origine d'une perte de capacité portante, ce phénomène est potentiellement nuisible à la durabilité des structures ; en effet, les fissures traversantes facilitent la pénétration d'agents agressifs, tels que les ions chlorure, qui contribuent à dégrader la matrice cimentaire et à amorcer la corrosion des armatures. Parmi les cinq causes principales reconnues comme pouvant être à l'origine de la fissuration [1]¹, les deux phénomènes les plus importants sont liés à la réaction d'hydratation du ciment avec l'eau de gâchage du béton [2,3]. La réaction d'hydratation provoque une contraction du béton - le retrait endogène - et un dégagement de chaleur significatif qui induit des gradients de température dans les structures. Par ailleurs, la dessiccation précoce du béton, ainsi que les forces et déplacements imposés aux éléments de structure en béton peu après leur fabrication peuvent aussi être responsables d'une détérioration.

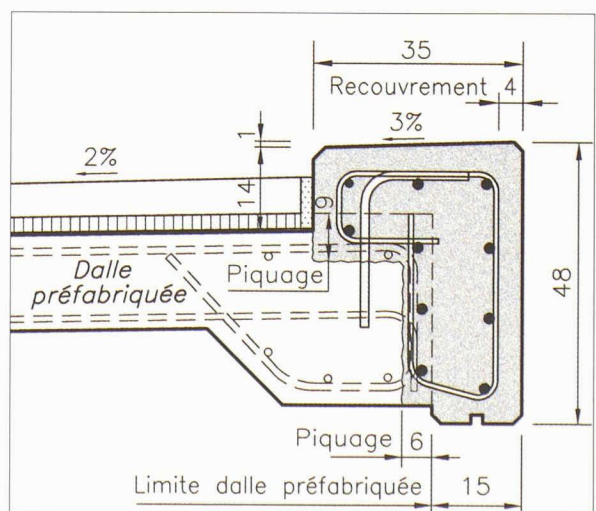
Dans la plupart des situations, l'ingénieur peut minimiser le rôle de la dessiccation, des déplacements et des forces appliqués sur les structures au jeune âge du béton en observant les règles de l'art. En effet, une mise en place rapide de la cure de mûrissement alliée à une limitation des activités ayant un impact mécanique sur la structure permettent généralement d'éliminer ces sources potentielles de fissuration. Il s'avère en revanche plus complexe de contenir l'influence du retrait endogène et des gradients de température, puisque ce sont des phénomènes intrinsèques à l'hydratation du béton. De plus, l'usage de bétons à haute performance - qui présentent un dosage en ciment élevé - ainsi que la réhabilitation d'infrastructures routières constituées de bétons ancien et nouveau (structure hybride) créent des situations propices à l'apparition de gradients de température importants, potentiellement générateurs de fissures, dans les structures.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

Dans ce contexte, le Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages de l'EPFL a récemment proposé des recommandations afin d'aider l'ingénieur dans ses choix de conception pour limiter la fissuration traversante dans les structures hybrides [4]. Consacré à la réhabilitation des bordures du pont Bessières à Lausanne, le présent article fournit un exemple d'application concrète de ces recommandations.

Méthodologie de la réhabilitation des bordures du pont Bessières

Dans le cadre de la seconde phase de réhabilitation du pont Bessières qui a débuté en 2001 (voir l'article précédent en page 7), l'une des interventions majeures consistait à remplacer les cornières en béton préfabriquées par de nouvelles bordures coulées en place (fig. 1). Soumis à une exposition sévère, ces éléments exigeaient en outre la mise en oeuvre d'armatures assurant une résistance élevée à la corrosion, conformément aux recommandations de l'article 2.4.3.1 de la norme SIA 262 [5]. L'intérêt de l'utilisation de telles armatures a été démontré récemment par le biais de simulations numériques [6].



Étant donné la grande taille de ces bordures, le développement de gradients de température importants à l'intérieur de la structure hybride et, en conséquence, l'apparition de fissures au jeune âge, étaient à craindre. Afin de pallier ce problème, le dimensionnement proposé pour la réhabilitation des bordures de l'ouvrage a d'abord été vérifié à l'aide d'une démarche simplifiée pour la construction de structures hybrides. Par la suite, une analyse détaillée a été effectuée à l'aide d'un logiciel par éléments finis en vue de confirmer les conclusions ainsi obtenues.

Analyse simplifiée

Cette première analyse a été réalisée sur la base du rapport n° 563 de l'OFROU intitulé « Comportement au jeune âge du béton et limitation de la fissuration traversante des structures hybrides » [4]. Les recommandations contenues dans ce document relèvent d'une réflexion générale sur l'influence de la température sur le comportement au jeune âge du béton.

Responsable du développement des propriétés mécaniques du béton, l'hydratation du ciment entraîne un important dégagement de chaleur (ΔT_1), suivi d'une phase de refroidissement du matériau (ΔT_2) (fig. 2a). Ces variations de température produisent consécutivement une dilatation et une contraction du béton. Or les coffrages, les armatures et, s'il y a lieu, les couches de béton sous-jacentes, imposent des

conditions aux limites qui restreignent les mouvements du matériau et induisent des contraintes à l'intérieur du béton (fig. 2b). L'objectif est donc de s'assurer que les contraintes de traction générées demeurent en tout temps inférieures à la résistance du matériau pour éviter la fissuration. Une technique consiste à réduire l'intensité du refroidissement du béton en abaissant sa température à l'état frais (T_{frais}). Si cet abaissement de la température initiale ralentit légèrement la cinétique d'hydratation du matériau [7], il permet en revanche de réduire les contraintes de traction générées par la contraction thermique du béton (proportionnelle à ΔT_2) et le retrait endogène [2]. La probabilité de fissuration du béton au jeune âge se trouve ainsi diminuée.

Bernard et al. [4] suggèrent de relier le critère de conformité pour la conception d'une structure hybride à la différence de température maximale qui apparaît dans le béton. Selon cette approche, la différence de température admissible (ΔT_{adm}) dans la structure hybride est d'au maximum 12°C. Un critère obtenu sur la base d'hypothèses qu'il importe de préciser brièvement. D'une part, le nouveau béton mis en place présente les propriétés moyennes suivantes entre sa fabrication et le moment auquel sa fissuration hypothétique surviendrait : une résistance à la traction de 2,5 N/mm², un module d'élasticité de 28 000 N/mm² et un coefficient de dilatation thermique de 10⁻⁵/°C. Ensuite, le degré d'entrave

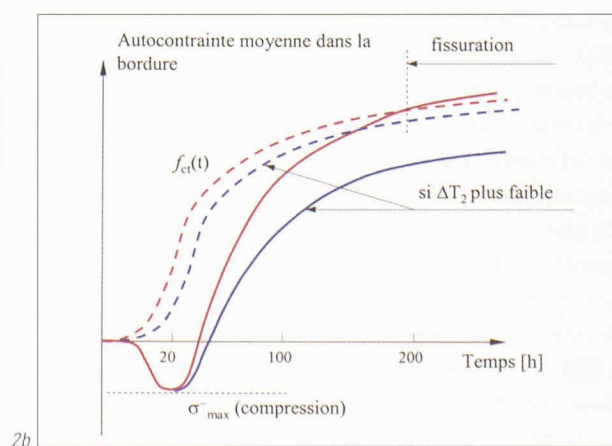
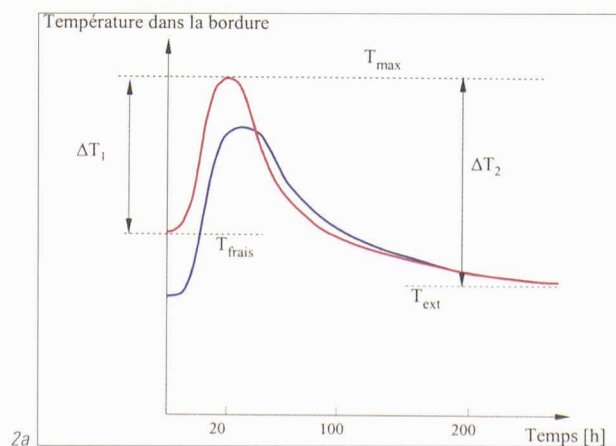


Fig. 1 : Plan détaillé de la nouvelle bordure du pont Bessières
(Service des routes et voirie, Ville de Lausanne)

Fig. 2 : Influence de l'intensité du refroidissement sur la probabilité de fissuration,
adapté de [4]

Fig. 3 : Section équivalente limite en fonction de T_{ref} , du dosage et du type de ciment
utilisé pour $\Delta T_{adm} = 12^\circ C$ [4]

Tableau A : Composition du nouveau béton

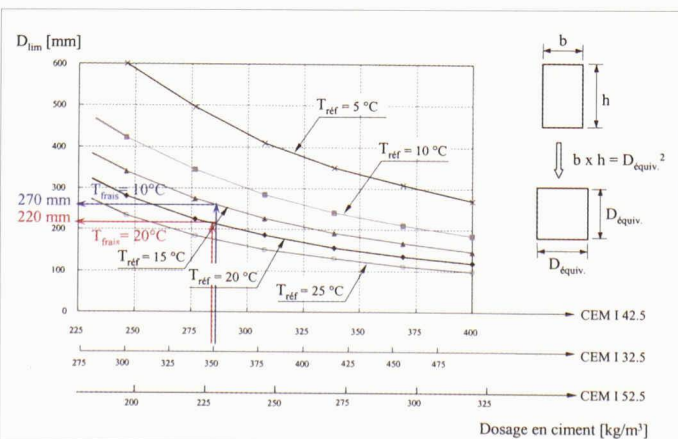
des déformations du béton au jeune âge a été considéré égal à 75%. Enfin, le retrait endogène et le comportement visco-élastique du béton sont négligés dans cette analyse. En fait, l'approche simplifiée synthétise tous les aspects liés au comportement thermo-mécanique vieillissant du béton en une différence de température admissible entre la structure existante et la réparation.

Pour appliquer cette démarche de calcul simplifiée, il faut transformer la section transversale de l'élément à fabriquer en une section carrée de surface équivalente ($D_{equiv} = (b \cdot h)^{1/2}$) comme l'illustre le schéma à la droite de la figure 3. Cette opération est nécessaire, car l'abaque utilisé dans la suite des opérations n'est valable que pour l'étude d'un élément carré. Le principe d'utilisation de l'abaque est le suivant: la différence de température admissible ($\Delta T_{adm} = 12^\circ C$) dans la structure hybride sera respectée si la section équivalente (D_{equiv}) de l'élément à fabriquer est inférieure ou égale à la section limite (D_{lim}) déterminée au moyen de l'abaque. Cette dernière est obtenue par le biais de la composition de béton choisie et de la température de référence du bétonnage (normalement $T_{ref} = 20^\circ C$).

La section équivalente de la bordure du pont Bessières est égale à 270 mm, il faut donc faire en sorte que D_{lim} soit supérieur ou égal à cette valeur à la figure 3. Compte tenu de la composition du béton (dosage en ciment CEM I 32.5 =

325+25 = 350 kg/m³, voir tabl. A), l'écart de température maximal dans la structure demeurera inférieur à 12°C pour une température de référence de 15°C. Ce résultat indiquait clairement que le potentiel d'échauffement de la bordure devait être réduit, puisqu'une gâchée de béton se déroule généralement à $T_{ref} = 20^\circ C$. Or les exigences de durabilité et les propriétés mécaniques spécifiées pour le cas qui nous occupe n'autorisaient guère de modification de la composition du béton, si bien que l'échauffement de la bordure devait être limité par des conditions adéquates de mise en place du matériau.

La température de référence (T_{ref}) correspond à la valeur moyenne de la température du béton à l'état frais (T_{frais}) et de celle de l'environnement extérieur (T_{ext}). L'un de ces deux paramètres devait donc être abaissé à 10°C pour respecter $T_{ref} = 15^\circ C$. Le contrôle strict de la température du béton pendant la cure (T_{ext}) par un système de refroidissement actif (tubulures [8]) s'avérerait une option onéreuse pour ce projet. En revanche, la réduction de la température du béton frais (T_{frais}) semblait constituer une solution intéressante à un coût modéré. En pratique, on a principalement recours à deux méthodes pour diminuer la température initiale du béton [9]: la première consiste à utiliser à l'état refroidi quelques-uns voire l'ensemble des constituants du béton lors du gâchage; la seconde nécessite un refroidissement du béton suite à sa



Caractéristique

Ciment (-)	CEM1
Classe du ciment (-)	32.5
Dosage en ciment (kg/m ³)	325
Dosage en cendre volante (kg/m ³)	50*
Rapport eau/liant (-)	0,47

* La capacité calorifique de 50 kg de cendre volante équivaut à celle d'environ 25 kg de ciment.

A

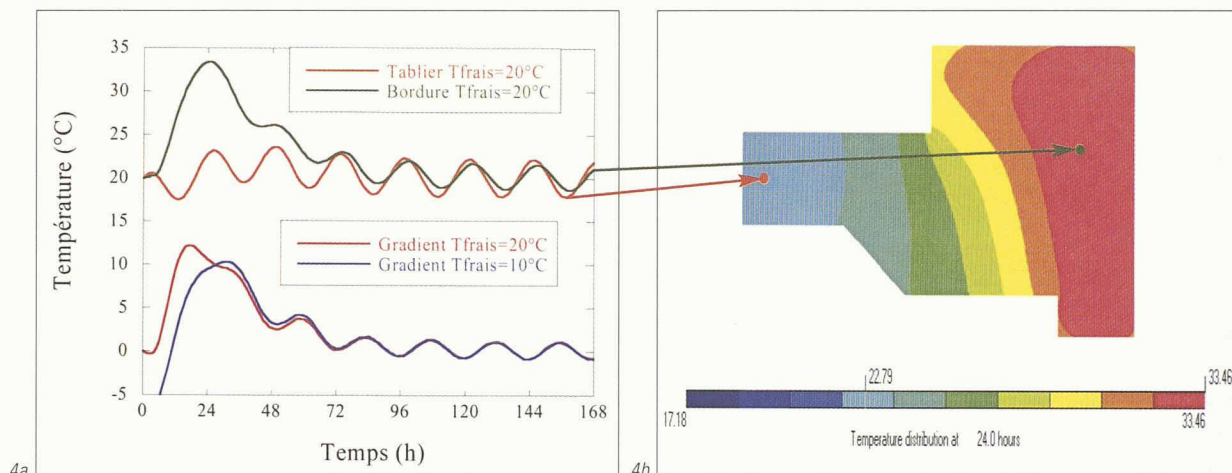
Fig. 4 : Évolution de la température dans le pont ; a) différence maximale de température à $T_{\text{frais}} = 10$ et 20°C ; b) distribution de la température à $T_{\text{frais}} = 20^{\circ}\text{C}$

Fig. 5 : Discrétisation et conditions limites

Fig. 6 : Évolution de la contrainte générée au centre de la bordure

Fig. 7 : Injection de l'azote dans le camion-malaxeur pour le refroidissement du béton

Tableau B : Propriétés des bétons pour les simulations numériques

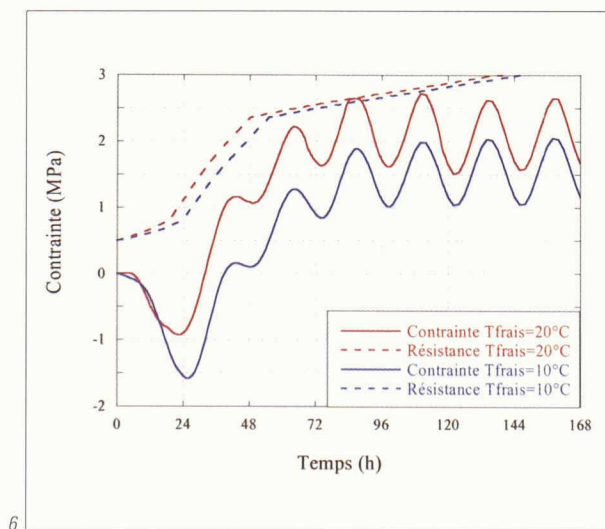
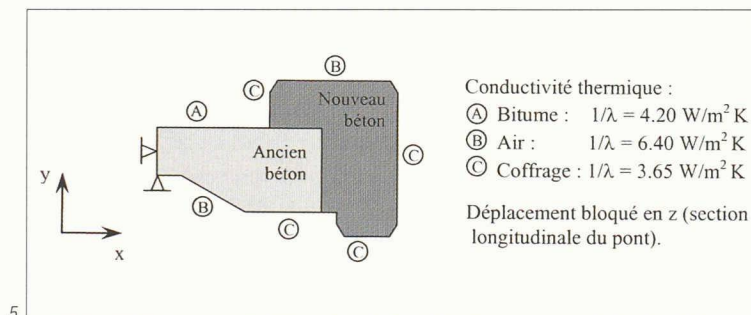


fabrication. Le refroidissement à l'azote, qui relève de la seconde variante, a été retenu pour le projet. De fait, l'efficacité de cette technique avait déjà été démontrée en Suisse, entre autre dans le cadre d'un projet de recherche effectué à l'EPFL [10]. La technique consiste à vaporiser de l'azote directement dans le camion-malaxeur au chantier (fig. 7) ; en refroidissant le béton, l'azote s'évapore dans l'atmosphère sans interagir chimiquement avec le matériau et sans danger pour l'environnement. Lorsque la température désirée est atteinte, le béton est mis en place selon la procédure habituelle. Le coût supplémentaire lié à l'achat d'azote liquide est approximativement de cinq francs par mètre cube de béton à refroidir de 1°C .

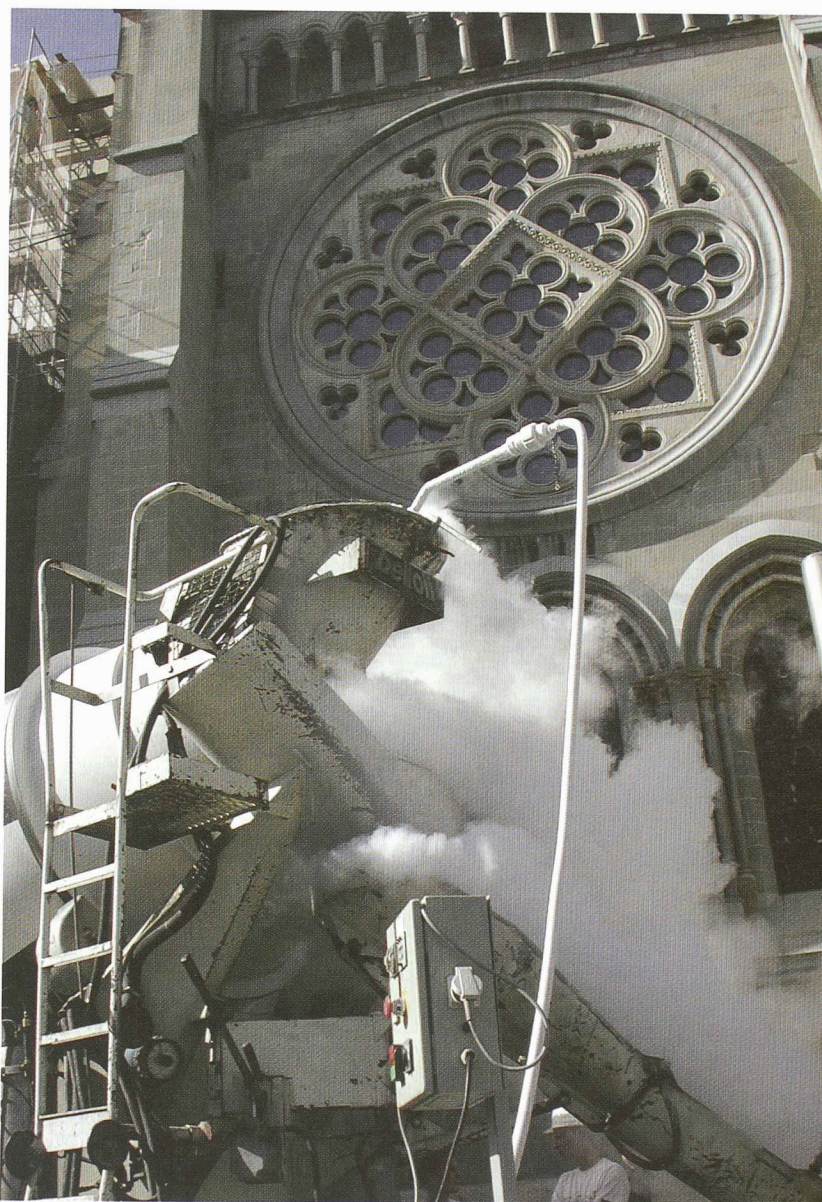
Analyse détaillée

Le logiciel HEAT/MLS [11] a été utilisé pour effectuer une analyse thermo-mécanique des bordures du pont Bessières. Ce programme permet d'estimer la cinétique d'hydratation, l'échauffement et le développement des propriétés mécaniques du béton en fonction de la composition du matériau et des conditions limites qui lui sont imposées (T_{frais} , T_{ext} , coffrages, etc.). La prise en compte du retrait endogène et du comportement viscoélastique permet également de déterminer les contraintes générées dans la structure étudiée.

La figure 5 illustre la discrétisation ainsi que les conditions limites introduites dans le logiciel pour effectuer les simulations. Le tableau B présente quant à lui les propriétés des matériaux pertinentes pour l'analyse ainsi que leur justification. Tenant par ailleurs compte du fait que la gâchée de béton devait avoir lieu en mai 2003, la température extérieure retenue pour les simulations a été de 20°C avec des variations de 6°C pour reproduire le cycle de réchauffement journalier.



La figure 4a présente l'évolution de la température dans la structure au cours du temps selon deux points de référence. Le premier se situe au centre du tablier dans une zone éloignée de la bordure, tandis que le second est localisé au centre de la bordure (fig. 4b). On constate que l'écart de température maximal qui apparaît entre le tablier et la bordure est de 13°C pour $T_{\text{frais}} = 20^\circ\text{C}$, soit un écart légèrement supérieur à la limite admissible de 12°C suggérée dans la recommandation de Bernard et al. [4]. Pour éviter à coup sûr les fissures traversantes, il fallait impérativement réduire cet écart et conserver une marge de manœuvre. En diminuant T_{frais} à 10°C grâce à la technique de refroidissement à l'azote, la différence de température maximale se trouve donc réduite à 10°C (fig. 4a). Cela représente une valeur satisfaisante comme l'indiquent l'évolution de la contrainte au centre dans la bordure ainsi que la résistance à la traction du béton présentées à la figure 6 pour les deux conditions étudiées. On observe en effet que la mise en place du béton à $T_{\text{frais}} = 20^\circ\text{C}$ induirait une contrainte de traction équivalente à la résistance du béton à la 80^e heure. Dans ce cas précis, une fissuration traversante pourrait apparaître puisque la résistance à la traction est atteinte au centre de la bordure, et non pas seulement à sa surface extérieure. Pour $T_{\text{frais}} = 10^\circ\text{C}$, l'intégrité de la bordure serait en revanche préservée, car l'état de contrainte demeure en tout temps inférieur à la résistance à la traction. Compte tenu des hypothèses de calcul, ces résultats montrent que la mise en place du béton à $T_{\text{frais}} = 10^\circ\text{C}$ permettra d'éviter la fissuration traversante du béton.



7

Propriété	Justification	Béton du tablier	Béton des bordures
Capacité thermique (kJ/m³)	Réf. [12]	*	105 000
Energie d'activation (K)	Réf. [12]	*	4 300
Coefficient de dilatation thermique (/°C)	Réf. [3]	10×10^{-6}	12×10^{-6}
Résistance à la traction 28 d (N/mm²)	Réf. [4]	3,0	3,9
Résistance à la compression 28 d (N/mm²)	Réf. [4]	30,0	48,3
Module élastique 28 d (N/mm²)	Réf. [4]	40 000	36 000
Retrait endogène ultime (µm/m)	Réf. [2]	*	200
Comportement viscoélastique	Réf. [4]	Chaînes Maxwell	Chaînes Maxwell

* Propriété n'intervenant pas dans les calculs étant donné l'état d'hydratation du béton du tablier

B

Fig. 8 : Injection de l'azote dans le camion-malaxeur pour le refroidissement du béton
(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs)

En résumé, l'analyse thermo-mécanique réalisée à l'aide du logiciel HEAT/MLS confirme les conclusions obtenues précédemment. Les abaques contenus dans le rapport n° 563 de l'OFROU [4] constituent donc un outil de travail fiable pour l'ingénieur dans les cas où les hypothèses émises dans cette approche simplifiée sont raisonnables.

Vérification de la durabilité du béton

Le bétonnage des bordures du pont Bessières s'est déroulé en deux étapes, soit le 23 mai et le 18 juillet 2003. Selon les arrivages, le béton a été livré sur le chantier à une température variant entre 22 et 28°C. Il a ensuite été refroidi à l'azote à l'intérieur des camions-malaxeurs pendant environ trente minutes jusqu'à une température avoisinant 10°C (fig. 8). L'objectif principal était donc atteint. Le second objectif, soit l'obtention d'une température de 15°C après la mise en place du béton dans les coffrages, a également été respecté. D'ailleurs, l'excellente maniabilité du matériau a permis de réaliser cette phase de travail sans difficulté.

Après le décoffrage des bordures, un relevé de fissuration a été effectué. Une fissure d'une profondeur d'environ 30 mm a été observée au joint de bétonnage des deux gâchées de béton requises pour la fabrication de la bordure sud du pont (côté aval). Cette fissure a été injectée par mesure de précaution. D'autre part, une microfissuration de surface a également été observée sur les deux bordures du pont. La cure de mûrissement inadéquate réservée au béton est à l'origine de cette microfissuration. En effet, la mise en place d'une membrane de protection pour éviter la dessiccation précoce du béton a été effectuée trop tardivement (le len-

demain de la gâchée). De plus, les coffrages ont été ouverts trois jours après le gâchage, soumettant ainsi les parois des bordures trop rapidement au séchage.

La durabilité des bordures a finalement été évaluée par une série de mesures *in situ* de la perméabilité à l'air du béton d'enrobage (méthode Torrent) tel que stipulé à l'article 6.4.2.2 de la norme SIA 262 [5]. Les résultats ont démontré que la perméabilité du béton d'enrobage peut être qualifiée de moyenne à faible selon la classification Torrent [13] ($K_T = 0,2 \times 10^{-16}$ à $0,07 \times 10^{-16}$ m²), répondant ainsi aux exigences spécifiées. Enfin, malgré le refroidissement du béton, celui-ci a atteint une résistance à la compression de 42 N/mm² après vingt-huit jours d'hydratation, soit une résistance supérieure à celle exigée. En résumé, en dépit du constat de fissuration décrit précédemment, l'état des bordures est jugé très satisfaisant, car les exigences de durabilité et de résistance ont été respectées. Cela permet d'entrevoir une excellente durée de vie pour ces éléments.

Conclusion

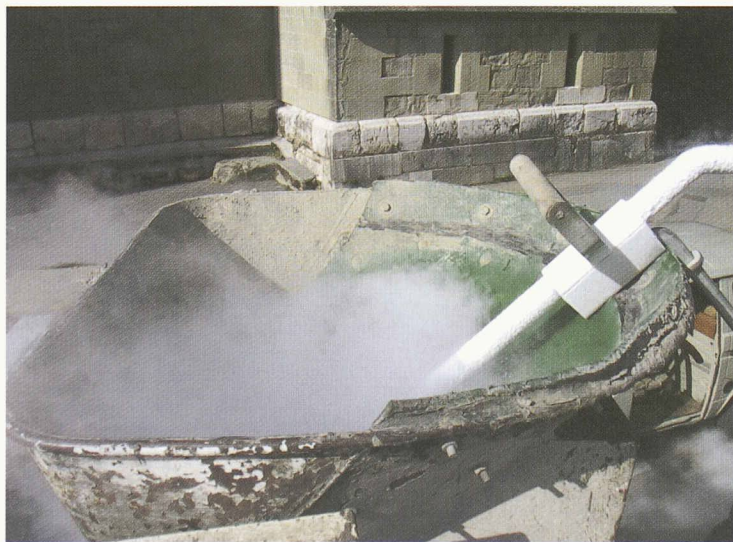
Le dimensionnement proposé pour la réhabilitation des bordures du pont Bessières à Lausanne a été vérifié à l'aide d'une approche simplifiée pour la conception de structures hybrides. La justesse de la recommandation émise à la suite de cette analyse a été confirmée par une étude approfondie effectuée avec un logiciel par éléments finis.

Les différentes analyses du dimensionnement ont démontré l'avantage d'une réduction de la température du béton lors de sa mise en place. Elle permet de diminuer le développement des contraintes de traction dans le béton au jeune âge et de minimiser ainsi la probabilité de fissuration traversante. Par ailleurs, la technique de refroidissement du béton à l'azote s'est avérée simple à réaliser. Enfin, une série de mesures *in situ* a permis de confirmer que la perméabilité à l'air du béton d'enrobage des bordures était satisfaisante.

Pour terminer, relevons que les coûts supplémentaires liés au choix d'une armature très résistante à la corrosion et à l'option de refroidir le béton avant sa mise en œuvre sont pleinement justifiés. En effet, les bordures possèdent actuellement une durabilité équivalente à celle du tablier du pont et, par conséquent, ne représentent plus des éléments d'usure à changer périodiquement sous la peine d'interventions lourdes.

Jean-Philippe Charron, dr ès sc. techn. Université Laval, Canada
Emmanuel Denarié, dr ès sc. techn. EPFL, Suisse
Prof. Eugen Brühwiler, dr ès sc. techn. EPFZ, Suisse

Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages
MCS-ENAC-EPFL, CH - 1015 Lausanne



8

Bibliographie

- [1] P. D. KRAUSS, E. A. ROGALLA: « Transverse cracking in newly constructed bridge decks », National Academy Press, National Cooperative Highway Research Program report 380, Washington, 1996
- [2] J.-P. CHARRON: « Contribution à l'étude du comportement au jeune âge des matériaux cimentaires en conditions de déformations libre et restreinte », Thèse de doctorat de l'Université Laval, Canada, 2003, 320 p.
- [3] Ø. BJØNTEGAARD: « Thermal dilation and autogenous deformation as driving forces to self-induced stresses in high performance concrete », Ph.D. thesis of NTNU, Norway, 1999, 256 p.
- [4] O. BERNARD, E. DENARIÉ, E. BRÜHWILER: « Comportement au jeune âge du béton et limitation de la fissuration traversante des structures hybrides », Office Fédéral des Routes, rapport n°563, Suisse, 2001, 134 p.
- [5] « Norme SIA 262 - Construction en béton », Société suisse des ingénieurs et architectes, 2003
- [6] E. BRÜHWILER, E. DENARIÉ, U. URLAU, S. HASLER, H. PETER: « Betonstahl mit erhöhtem Korrosionswiderstand », *Beton und Stahlbetonbau*, n°97, 2002, pp. 239-249
- [7] V. WALLER: « Relations entre composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression », Thèse de doctorat du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2000, 316 p.
- [8] E. BRÜHWILER, O. BERNARD, S. WOLF: « Beton-Beton Verbundbauteil bei der Verbreiterung eines Brückenüberbaus », *Beton und Stahlbetonbau*, n°95, 2000 pp.158-166
- [9] ACI: « Hot weather concreting », ACI 305 R-91, Detroit, Michigan (1991)
- [10] J.-M. DUCRET: « Étude du comportement réel des ponts mixtes et modélisation pour le dimensionnement », Thèse de doctorat de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, n°1738, 1997
- [11] B. V. FEMMASSE: « Finite element modules for materials science and structural engineering », edited by Femmasse B. V., Netherland, 1997
- [12] A. M. NEVILLE, « Propriétés des bétons », Éditions Eyrolles, Paris, 2000, 806 p.
- [13] R. J. TORRENT: « A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site », *Materials and Structures*, vol. 25, 1992, pp. 358-365

BONAPARTE

Architecte: Oliver Erb.
Réfrigérateur: Bosch.

Plus de détails sur
nos appareils ménagers
chez votre revendeur.
Ou chez Bosch:
Tél.: 0848 888 200
Fax: 0848 888 201
www.bosch-electromenager.ch

La bonne solution

BSH Electroménager SA
7, Avenue des Baumettes
CH-1020 Renens

BOSCH