

# Des structures en béton à haute performance sans fissures ?

**Richard MORIN**

Ville de Montréal (Québec, Canada)

**Gilbert HADDAD**

Terratech (SNC-Lavalin) (Canada)

**Pierre-Claude AÏTCIN**

Université de Sherbrooke (Québec, Canada)

## RÉSUMÉ

Les bétons à haute performance sont des matériaux qui nécessitent une attention spéciale durant leur mise en place et leur mûrissement. Ils ne ressentent pas et sont donc très sensibles au retrait plastique. S'ils ne sont pas mûris correctement, en quelques heures, ils peuvent développer beaucoup de retrait endogène alors qu'ils n'ont qu'une très faible résistance à la traction.

Pour construire des structures en béton à haute performance durables, il faut contrôler le retrait plastique et le retrait endogène dans les heures qui suivent la mise en place du béton. Par contre, il est très important de laisser se développer un retrait endogène résiduel après quelques jours de mûrissement à l'eau, de façon à former des ménisques à l'intérieur de la pâte de ciment hydraté pour diminuer la perméabilité et l'absorptivité du béton et, par voie de conséquence, la pénétration des agents agressifs.

La Ville de Montréal utilise des bétons à haute performance à air entraîné ayant des rapports eau/ciment variant de 0,35 à 0,37, qui ont des résistances caractéristiques à 28 jours de 60 et 50 MPa, pour construire pratiquement tous ses ouvrages d'art, ses parapets et ses trottoirs qui ont à faire face à de sévères conditions d'exposition. Ces structures sont l'objet d'un mûrissement à l'eau détaillé dans un devis type.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

## ABSTRACT

### CRACK-FREE HIGH-PERFORMANCE CONCRETE?

*High-performance concretes necessitate special care during both placing and curing; they do not bleed and are thus highly sensitive to plastic shrinkage. Should this material not be cured properly (within a few hours), it may develop considerable autogenous shrinkage while its tensile strength remains very low.*

*Building durable structures using high-performance concrete requires limiting plastic shrinkage as well as autogenous shrinkage over the first several hours following the placing of the concrete. Nonetheless, it is critical to allow for a residual autogenous shrinkage to take place after a few days of water curing, such that menisci form inside the hydrated cement paste in order to reduce permeability, absorptivity and consequently the penetration of aggressive agents.*

*The City of Montreal uses high-performance air-entrained concretes, with water/cement ratios varying between 0.35 and 0.37 and a corresponding 28-day characteristic strength of 60 and 50 MPa, in the construction of nearly all its civil engineering works, protective barriers and sidewalks, which are exposed to rather harsh environmental conditions. These structures have been used to generate a standard set of detailed specifications applicable to water curing.*

FIELD: Structural engineering.

## Introduction

Plusieurs présentations et articles récents tendent à propager l'idée qu'il est impossible de construire des structures en béton à haute performance pratiquement exemptes de fissures. En fait, il est vrai que, de par le monde, de nombreuses structures en béton à haute performance (BHP) récemment construites présentent de nombreuses fissures qui ne sont pas de nature structurale. Mais il faut aussi mentionner que, depuis que la Ville de Montréal a imposé aux concepteurs et entrepreneurs de se conformer à son devis sur les bétons à haute performance, qui précise notamment de façon détaillée comment concevoir, mettre en place et mûrir les structures en BHP, les structures construites à Montréal sont pratiquement exemptes de toutes fissures.

Les BHP que la Ville de Montréal spécifie pour construire ses structures sont des BHP à **air entraîné** (5 à 8 %) fabriqués avec un ciment composé à la fumée de silice (7 à 8 %) ayant un rapport E/C de 0,35 ou 0,37. Ces bétons à air entraîné ont des résistances caractéristiques de 50 à 60 MPa à 28 jours.

D'un point de vue durabilité, il n'est pas nécessaire d'insister longuement sur les avantages d'un BHP non fissuré par rapport à un béton usuel (fissuré) à un moment où les donneurs d'ouvrage sont très soucieux d'augmenter la durée de vie de leur parc d'infrastructures.

En outre, dans tous les cas où des travaux de réparation ou de reconstruction pourraient avoir une grande incidence sur les coûts sociaux, la Ville de Montréal a développé une stratégie défensive à trois niveaux :

- ① première défense : utilisation d'un BHP exempt de toute fissure,
- ② deuxième défense : utilisation d'armatures galvanisées avec des cellules sacrificielles,
- ③ troisième défense : utilisation systématique d'un inhibiteur de corrosion dans tous ses BHP.

Dans les cas où les coûts sociaux prévisibles sont moins importants, selon les cas, un seul des deux derniers niveaux de défense est retenu.

Dans le cas des dalles de pont et de viaduc, un quatrième niveau de protection est assuré par la pose à chaud d'une membrane d'étanchéité.

On pourrait penser qu'un tel niveau de protection contre la corrosion est très conservateur, mais il suffit de se promener pendant une heure en voiture sur les autoroutes du centre-ville de Montréal pour s'apercevoir que ces précautions sont tout à fait justifiées.

La seule façon d'augmenter la durabilité d'une structure en béton est de commencer à la construire avec un béton imperméable non fissuré, c'est-à-dire avec un béton ayant un faible rapport eau/liant (E/L). À l'heure actuelle, compte tenu des progrès réalisés dans le domaine des BHP, des rapports E/L compris entre 0,35 et 0,37 représentent un bon compromis entre la durabilité et une mise en place et un mûrissement faciles à réaliser en chantier.

Les colonnes et piliers sont construits en BHP à air entraîné ayant un rapport E/L de 0,33 à 0,35 (60 MPa) parce que l'on n'a pas à se préoccuper du retrait plastique.

Les tabliers de pont sont construits avec des BHP à air entraîné ayant un rapport E/C de 0,37 parce qu'il est essentiel de contrôler le retrait plastique et le retrait endogène. De tels bétons, légèrement moins compacts que les précédents, permettent à de l'eau extérieure au système de pénétrer assez facilement et pendant plus longtemps à la surface du béton, de façon à renforcer la compacité de la peau du béton qui sera par la suite exposée au retrait de séchage et aux intempéries.

L'affaissement de ces bétons au moment de leur arrivée sur le chantier est de  $180 \pm 40$  mm. Dans le cas des trottoirs, l'affaissement est réduit de 80 à 100 mm pour pouvoir y « sculpter » les entrées charretières.

Ces bétons sont suffisamment robustes pour pouvoir être mis en place de façon sécuritaire (d'un point de vue durabilité) par les entrepreneurs généraux. L'utilisation d'un rapport E/L plus faible est toujours possible, mais elle exige une plus grande attention au moment de la mise en place et du mûrissement.

## L'hydratation du ciment Portland

L'hydratation du ciment Portland se produit à l'intérieur du triangle Résistance-Chaleur-Contraction volumique, comme on peut le voir sur la figure 1 [1]. Ce sont avec les conséquences de ce triangle, représentées sur la figure 2, que les ingénieurs doivent composer.

En se fondant sur les travaux de Powers [2], Jensen et Hansen [3] ont récemment proposé la représentation graphique schématique de la réaction d'hydratation de la figure 3 (une telle présentation avait été suggérée par Acker [4]). Cette représentation montre clairement que le ciment Portland ne peut s'hydrater complètement dans un **système fermé**, c'est-à-dire dans un système sans échange d'eau avec l'extérieur, que si le rapport E/C est supérieur à 0,42. Dans un tel système, qui contient plus d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, on voit cependant apparaître une certaine porosité remplie de gaz.

En outre, en continuant à se fonder sur les travaux de Powers [2], Jensen et Hansen [3] ont démontré qu'en présence d'une source extérieure d'eau durant toute l'hydratation du ciment Portland il serait possible d'obtenir une pâte de ciment hydratée ne présentant aucune porosité à condition que son rapport E/C soit inférieur à 0,36 comme on peut le voir sur la figure 4.

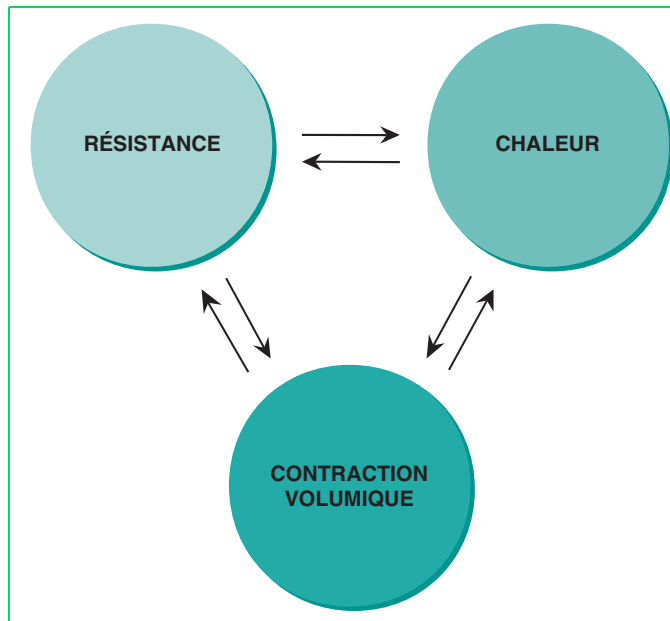


Fig. 1 - Le triangle d'hydratation du béton.

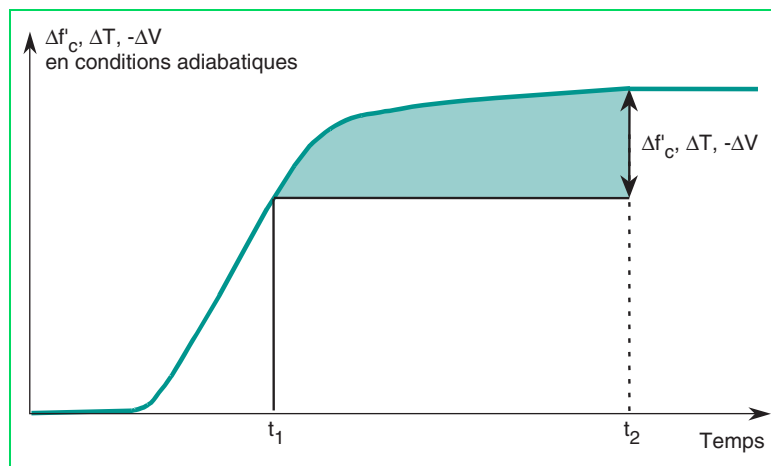


Fig. 2 - Les conséquences de l'hydratation du ciment.

$f_c$  : résistance en compression.  
 $\Delta T$  : augmentation de la température.  
 $\Delta V$  : variation du volume absolu.

Notons cependant que d'un point de vue durabilité, il serait dangereux que la réaction d'hydratation se termine dans un béton entièrement saturé parce qu'alors, suite au développement de pressions osmotiques, des ions agressifs extérieurs pourraient facilement envahir le béton.

## Différences entre la mise en place et le mûrissement des BHP et des bétons ordinaires

### Ressuage

Les BHP ne ressuient pas ou très peu ; ils peuvent donc être très sensibles au retrait plastique. En effet, les BHP sont fabriqués en diminuant la quantité d'eau de malaxage plutôt qu'en augmentant le dosage en ciment [5]. Si la mise en place du béton se fait par temps sec et venteux, il faut absolu-

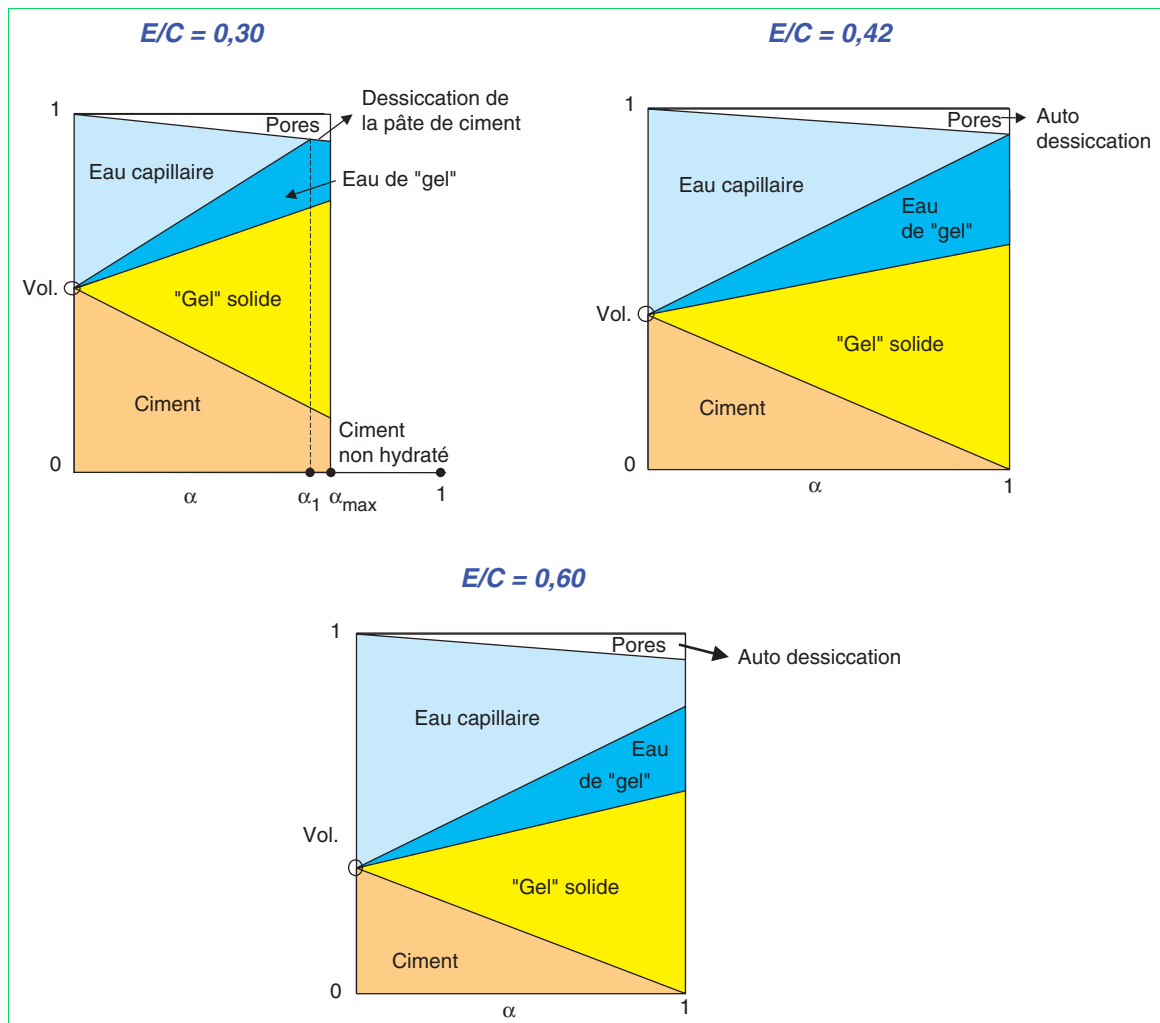


Fig. 3 - Représentation schématique de la réaction d'hydratation de Jensen et Hansen [3] dans un système fermé.

ment protéger la surface du béton en la maintenant continuellement humide, en utilisant des brumisateur comme ceux que l'on utilise dans les serres et pépinières. On peut aussi utiliser des retardateurs d'évaporation sur de petites surfaces ou sur des travaux de peu d'envergure : les retardateurs d'évaporation sont en général des alcools aliphatiques qui recouvrent la surface du béton d'un film monomoléculaire qui empêche, ou tout au moins réduit fortement, toute évaporation de l'eau du béton (les alcools aliphatiques sont déjà utilisés pour réduire l'évaporation de l'eau des piscines domestiques).

Il ne faut surtout pas utiliser des produits de cure pour contrer le retrait plastique du BHP, parce qu'ils empêcheraient plus tard la pénétration de l'eau de mûrissement dans le béton lorsqu'il s'agira de contrôler le retrait endogène.

## Retrait endogène

Tout béton qui n'est pas mûri à l'eau développe un certain retrait endogène. Le retrait endogène est une conséquence de la contraction chimique développée durant l'hydratation du ciment Portland. Le volume absolu des hydrates qui se forment est inférieur à la somme absolue du volume du ciment et de l'eau qui se sont combinés. En l'absence de toute source d'eau extérieure durant l'hydratation du ciment, on voit apparaître une très fine porosité (cf. fig. 3) puisque cette contraction volumique est gênée par la structuration de la pâte qui durcit et la présence du squelette granulaire. Cette très fine porosité draine une partie de l'eau contenue dans les plus gros capillaires. Le béton paraît se dessécher mais sans perdre de masse ; l'eau, simplement, se déplace des plus gros capillaires vers la très fine porosité créée par l'hydratation du ciment Portland.

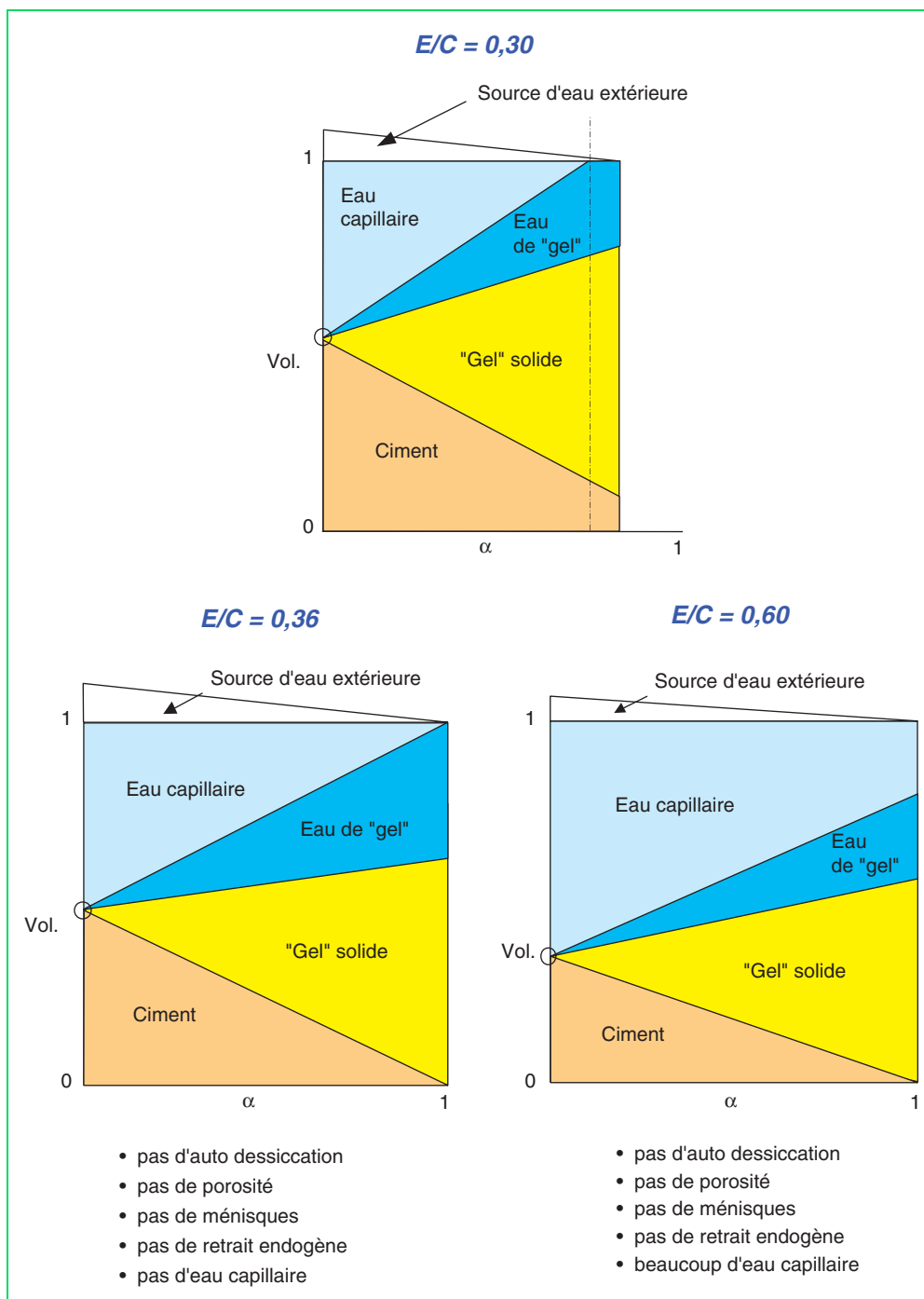


Fig. 4 - Hydratation en présence d'une source d'eau extérieure.

Cet assèchement interne entraîne la formation de ménisques qui créent des forces de traction au sein du béton, ce qui entraîne le développement d'un certain retrait : le retrait endogène. Les bétons qui ont un rapport E/C supérieur à 0,42 développent un retrait endogène très faible. Comme ces bétons ne contiennent pas beaucoup de ciment, ils ne développent pas une forte contraction volumique et comme ils contiennent une grande quantité d'eau dans leurs gros capillaires, leur dessèchement interne (autodessiccation) ne crée des ménisques que dans des gros capillaires. Étant donné que les forces de traction créées dans ces gros capillaires sont faibles, le retrait endogène est négligeable. Plus le rapport E/C est élevé, plus le retrait endogène est faible, mais aussi plus la durabilité du béton est faible.

Ceci n'est pas le cas des bétons qui ont un très faible rapport E/C qui contiennent beaucoup plus de ciment et beaucoup moins d'eau de gâchage. Dès que le ciment commence à s'hydrater, les capillaires fins que l'on retrouve dans le béton commencent très vite à se dessécher en créant des contraintes de traction élevées au sein du béton. Ces contraintes de traction se développent à un moment où la résistance à la traction de la pâte de ciment hydraté est faible. Cependant, la présence d'une

source d'eau extérieure permet aux capillaires de se saturer au même rythme qu'ils se dessèchent, si bien qu'il ne se forme plus de ménisques au sein du béton ; comme il n'y a plus de ménisques, il n'y a pas de contraintes de traction, pas de retrait endogène et pas de fissuration (cf. fig. 4).

Comme l'ont montré Jensen et Hansen [3], **théoriquement**, une pâte de ciment qui a un rapport E/C égal à 0,36 qui s'hydrate en présence d'une source d'eau extérieure ne développe pas de retrait endogène et, une fois que tous les grains de ciment se sont hydratés, elle ne présente aucune porosité. Au-dessous de cette valeur du rapport E/C, il devient impossible d'hydrater tous les grains de ciment, même en présence d'une source d'eau extérieure. Cependant, dans de tels bétons, un certain retrait endogène pourra se développer car la pâte de ciment devient tellement imperméable que, par endroits, la source d'eau extérieure ne reste plus connectée avec la pâte de ciment qui s'hydrate. Plus le rapport E/C est faible, plus ce retrait endogène est élevé. Tazawa et Miyazawa [6] ont trouvé que des pâtes de ciment ayant un rapport E/C égal à 0,30 peuvent développer, dès les premiers jours qui suivent leur fabrication, un retrait endogène égal au retrait de séchage.

### Les agents réducteurs de retrait

Les compagnies d'adjuvants ont mis sur le marché des adjuvants spéciaux qui réduisent à la fois le retrait endogène et le retrait de séchage, parce que ces deux phénomènes ont la même cause : le développement de ménisques au sein du béton. Ces adjuvants n'empêchent pas la formation de ménisques, mais ils diminuent plutôt la tension de surface du liquide interstitiel et/ou diminuent aussi l'angle de contact de ces ménisques [7].

Au Québec, on utilise assez peu de tels adjuvants car ils déstabilisent les réseaux de bulles d'air. Il est en effet physiquement impossible d'entraîner un réseau de très petites bulles d'air, ayant un facteur d'espacement adéquat pour protéger le béton contre les effets des cycles de gel et dégel, en utilisant de tels adjuvants.

### Autres moyens de contrôler le développement du retrait endogène

Weber et Reinhardt [8] ont suggéré l'utilisation de granulats légers saturés et, récemment, Jensen et Hansen [3] ont suggéré l'utilisation de polymères superabsorbants (comme ceux que l'on retrouve dans les couches pour bébé) comme source d'eau interne. Les granulats légers saturés ont été abondamment utilisés lors de la construction de plates-formes de forage en béton pour augmenter leur flottabilité.

## Quand faut-il commencer à mûrir un BHP pour limiter le développement du retrait plastique et endogène ?

Comme nous l'avons dit précédemment, on peut utiliser des brumisateurs ou un retardateur d'évaporation dès que la surface du béton a été finie pour éviter de voir se développer du retrait plastique. Étant donné que le développement du retrait endogène est lié à l'hydratation du ciment, le mûrissement à l'eau doit commencer **au plus tard** à la fin de la période dormante. Étant donné que la réaction d'hydratation génère une certaine quantité de chaleur, on peut utiliser des thermocouples ou des maturimètres pour déterminer quand doit commencer le mûrissement à l'eau mais, comme on peut le voir sur la figure 5, la chaleur se développe lentement en début d'hydratation puisque la précipitation de la portlandite est une réaction endothermique. Il nous paraît plus approprié d'utiliser plutôt des conductimètres comme on peut le voir sur la figure 5. En effet, la conductivité de la solution interstitielle diminue après la précipitation de la portlandite et après la formation des premiers ponts de C-S-H entre les particules de ciment (seuil de structuration ou de percolation) [9].

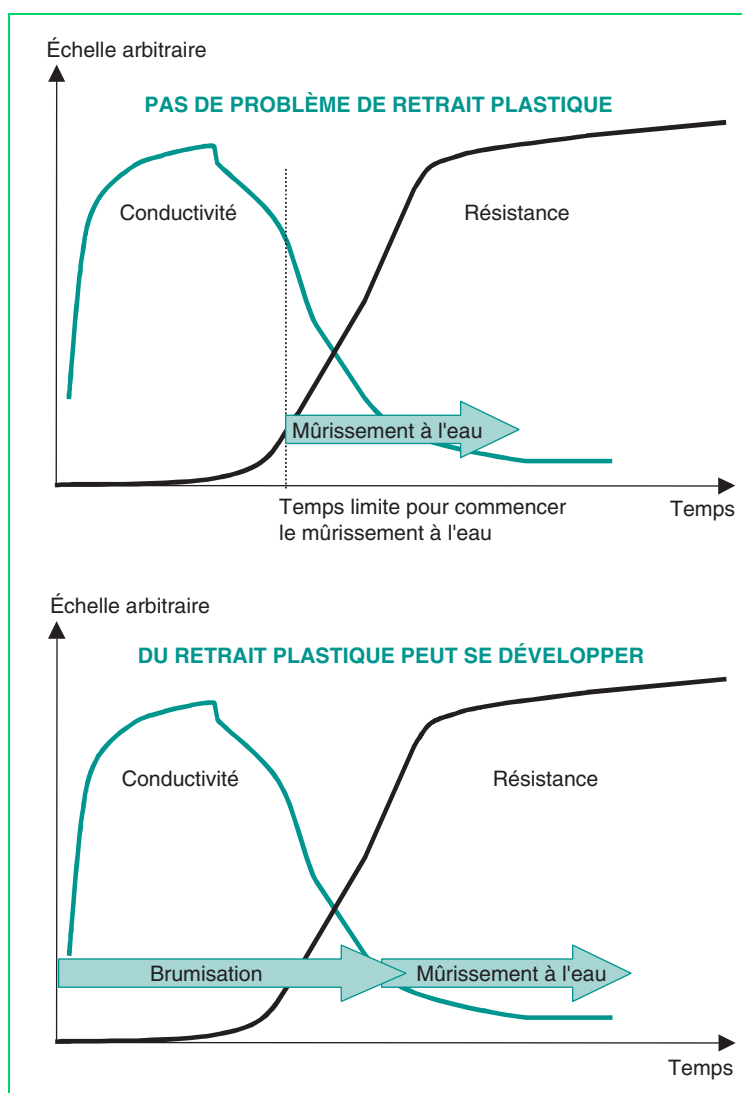


Fig. 5 – Quand commencer le mûrissement à l'eau ?

## Comment s'assurer de construction des structures en béton pratiquement exemptes de fissures ?

Construire une structure exempte de fissures, c'est gagner la course de relais contre la fissuration. Dans cette course de relais, les coureurs successifs sont le concepteur, le spécialiste en matériaux, l'entrepreneur et le spécificateur.

Les matériaux doivent être sélectionnés et proportionnés de façon à obtenir un béton qui présente des changements volumiques réduits, une maniabilité adéquate durant tout le temps nécessaire à sa mise en place, une durabilité adéquate (facteur d'espacement) et la résistance en compression voulue.

Les méthodes de construction doivent assurer que le béton est mis correctement en place avec une consistance adéquate et qu'il est bien compacté de façon à ce qu'il développe la résistance à la traction la plus grande possible le plus vite possible.

Les méthodes de mûrissement doivent assurer qu'à aucun moment de l'eau puisse s'échapper des capillaires de surface du béton en maintenant la surface du béton continuellement humide. Le mûrissement à l'eau doit être maintenu jusqu'à ce que le béton développe une résistance à la traction suffisamment élevée pour résister aux forces de traction générées par le retrait endogène.



Les colonnes et les piliers sont en général des éléments structuraux plutôt massifs qui ont un faible rapport surface/volume, spécialement quand ils sont cylindriques. La température du béton qui y est coulé augmente rapidement, atteint un pic puis se met à diminuer plus lentement. De nombreux facteurs influencent l'intensité du pic et la rapidité avec laquelle il est atteint, l'un des principaux facteurs étant la valeur du rapport surface/volume, qui dans le cas des colonnes et piliers cylindriques est inversement proportionnel au diamètre de la colonne,  $D$ . Plus  $D$  est grand, plus le pic de température est élevé.

Comme les bétons à haute performance sont fabriqués en utilisant une quantité d'eau de gâchage limitée et que l'utilisation d'un superplastifiant a tendance à retarder et abaisser le pic de température, la valeur maximale de la température atteinte par un BHP dans une colonne ou un pilier n'est pas plus élevée que celle qui est atteinte quand on utilise un béton structural courant [10].

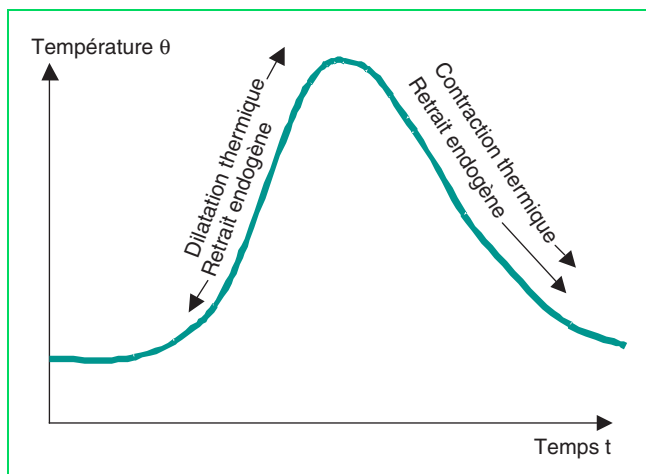


Fig. 6 – Retrait endogène et changements volumiques d'origine thermique.

Durant sa montée en température, le BHP connaît une expansion thermique proportionnelle à son augmentation de température, tandis que simultanément le retrait endogène tend à réduire la valeur absolue de cette expansion, comme on peut le voir sur la figure 6. Par contre, dès que la température du béton se met à décroître parce que les pertes de chaleur à travers les coffrages sont supérieures à l'apport de chaleur dû à la réaction d'hydratation, le retrait endogène s'ajoute à la contraction thermique, c'est pourquoi il est très important d'essayer de diminuer et de retarder le plus possible la température maximale atteinte par le béton, comme on peut le voir sur la figure 7.

Il faut aussi retarder le décoffrage du

béton de façon à ne pas rajouter un choc thermique à la contraction thermique et au retrait endogène, ce qui pourrait endommager à tout jamais la peau du béton.

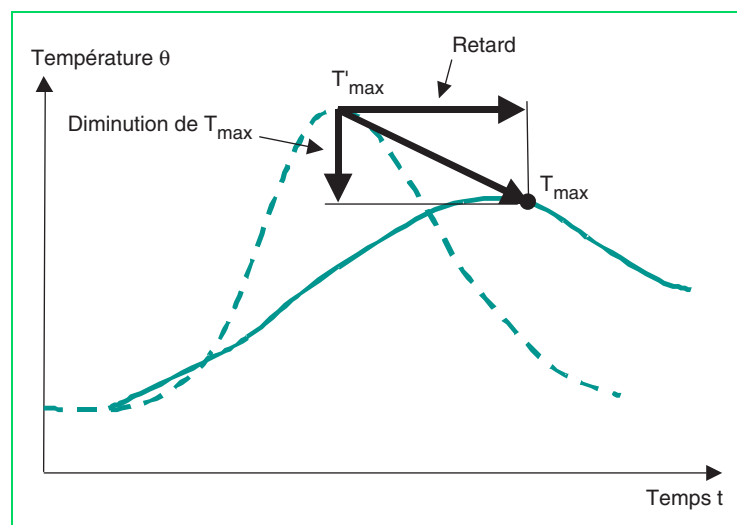


Fig. 7 – Comment diminuer et retarder le pic de température dans les colonnes et les piliers.

On peut diminuer la température maximale atteinte par le béton en abaissant sa température initiale par l'utilisation de glace ou même d'azote liquide ou par l'emploi d'un ciment composé à faible chaleur d'hydratation. On peut retarder le pic de température en utilisant un assez fort dosage en superplastifiant de façon à diminuer le plus possible la quantité d'eau de gâchage et de ciment, ou en employant un retardateur.



## Mise en application du contrôle du retrait endogène sur un chantier

De façon à illustrer les concepts qui viennent d'être développés, nous allons montrer comment ils ont été appliqués dans le cas de la reconstruction de vingt-sept viaducs et de 7,9 km de hauts de mur et parapets sur l'autoroute Décarie au centre de Montréal.

L'autoroute Décarie qui a été construite dans les années 1960 assure le passage de 150 000 véhicules par jour. Après trente-cinq ans de service dans un environnement très sévère et suite à l'utilisation de grandes quantités de sels de déverglaçage, il a fallu démolir tous les viaducs et tous les parapets supérieurs qui étaient sévèrement endommagés par la corrosion.

Les tabliers de pont et les trottoirs ont été reconstruits en utilisant un BHP à air entraîné ayant un rapport E/C de 0,37, formulé avec un ciment composé à la fumée de silice contenant 7 à 8 % de fumée de silice.

L'affaissement de tous les bétons était de  $180 \pm 40$  mm au moment de leur livraison, sauf dans le cas des bétons de trottoirs où il n'était que de 80 à 100 mm. La teneur en air des BHP au moment de leur livraison devait être comprise entre 5 et 8 %, une valeur garantissant l'obtention d'un facteur d'espacement conforme à la norme CSA en vigueur ( $\bar{L}$  moyen inférieur à 230  $\mu\text{m}$  sans aucune valeur individuelle supérieure à 260  $\mu\text{m}$ ).

## Coûts reliés à la mise en œuvre du mûrissement à l'eau

Étant donné que le programme de reconstruction qui s'est étendu sur trois ans incluait aussi des réparations par béton projeté le long des parois verticales de l'autoroute tout au long des 7,9 km, et qu'il était impossible de compter sur les bornes à incendie comme source d'approvisionnement en eau, il a été décidé d'installer une canalisation d'eau temporaire en plastique de 100 mm de diamètre à côté de l'autoroute où avaient lieu les travaux, et de se brancher directement sur cette canalisation pour mûrir les BHP. À la fin du projet, cette conduite d'eau a été démantelée.

L'installation de cette canalisation d'eau temporaire a coûté 70 000 \$, si bien qu'en tenant compte de tous les autres détails liés à la mise en œuvre du mûrissement à l'eau, on peut estimer que le coût du mûrissement à l'eau ne représente que 1,5 % du coût total des travaux effectués.

Dans le cas de travaux plus limités dans le temps et dans l'espace, on peut utiliser les bornes à incendie. Si elles sont situées à côté des réparations, le coût du mûrissement à l'eau peut être alors assez faible : 0,1 % du coût total des travaux ou 0,5 % s'il faut que la conduite d'eau temporaire traverse une rue. Ces coûts peuvent évidemment varier selon l'importance des travaux.

Dans tous les cas, le coût relatif du mûrissement à l'eau demeure modeste compte tenu de la durabilité accrue que l'on peut espérer.

En 2000, durant la première année des travaux de reconstruction, une inspection rigoureuse des 3,6 km de hauts de mur n'a permis de déceler que la présence de douze fissures de 0,1 mm. Ces douze fissures ont été associées à un sciage trop tardif des plots de hauts de mur. En 2001, seules sept fissures ont été détectées sur les 3,95 km de parapets reconstruits. Les dix tabliers de pont reconstruits en 2001 n'ont présenté aucune fissure avant d'être recouverts de leur membrane d'étanchéité.

## Conclusion

Il est possible de construire des structures en BHP non fissurées en mettant en œuvre une politique intégrée d'utilisation du BHP visant à éliminer les causes principales de fissuration des BHP. Cette course contre la fissuration peut être gagnée si la conception, les matériaux, les méthodes de construction et de mûrissement sont orientés vers cette lutte contre la fissuration dont on connaît maintenant parfaitement bien les causes.

La science du béton indique très clairement que le moment critique pour lutter contre la fissuration se situe juste après la mise en place du béton (retrait plastique), au tout début du développement de la réaction d'hydratation (retrait endogène) dans le cas des BHP. Il faut apprendre à traduire, dans les devis, cette lutte contre la fissuration en moyens simples et précis pour les entrepreneurs, afin

qu'un transfert de connaissances permette à ces derniers de construire des structures en BHP durables qui ne seront pas à reconstruire prématurément par la prochaine génération d'ingénieurs. C'est une contribution significative des ingénieurs civils au développement durable. Avec les sommes d'argent ainsi libérées, la prochaine génération d'ingénieurs civils pourra améliorer la qualité de la vie de nos enfants et petits enfants plutôt que de dépenser cet argent à reconstruire des structures qui auraient été mal construites.

---

**Remerciements.** Les auteurs tiennent à remercier le ministère des Transports du Québec pour sa coopération active dans la réalisation de ce projet, en particulier Daniel Vézina et Guy Richard, et Jean Sauriol ainsi que Paul Laberge, Yves Martin et Michel Thibault de la Ville de Montréal. La collaboration active d'Yves Geoffroy et de Jacques Beaulieu du Laboratoire de béton a été aussi très appréciée lors du déroulement des travaux de reconstruction entrepris sur l'autoroute Décarie. Le développement de cette philosophie du contrôle du retrait endogène a été rendu possible grâce au soutien du Conseil de la recherche en sciences naturelles et en génie du Canada à travers les soutiens financiers qu'il a accordés à la chaire industrielle sur le béton du professeur Pierre-Claude Aïtcin, au Réseau de centres d'excellence sur le BHP (Béton Canada) et aux différents chercheurs du CRIB (Centre de recherche interuniversitaire sur le béton) qui regroupe les chercheurs de l'université de Sherbrooke et de l'université Laval. Beaucoup de ces programmes de recherche ont été financés par plusieurs partenaires industriels qu'il serait trop long d'énumérer ici.

---

**Note.** La dernière version de la spécification sur les bétons à haute performance de la Ville de Montréal se retrouve sur le site web du Groupe de recherche sur le béton de l'université de Sherbrooke ([www.usherb.ca/CENTRES/crib/](http://www.usherb.ca/CENTRES/crib/)).

---

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] AÏTCIN P.-C., NEVILLE A., ACKER P., Les différents types de retrait du béton, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **215**, mai-juin **1998**, pp. 41-51.
- [2] POWERS T.C., *The properties of fresh concrete*, John Wiley and Sons Inc., N.Y., **1968**, 664 pages.
- [3] JENSEN O.M., HANSEN P.F. (2001), Water-entrained cement-based materials, Part I, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, **4**, **2001**, pp. 647-654.
- [4] ACKER P., Communication personnelle.
- [5] AÏTCIN P.-C., *Béton à haute performance*, Eyrolles, ISBN 2-212-01323-X, 683 pages.
- [6] TAZAWA E.I., MIYAZAWA S., Autogenous shrinkage of concrete and its importance in concrete technology, *Creep and Shrinkage of Concrete*, E and FN Spon, Londres, **1993**, pp. 159-168.
- [7] SHAH S.P., WEISS J., YANG. W., Shrinkage cracking – Can it be prevented ?, *Concrete International*, Vol. 20, **4**, **1998**, pp. 51-55.
- [8] WEBER S., REINHARDT H.W., A new generation of high-performance concrete : Concrete with autogenous curing, *Advanced Cement-Based Materials*, Vol. 6, **2**, **1997**, pp. 59-68.
- [9] ROUSSEL S., Communication personnelle.
- [10] COOK W.D., MIAO B., AÏTCIN P.-C., MITCHELL D., Thermal stresses in large high-strength concrete columns, *ACI Journal of Materials*, Vol. 89, **1**, **1992**, pp. 61-68.