

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Tenue au feu des éléments de structure en béton haute résistance Kodur, V. K. R.

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

Publisher's version / Version de l'éditeur:

<https://doi.org/10.4224/40002912>

Solution constructive; no. 31, 1999-12-01

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=5fa7b770-024c-42ce-b9bf-5f6b817f1f1d>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=5fa7b770-024c-42ce-b9bf-5f6b817f1f1d>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at

PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.

Tenue au feu des éléments de structure en béton haute résistance

par **V.K.R. Kodur**

L'utilisation croissante du béton haute résistance dans les bâtiments et autres ouvrages suscite des interrogations concernant sa tenue au feu, en particulier en raison du danger d'effritement (ou éclatement). Cet article expose les résultats des recherches menées à ce sujet, comparant la résistance au feu des poteaux en béton haute résistance et celle des poteaux à résistance normale, et il indique les règles à suivre pour accroître la résistance au feu des éléments de structure en béton haute résistance.



Figure 1. Vue a) d'un poteau en béton à résistance normale et b) d'un poteau en béton haute résistance après des essais de tenue au feu

Le béton haute résistance (BHR), qui a une grande durabilité, assure un niveau élevé de performance structurale, par rapport au béton à résistance normale (BRN) utilisé traditionnellement.

Auparavant employé pour les ponts, les constructions en mer et les infrastructures, il est de plus en plus utilisé dans les immeubles de grande hauteur, en particulier pour les poteaux. Sa plus grande résistance à la compression permet de réaliser des poteaux de diamètre réduit, ce qui diminue l'encombrement.

Il importe grandement de veiller, dès la conception d'un bâtiment, à ce que les pièces de charpente résistent bien au feu. La tenue au feu d'un élément de structure dépend de sa géométrie, des matériaux constitutifs, de l'importance de la charge, et des caractéristiques du feu lui-même. La récente version de la norme de la CSA-A23.3-M94, qui porte sur la conception des structures de béton, renferme des dispositions détaillées concernant la conception des pièces de charpente en BHR. Cependant, on ne trouve pas dans cette norme ni dans le Code national du bâtiment (CNB) 1995 de lignes directrices précises pour l'évaluation de la tenue au feu du BHR.

Le problème de l'éclatement
Habituellement, les éléments de structure en béton se comportent bien dans des

situations d'incendie. Cependant, des études montrent que le BHR présente généralement une tenue différente de celle du BRN et que sa résistance au feu peut laisser à désirer.

L'un des grands risques que pose le BHR est l'effritement sous l'effet du feu, lequel est dû à son faible rapport eau-ciment¹. L'éclatement du béton a été observé en laboratoire et dans des conditions d'incendie réel (voir figure 1). Ainsi, un incendie survenu dans le tunnel sous la Manche, en 1996, a gravement endommagé les anneaux en raison de l'effritement du béton, a fait huit blessés et causé des dégâts matériels de 50 millions £². L'effritement a été attribué à la grande résistance du béton.

Lors d'un incendie, l'éclatement provoque la désintégration rapide des couches superficielles du béton. Il expose le noyau du béton aux températures d'incendie, augmentant ainsi la vitesse de transmission de la chaleur au noyau et à l'armature. Comme l'effritement se produit au début de l'incendie, il peut poser un risque au niveau de l'évacuation des occupants et pour les pompiers.

L'éclatement est attribué à la montée de la pression interstitielle lors de l'échauffement. On croit que le BHR est plus sensible à la montée de la pression en raison de sa faible perméabilité, par rapport au BRN^{3,4}. La très forte pression de vapeur d'eau produite lors de l'exposition au feu ne peut s'échapper à cause de la grande masse volumique (et de la faible perméabilité) du BHR. Elle atteint souvent le degré de pression de vapeur

saturante, qui est d'environ 8 MPa à 300 °C. Cette pression interne est souvent trop forte pour le BHR, dont la résistance à la traction est d'environ 5 MPa.

Tenue au feu du BHR et du BRN
L'Institut de recherche en construction (IRC) du CNRC mène actuellement des recherches en vue d'évaluer la tenue au feu du BHR, et de mettre au point des solutions qui permettront de réduire le plus possible l'effritement et d'accroître la résistance au feu.

L'IRC procède actuellement à des études expérimentales et numériques afin de définir des règles de conception d'éléments de structure résistant au feu, lesquelles seront intégrées aux codes et normes. Sur le plan de l'expérimentation, 20 poteaux en BHR vraie grandeur supportant une charge et un certain nombre de blocs en BHR sont exposés au feu dans un four construit à cette fin, le but étant d'étudier l'influence de différents paramètres sur la tenue au feu de ce type de béton. Les travaux sont accomplis en collaboration avec la Portland Cement Association, l'Association canadienne du ciment Portland, Béton Canada, CANMET, MOBIL et la National Chiao Tung University de Taïwan.

Les figures 2 et 3 font voir les résultats typiques d'un essai de résistance au feu réalisé par l'IRC sur deux types de poteaux en BRN et en BHR semblables et supportant des charges comparables^{3,4}.

La figure 2 montre que les températures, relevées à différentes profondeurs par rapport à la surface, à mi-hauteur du poteau, sont généralement plus basses dans le cas du poteau en BHR que dans celui du poteau en BRN, tout au long de l'exposition au feu. Ce fait est attribuable en partie à la différence qui existe au niveau des caractéristiques thermiques des deux bétons, ainsi qu'à la plus grande compacité (porosité plus faible) du BHR. La plus faible porosité de ce dernier retarde la montée en température jusqu'à ce que les fissures s'élargissent et que l'éclatement se produise. De grosses fissures sont apparues dans le poteau de BHR après environ trois heures d'exposition au feu.

La figure 3 montre que la déformation du poteau en BHR est beaucoup moins importante que celle du poteau en BRN. Cela est imputable en partie à la plus faible dilatation thermique du BHR et à la plus lente montée en température du poteau en BHR, au début de l'exposition au feu, en raison de la compacité de ce type de béton.

Au fur et à mesure que la température s'élève, l'armature d'acier des poteaux en BHR et en BRN cède peu à peu et les poteaux se contractent. Le béton prend alors la relève et supporte une part de plus en plus grande de la charge. La résistance du béton diminue aussi avec le temps et, à terme, lorsque le poteau ne peut plus supporter la charge, il cède.

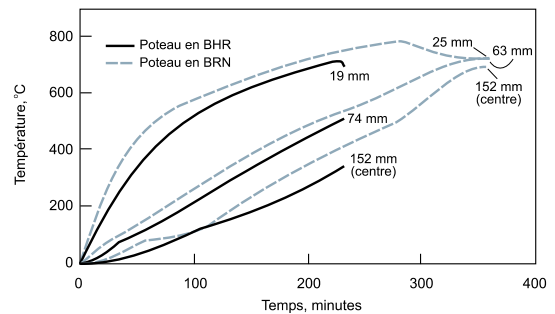


Figure 2. Distribution des températures à différentes profondeurs, lors de l'exposition au feu de poteaux en béton à résistance normale (BRN) et en béton haute résistance (BHR)

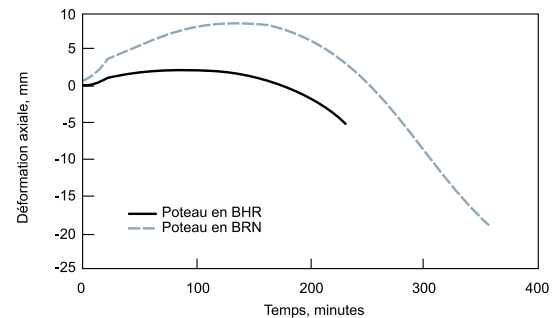


Figure 3. Déformation axiale de poteaux en béton à résistance normale ou en béton haute résistance pendant l'exposition au feu

À ce stade, le comportement du poteau dépend de la résistance du béton (figure 3). Il se produit dans le poteau en BRN un important retrait qui entraîne à terme sa rupture ductile. Le plus faible retrait observé dans le cas du poteau en BHR peut être attribué au fait qu'à température élevée ce matériau se fragilise et perd sa résistance plus rapidement que le BRN.

Les travaux de recherche ont permis de faire une constatation importante : il n'y a pas eu d'effritement dans le cas du poteau en BRN, mais il y en a eu beaucoup, juste avant la rupture, aux coins du poteau en BHR. On a aussi observé de l'effritement dans le cas du poteau en BHR, au début de l'exposition au feu. La figure 1 fait voir l'état des deux types de poteaux après les essais de résistance au feu. Dans le cas du poteau en BHR, l'armature (longitudinale et latérale) est exposée complètement et il y a effritement considérable.

La résistance au feu des poteaux en BRN a été d'environ 366 minutes et celle des poteaux en BHR, de 225 minutes. La moindre résistance au feu du poteau en BHR est attribuable aux caractéristiques thermiques et mécaniques du matériau. Le phénomène d'éclatement, qui a eu pour effet de réduire la section du poteau, a aussi contribué à faire diminuer la résistance au feu des poteaux en BHR.

Facteurs influant sur le comportement au feu

Les recherches menées à l'IRC et ailleurs montrent que la tenue au feu du BHR, en général, et l'effritement, en particulier, sont influencés par les facteurs suivants :

- la résistance initiale du béton à la compression
- sa teneur en humidité
- sa masse volumique
- l'intensité du feu
- les dimensions et la forme des échantillons
- l'armature latérale
- les conditions de chargement
- le type de granulat

Les études en cours à l'IRC visent à quantifier l'influence de ces facteurs et à permettre la mise au point de moyens pour améliorer le comportement au feu du BHR. Voici les conclusions qui ont été tirées à ce propos.

Résistance du béton

Il est difficile de définir, à partir de l'information dont on dispose, une plage de résistance précise, mais les bétons ayant une résistance supérieure à 55 MPa sont plus sujets à s'effriter et il est possible qu'ils résistent moins bien au feu.

Teneur en humidité

La teneur en humidité, exprimée en humidité relative (HR), influe sur le degré d'effritement. Un taux d'HR plus élevé provoque un effritement plus important. Les essais de résistance au feu auxquels ont été soumis des poteaux en BHR vraie grandeur ont montré qu'il y a effritement substantiel lorsque l'HR est supérieure à 80 %. Le délai nécessaire pour atteindre un niveau d'HR acceptable (moins de 75 %), dans le cas des pièces de charpente en BHR, est plus long que dans celui des éléments de structure en BRN en raison de la faible perméabilité du BHR. Dans certains cas, par exemple dans les constructions en mer, les niveaux d'HR peuvent rester élevés tout au long de la période de service de l'ouvrage; il faut donc en tenir compte lors de la conception.

Masse volumique du béton

L'IRC a étudié l'effet de la masse volumique du béton en soumettant à des essais de tenue au feu des blocs en BHR ayant une masse volumique normale (comportant du granulat de poids normal) et des blocs légers (comportant du granulat léger)⁵. Il a constaté que l'effritement est beaucoup plus marqué lorsqu'on utilise du granulat léger. Cela est surtout dû au fait que ce dernier renferme plus d'humidité libre, ce qui occasionne une pression de vapeur plus forte lors de l'exposition au feu.

Intensité du feu

Le BHR s'effrite beaucoup plus lors des incendies caractérisés par des vitesses d'échauffement élevées ou la grande intensité du feu. À cet égard, les feux d'hydrocarbures constituent une menace sérieuse. Lorsque le

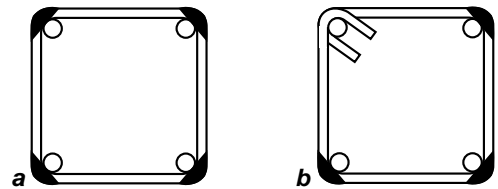


Figure 4. Configurations d'attaches pour poteaux en béton armé : a) configuration traditionnelle; b) configuration modifiée

BHR doit être utilisé dans des ouvrages où se trouvent des combustibles hydrocarbonés, par exemple dans des constructions de forage en mer ou dans des tunnels routiers, il faut tenir compte, lors de la conception, des probabilités d'éclatement du béton.

Dimensions des échantillons

L'examen de la documentation révèle que le risque d'effritement thermique explosif augmente avec la taille de l'échantillon. Cela est dû au fait que les dimensions de celui-ci ont un rapport direct avec le transfert de chaleur et d'humidité au sein de la structure, ainsi qu'avec la capacité des grands ouvrages à stocker plus d'énergie. Il faut donc porter une grande attention à la taille des échantillons lorsqu'on évalue le problème de l'éclatement; les essais de tenue au feu sont souvent effectués sur maquette, ce qui peut donner des résultats trompeurs.

Armature latérale

L'espacement et la configuration des attaches ont tous deux un effet important sur la performance des poteaux en BHR. En rapprochant les attaches (du quart de la distance exigée dans le cas des poteaux en BRN) et en les repliant à 135 ° vers l'intérieur du noyau du poteau, comme le montre la figure 4, on améliore la tenue au feu. La mise en place d'attaches transversales accroît aussi la résistance au feu. Les essais de tenue au feu auxquels ont été soumis des poteaux en BHR, un confinement additionnel étant assuré par le repliement des attaches vers le noyau des poteaux et par l'utilisation d'attaches transversales, ont révélé que l'effritement est ainsi réduit considérablement et qu'il est possible d'obtenir une résistance au feu de 266 minutes, même sous charge de service maximale³.

Importance de la charge

Un élément de structure en BHR qui supporte une charge s'effritera plus qu'une pièce de charpente non mise en charge. La charge ajoutée aux contraintes dues à la pression interstitielle produite par la vapeur. Par ailleurs, plus la charge est grande, moins la tenue au feu est bonne, car la perte de résistance qui accompagne la montée en température est plus grande dans le cas du BHR que dans celui du BRN.

Type de granulat

Des deux granulats utilisés couramment pour faire du béton, le granulat carbonaté



Figure 5. Vue de blocs en béton haute résistance exposés pendant deux heures à un feu d'hydrocarbures : a) bloc sans fibres de polypropylène; b) bloc avec fibres de polypropylène

(surtout le calcaire) et le granulat siliceux (surtout le quartz), c'est le premier qui assure la meilleure tenue au feu et la plus grande résistance à l'éclatement³. Cela est surtout dû au fait que le granulat carbonaté a une capacité calorifique (chaleur spécifique) beaucoup plus grande, ce qui contribue à empêcher l'effritement. Cette plus grande chaleur spécifique est probablement causée par la dissociation de la dolomie dans le béton à granulat carbonaté.

Renfort fibreux

L'ajout de fibres de polypropylène réduit l'effritement des pièces de charpente en BHR lors d'un incendie¹. L'une des théories les plus répandues à ce propos veut qu'en fondant à une température relativement basse de 170 °C, les fibres de polypropylène créent des « canaux » permettant à la pression de vapeur de s'échapper du béton, empêchant ainsi les petites « explosions » qui provoquent l'éclatement. L'étude de l'IRC a montré qu'il faut environ 0,1 à 0,25 % (en volume) de fibres de polypropylène pour réduire l'effritement du béton. L'Institut poursuit ses recherches en vue de déterminer la teneur en fibres optimale pour différents bétons. La figure 5, qui fait voir des blocs de BHR après deux heures d'exposition au feu,

illustre l'effet des fibres de polypropylène sur l'éclatement⁵.

Les fibres d'acier réduisent aussi l'effritement du BHR et augmentent sa résistance au feu. Elles renforcent la résistance en traction du béton, même à haute température, et aident à résister à la pression interstitielle produite sous l'effet de la vaporisation de l'eau, lors d'un incendie. La résistance à la traction est alors portée à 5-7 MPa, ce qui dans bien des cas suffit à assurer une résistance au feu de deux à trois heures sans effritement important. Des essais en vraie grandeur ont montré que l'incorporation de fibres d'acier dans le BHR améliore sensiblement la tenue au feu de poteaux d'acier tubulaires remplis d'un tel béton⁶. Cependant, lorsque la pression interstitielle dépasse la résistance en traction du béton, il peut y avoir effritement.

Règles à suivre pour améliorer la tenue au feu

Le béton haute résistance est un matériau très performant qui offre un certain nombre d'avantages. Les ingénieurs peuvent renforcer

sa tenue au feu en suivant ces règles :

- Afin de réduire l'effritement, utiliser du granulat de poids normal (au lieu du granulat léger)
- Ajouter des fibres de polypropylène au mélange pour diminuer l'éclatement
- Ajouter des fibres d'acier pour accroître la résistance à la traction et réduire l'effritement
- Employer du granulat carbonaté (au lieu du granulat siliceux) pour réduire l'éclatement
- Rapprocher les attaches et utiliser des attaches transversales pour améliorer la résistance au feu
- Utiliser des attaches à extrémités recourbées (à 135° vers l'intérieur du noyau) au lieu d'attaches droites
- Prendre les précautions nécessaires pour empêcher l'effritement lorsque la résistance du béton dépasse 55 MPa.

Résumé

Il faut mettre dans la balance les attraits du béton haute résistance et les interrogations que suscitent sa résistance au feu et sa sensibilité à l'effritement aux températures élevées. Les travaux de recherche entrepris par l'IRC se poursuivent, et ils se traduiront par des règles de conception plus précises.

Références

1. Kodur, V.K.R. Spalling in high strength concrete exposed to fire – Concerns, causes, critical parameters and cures, actes du congrès de l'ASCE sur les structures, Philadelphie (PA), 2000.
2. Ulm, F.J., Acker, P., et Levy, M. Chunnel fire. II: analysis of concrete damage, Journal of Engineering Mechanics, 125(3), 1999, p. 283-289.
3. Kodur, V.K.R., et Sultan, M.A. Structural behaviour of high strength concrete columns exposed to fire, Symposium international sur les bétons à haute performance et de poudres réactives, Sherbrooke (Qc), 1998, p. 217-232.
4. Lie, T.T., et Woollerton, J.L. Fire resistance of reinforced concrete columns: test results, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, rapport interne no 569, Ottawa, 1988, 302 p.
5. Bilodeau, A., Malhotra, V.M., et Hoff, G.C. Hydrocarbon fire resistance of high strength normal weight and light weight concrete incorporating polypropylene fibres, Symposium international sur les bétons à haute performance et de poudres réactives, Sherbrooke (Qc), 1998, p. 271-296.
6. Kodur, V.K.R. Performance of high strength concrete-filled steel columns exposed to fire, Revue canadienne de génie civil, 25(6), 1998, p. 975-981.

V.K.R. Kodur, Ph.D., est agent de recherche au sein du programme Gestion des risques d'incendie, à l'Institut de recherche en construction du Conseil national de recherches.

© 1999
Conseil national de recherches du Canada
Décembre 1999
ISSN 1206-1239

« Solutions constructives » est une collection d'articles techniques renfermant de l'information pratique issue de récents travaux de recherche en construction.

Canada

Pour obtenir de plus amples renseignements, communiquer avec l'Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa K1A 0R6.
Téléphone : (613) 993-2607; télécopieur : (613) 952-7673; Internet : <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca>