

LA PROTECTION INCENDIE PAR LES CONSTRUCTIONS EN BÉTON

Choix du béton – réglementations – réaction au feu et résistance au feu – différentes approches de calcul – restauration du béton après incendie

DOSSIER
CIMENT

37
avril 2006

béton
performances
liées au feu

		f2	(K)
BB/SfB			



Le dramatique incendie de l'Innovation en 1967 à Bruxelles aura montré l'absolue nécessité d'une réglementation en matière de résistance au feu et d'une meilleure connaissance du comportement des matériaux et des structures soumis au feu.

Il s'en est suivi des travaux sans précédent dans ces domaines. Ils ont été et sont menés pour rejoindre la préoccupation de tout utilisateur ou concepteur de bâtiment : une sécurité incendie optimale.

Plus récemment, des incendies se sont produits dans les tunnels de montagne puis sous la Manche et à New-York, le 11 septembre 2001. Ce fut le cas, plus récemment encore à Madrid, à Mons et sur notre réseau autoroutier belge. Ils ont conduit tout un chacun à une plus grande vigilance, à réfléchir aux différentes composantes des incendies et, sûrement, à se poser des questions sur la tenue des ouvrages au feu.

Ce bulletin :

- rappelle quelques concepts fondamentaux propres au domaine du feu ;
- fixe le contexte des réglementations ;
- précise le comportement des matériaux béton et acier, durant et après l'incendie ;
- montre que le béton intégré dans la structure sous forme de béton armé, de béton précontraint ou de maçonnerie confère aux ouvrages **une résistance remarquable au feu et de bonnes possibilités de restauration après incendie.**

Ainsi, ce document devrait donner une vue générale sur l'usage du béton pour satisfaire aux exigences requises de protection incendie.

Ce bulletin a été créé à partir du document de référence intitulé « La sécurité incendie et les constructions en béton ». Ils sont tous les deux téléchargeables depuis le site www.febelcem.be

1. OBJECTIF DE LA SÉCURITÉ INCENDIE :
LA PROTECTION DES PERSONNES ET DES BIENS

Les objectifs de la sécurité incendie [5][7] sont la protection efficace contre les risques d'incendie des personnes et des biens (fig. 1). Plus précisément, ils concernent :

- la sauvegarde des vies des occupants de l'immeuble ;
- la protection des vies des services d'intervention ;
- la protection de l'intégrité du bâtiment ;
- la sauvegarde des bâtiments adjacents.

Les exigences de base de la protection incendie consistent à

- réduire le développement de l'incendie ;
- éviter la propagation du feu ;
- assurer l'évacuation rapide des occupants avec une relative sécurité ;
- faciliter l'intervention du corps des sapeurs pompiers.

La figure 2 [27] montre comment les éléments béton satisfont à ces exigences fondamentales de la protection incendie.

La sécurité [17] contre l'incendie ne peut pas être absolue. Elle consiste à réduire les risques, en prenant une série de mesures. Chacune de ces mesures est en soi insuffisante, mais leur conjonction permet d'atteindre une bonne sécurité.

Pour une lutte efficace contre l'incendie, l'intervention des services d'incendie doit se faire par l'intérieur du bâtiment [15]. A cet égard, les structures béton sont des plus rassurantes tant au stade de l'évacuation qu'à celui de la lutte contre l'incendie.

Selon les observations [17] faites en Angleterre à partir de 840 incendies, la probabilité de destruction de la structure est faible (1%) (tous matériaux de structure confondus !) tandis que la destruction localisée d'un élément de structure est plus élevée (15%). Ceci permet de se faire une idée de l'importance de la réparabilité des structures.

Dans nombre de pays européens, il existe une tendance [27] à réduire les exigences au niveau de la protection incendie des bâtiments. Ceci affecte directement la résistance au feu exigée dans les éléments structuraux. La raison principale de cette attitude résulte de la conviction que seule la résistance au feu nécessaire à la protection des personnes doit être réglementée par les autorités publiques. La responsabilité de la protection des bâtiments et des biens est donc transférée aux citoyens. Le Centre Mondial des Statistiques Incendies a présenté dans son rapport annuel de 1999 une comparaison internationale des coûts associés aux incendies. Cette comparaison révèle l'importance des protections incendie :

- Le coût total des dommages incendie est de 0,2 à 0,3% du produit national brut.
- Le nombre de décès lors d'incendie varie par 100 000 habitants de 0,55 en Suisse à 1,32 en Belgique et à 2,12 en Finlande.
- La somme des coûts liés aux mesures de protection et aux dommages incendie atteint 0,6% du produit national brut en moyenne.

Ces chiffres montrent la nécessité de disposer d'une protection incendie d'ensemble. Une réduction du nombre de décès par incendie et des coûts liés à leurs dommages devrait être poursuivie comme finalité sociale et économique incontestable.

La limitation de la pollution par les fumées, les gaz toxiques et l'eau d'extinction contaminée devrait quant à elle contribuer à la protection de l'environnement.

Les rapports de la NFPA [25] (National Fire Protection Association) précisent qu'aux Etats-Unis entre 1977 et 2002, la perte financière moyenne par incendie affectant la structure a augmenté de 51%. Cette augmentation est liée à un relâchement des exigences de sécurité, spécialement pour la protection des bâtiments. Ces pertes directes, ou indirectes, telles le déplacement des résidents ou des activités de la société peuvent avoir un impact économique énorme sur la communauté. Les réglementations devraient considérer cet impact.

Fig. 1 - Les effets d'ensemble d'une protection incendie avec l'usage d'éléments en béton

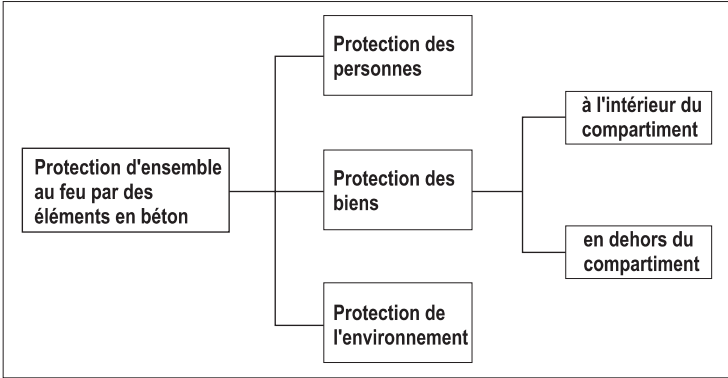


Fig. 2 - Relations entre exigences de base de la protection incendie et mesures de protection

Exigences de base de la protection incendie			
Réduire le développement de l'incendie	Eviter la propagation du feu	Assurer l' évacuation rapide des occupants avec une relative sécurité	Faciliter l' intervention du corps des sapeurs pompiers
↓	↓	↓	↓
Mesures de prévention et de protection			
p.ex.: A l'aide de murs, sols et plafonds incombustibles	p.ex.: A l'aide de parois tant intérieures qu'extérieures hautement coupe-feu	p.ex.: Des chemins d'évacuation constitués d'éléments dotés d'une haute résistance au feu et utilisables pendant un long laps de temps	p.ex.: Des structures portantes à haute résistance au feu qui permettent une attaque effective du feu à l'intérieur du bâtiment

Une destruction complète des bâtiments en l'absence de compartimentation expose l'environnement à une forte agression [photo Guido Coolens]



2. LES MESURES DE PROTECTION ACTIVE ET PASSIVE

Deux types de mesures sont classiquement mis en œuvre pour protéger les personnes et les bâtiments:

Les mesures de protection active

Il s'agit de mesures visant à mettre à disposition des moyens de lutte directe contre le feu et ses conséquences (extinction automatique, alarmes,...). Elles visent à limiter le risque d'un incendie sévère.

Pour retirer les avantages des mesures actives, il convient que leur usage soit conditionné par des mesures appropriées de maintenance, de formation, de certification, d'agrément de personnes.

Les mesures de protection passive

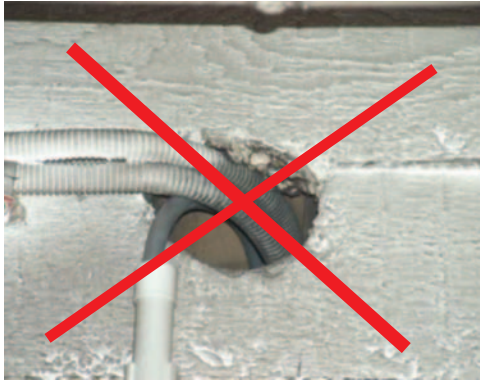
Il s'agit de moyens permettant, du fait de leur conception et de leur emplacement, une maîtrise des conséquences de l'incendie (compartimentage, cloisons ou planchers coupe-feu,...). Elles constituent une protection opérationnelle à tout moment.

La protection au feu est réalisée par une série de mesures s'étendant de la conception des chemins d'évacuation, des compartiments, de la protection contre chaleur, fumées et gaz toxiques jusqu'au dimensionnement au feu des structures portantes.

Le **matériau béton** occupe une très large place dans le domaine des mesures de protection passive. Par sa résistance reconnue au feu, il permet d'assurer un **compartimentage hautement sécuritaire** empêchant la propagation de l'incendie. Ce compartimentage permet l'évacuation ou la mise en sécurité des occupants vers un autre compartiment. Il facilite l'accès des services de secours et contribue ainsi largement à leur sécurité dans la lutte contre le feu. Le compartimentage doit être étudié dès l'élaboration des plans du bâtiment.



Mur non remaçonné dans une paroi EI, au niveau des canalisations de chauffage la transversant [22]



A proscrire ! Une ouverture dans une paroi EI laissant passer des câbles électriques et qui n'a pas été rejointoyée [22]

2.1. Les habitations et les bureaux

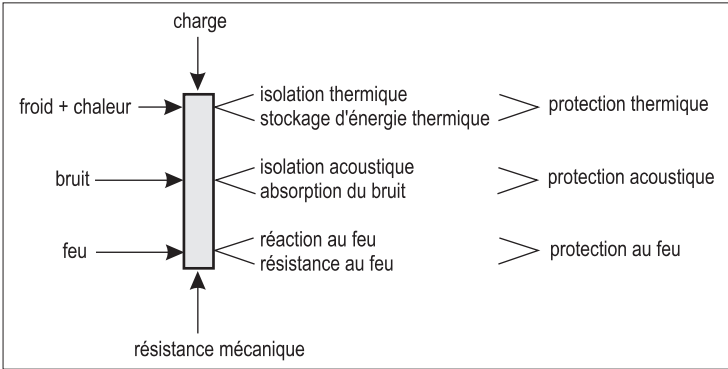
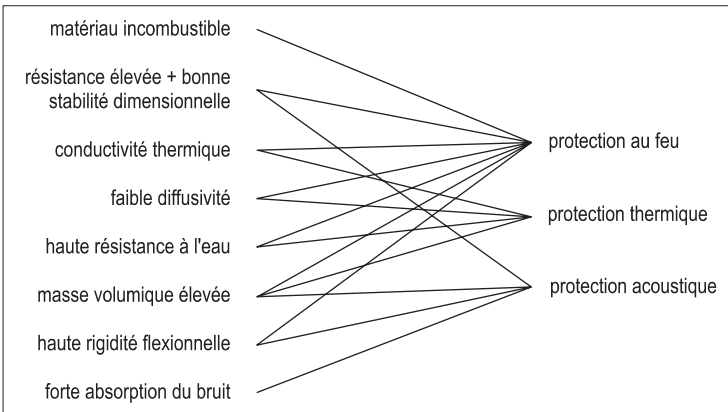


Fig. 3a - La paroi de compartimentage en béton remplit des fonctions adéquates de protection face aux sollicitations appliquées

Fig. 3b - Les composants de la construction remplissent des exigences de protection au feu, de protection thermique et de protection acoustique grâce aux propriétés du matériau béton et aux propriétés structurales des composants en béton



Le compartimentage des immeubles empêche que l'incendie se propage d'un logement à l'autre [source: BCA]

ASSURANCES DES BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS

Saviez-vous qu'en Norvège les primes d'assurances pour les **maisons unifamiliales** en bois sont 3 à 5 fois plus élevées que pour les maisons en "dur" [29] ? Un simple calcul de probabilité basé sur des statistiques suédoises montre que la probabilité de développer un incendie important dans des maisons multifamiliales en bois est 11,5 fois plus importante que dans une maison en "dur" [30]. Parmi les maisons gravement incendiées, seulement 9% des constructions en béton ont dû être démolies contre 50% pour les maisons en bois.

2.2. Les bâtiments industriels

L'usage de façades en béton coupe-feu limite le flux thermique pour les bâtiments voisins, les services d'incendie et leur matériel. Il est fondamental que ces façades soient auto-stables ou solidaires d'une structure présentant le même degré de résistance. Les structures béton sont sans conteste les favorites.

Panneaux de façade en béton écran thermique CF 2h
[source : CIMBETON]

Le rayonnement thermique intense d'un incendie force les services d'incendie à se tenir à distance de la façade en panneaux sandwichs à peau métallique en train de prendre feu.
[source : CIMBETON]

Le compartimentage des bâtiments industriels par des murs coupe-feu limite l'extension des incendies.

Les murs coupe-feu en béton ont parfaitement isolé l'incendie et empêché sa propagation aux entrepôts voisins.



ASSURANCES DES BÂTIMENTS INDUSTRIELS

Les primes d'assurances ajustées en fonction des risques encourus ne couvrent, dans les bâtiments industriels, que la perte de biens et **pas nécessairement les arrêts de production**. Ceci revêt toute son importance lorsque l'on sait que près de 50% des entreprises victimes d'un incendie majeur font faillite [23].

La **différence de coût de prime d'assurance** entre un bâtiment dont l'ossature et la couverture sont en béton et un autre, présentant une solution en acier, est de l'ordre de 32% en faveur du béton [31].

Une **conception d'ensemble** prenant en compte ces principes permet à l'assuré de réduire sensiblement le montant de sa prime d'assurance incendie, mais aussi de limiter les conséquences humaines et économiques de ce type de sinistre. Dès la conception des travaux pour un bâtiment neuf, une extension ou un aménagement, il est donc recommandé de contacter son assureur.

3. PHYSIQUE DE L'INCENDIE

3.1. Le triangle du feu et les phases de développement d'un incendie

Pour qu'un incendie puisse prendre naissance [4], il faut la présence conjuguée de trois éléments : l'oxygène (21% en volume dans l'air), des matériaux combustibles et une source de chaleur. Ils constituent ce qu'il est convenu d'appeler le **triangle du feu**, représenté à la figure 4. Les deux premiers éléments [14] entrent en combustion lorsque la température d'inflammation est atteinte. La combustion du carbone produit du gaz carbonique CO_2 et, si l'oxygène vient à manquer, elle produit le gaz bien connu, très dangereux pour l'être humain, le CO.

Le développement d'un incendie [28], et donc la température des gaz, est lié à trois paramètres principaux (fig. 5):

- l'importance de la charge combustible contenue dans le compartiment en feu et associée à son débit calorifique maximal,
- la surface des ouvertures du compartiment sur l'extérieur et
- les propriétés thermiques des parois.

3.2. Courbes nominales – la courbe ISO

La façon la plus simple de représenter un incendie est d'utiliser des courbes nominales, soit une relation donnant l'évolution de la température des gaz en fonction du temps.

Historiquement, les courbes nominales ont été développées pour tester expérimentalement les éléments de construction, en vue d'en établir un classement relatif tant pour leur résistance que pour leur réaction au feu. Il est en effet hautement souhaitable que les éléments testés dans différents fours soient soumis à la même action thermique. Pour ce qui est de la modélisation d'un incendie dans un bâtiment, ces courbes constituent une référence conventionnelle.

Pour des raisons historiques et de simplicité, elles continuent à être, et de loin, la représentation d'incendie la plus souvent utilisée dans les applications pratiques.

La notion de durée de résistance [17] est conforme au concept performantiel : aucun type de matériau n'est exclu et la performance de l'élément est prescrite.

Les courbes les plus fréquemment utilisées sont reprises à la figure 6. Elles ont été établies à partir de l'expérience sur des feux réels, tombant dans une des trois catégories majeures, à savoir les bâtiments, la pétrochimie / plates-formes en mer et les tunnels.

Pour la courbe ISO, il est facile de retenir que, après $\frac{1}{4}$ h, la température ambiante atteint environ 745°C et continue à augmenter d'environ 100°C , chaque fois que l'on double le temps.

Les éléments en béton s'accommodent sans problème d'un feu ISO d'une heure. Une résistance supérieure peut être obtenue sans difficulté, ce qui est très loin d'être le cas des éléments métalliques non protégés. Après 1 quart d'heure, l'acier atteint 500°C et sa résistance chute fortement. Il existe des plaques et des peintures isolant l'acier, mais une mauvaise exécution de chantier, une dégradation de ces matériaux rapportés peuvent entraîner des conséquences dramatiques.

3.3. Réaction et résistance au feu

La réaction au feu [5] s'applique aux **matériaux** de construction. Elle mesure l'ensemble des propriétés des matériaux de construction en rapport avec la naissance et le développement d'un incendie. Elle est caractérisée par le potentiel calorifique [4], la non-combustibilité, l'inflammabilité, le mode de propagation des flammes à la surface du matériau, éventuellement par d'autres propriétés comme la formation de fumées et la production de gaz toxiques.

La résistance au feu s'applique aux **éléments** de construction. Elle constitue une mesure de leur aptitude à remplir le rôle qui leur est dévolu, malgré l'action d'un incendie.

Ces deux notions sont donc totalement différentes. La première intervient à la naissance et au début du développement de l'incendie alors que la seconde se manifeste dans la phase de pleine intensité. Aucun des deux domaines ne peut être négligé en prévention incendie. Les prescriptions comportent donc des exigences relatives aux deux aspects.

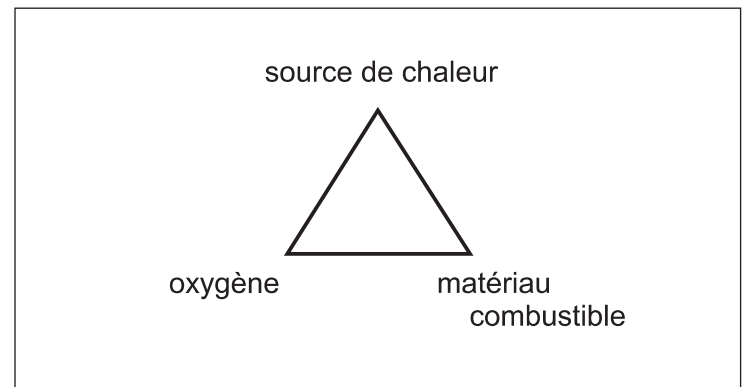


Fig. 4 - Le triangle du feu

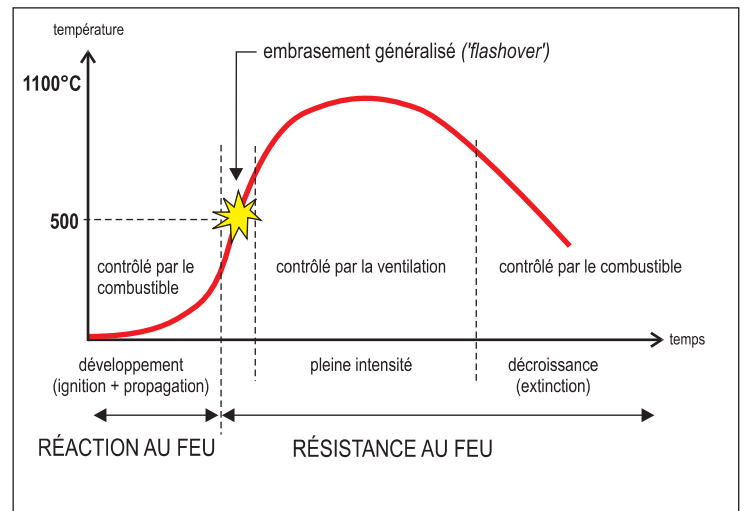


Fig. 5 - Les phases d'un incendie

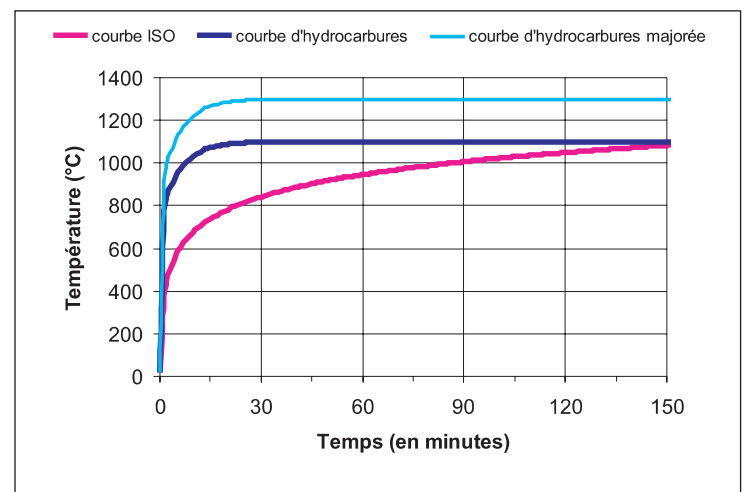


Fig. 6 - Différentes courbes de température:
- courbe hydrocarbures majorée (tunnels)
- courbe hydrocarbures
- courbe standard ISO 834 (bâtiments)

Ainsi le bois [4] est un matériau qui ne présente pas une bonne réaction au feu – le bois brûle – alors que des poutres ou des colonnes en bois sont des éléments de construction présentant une résistance au feu significative.

Par contre l’acier est un matériau qui présente une bonne réaction au feu, alors que les éléments en acier sont des éléments de construction présentant une très faible résistance au feu.

Enfin le béton, lui, cumule les deux qualités. C’est pourquoi il est ‘le’ matériau de prédilection en matière d’éléments de construction où est recherchée une bonne tenue en cas d’incendie.

Les choix qui améliorent la résistance au feu des éléments de construction offrent, par leur caractère plus permanent, plus de sécurité pour la prévention contre l’incendie.

3.3.1. La réaction au feu des produits de construction - Leur classification

Concernant la réaction au feu mentionnée dans le marquage CE, tout professionnel de la construction se doit d’apprivoiser un minimum du langage européen pour comprendre les nouvelles normes d’essais et de classification.

Ce système de classement [9] a fait l’objet de décisions de la Commission Européenne les 08-02-2000 [19], [21] et 26-08-2003. Au fur et à mesure de la parution des arrêtés de mise en application de ce marquage, les industriels doivent vérifier que leurs produits répondent aux nouvelles exigences européennes et, si nécessaire, modifier ces produits.

Le nombre de classes, la logique qui a permis leur construction ainsi que certains des essais retenus diffèrent de l’actuelle pratique belge, si bien qu’il n’existe pas de correspondance entre le classement belge actuel et le système des Euroclasses.

Les produits de construction sont séparés en deux grandes familles [24] : celle des revêtements de sol et celle des autres produits. Cette distinction s’explique par le fait que les scénarios d’exposition au feu et le comportement des matériaux diffèrent dans les deux cas. Dans chacun de ces groupes, les Euroclasses, au nombre de sept, définies dans la NBN EN 13501-1:2002 [3], se déclinent comme suit :

- A_{1,F1}, A_{2,F1}, B_{F1}, C_{F1}, D_{F1}, E_{F1} et F_{F1} pour les revêtements de sol (F1 pour « floor ») ;
- A1, A2, B, C, D, E, et F pour les autres produits de construction.

A1 et A2 (respectivement A_{1,F1}, A_{2,F1}) sont attribuées aux produits à faible ou très faible fraction organique qui sont, de ce fait, très peu ou peu combustibles.

Les classes B à E (respectivement B_{F1}, E_{F1}) sont attribuées aux produits combustibles qui contribuent de manière importante à l’embrasement, tant pour les revêtements de sol que pour les autres produits. La classe E s’applique à des produits répondant au critère minimal de mise sur le marché allemand et la classe F s’applique à des produits non classés ou ayant échoué au test le moins sévère.

Le béton, matériau de construction minéral [27], satisfait aux exigences de la classe A1 parce qu’effectivement il n’est pas inflammable et ne prend pas feu aux températures encourues lors des incendies. Aucun élément en feu ne s’en détache ou ne coule du béton.

3.3.2. La résistance au feu des éléments structuraux

Les trois critères R, E et I

L’aptitude d’une construction en béton à conserver sa fonction portante pendant la durée exigée est exprimée comme suit :

$E_{d,fi}(t) \leq R_{d,fi}(t)$

où : E_{d,fi}(t) est la valeur calculée de l’effet des actions, des sollicitations, au moment (t) de l’incendie ;

R_{d,fi}(t) est la valeur de calcul de la résistance de la construction aux températures élevées au moment (t).

La résistance au feu des éléments structuraux est mesurée lors d’essais sous la sollicitation thermique décrite par la courbe ISO. Elle comporte les trois critères qui s’appliquent à la majorité des éléments de construction :

- la stabilité R (capacité portante) ;
- l’étanchéité aux flammes E ;
- l’isolation thermique I.

Le degré de résistance REI de l’élément est le temps immédiatement inférieur à la durée observée, choisi parmi les valeurs de 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360 minutes. [19] [20]

Le critère « **stabilité** » (R) d’un élément indique le temps durant lequel est assurée sa résistance mécanique sous charge statique et durant lequel ses déformations restent compatibles avec sa fonction dans la stabilité de la construction (généralement 1/30^{ème} de sa portée). Il correspond à la dénomination française de « Stable au Feu SF ».

Le critère de « **l’étanchéité aux flammes** » (E) n’est plus satisfait lorsqu’une nappe de coton, placée à la distance de 2 à 3 cm d’une ouverture, s’enflamme spontanément.

La dénomination française « Pare-Flamme PF » correspond aux critères RE.

Le critère de « **l’isolation thermique** » (I) est satisfait si l’élévation de température de la surface non exposée de l’élément reste inférieure à 140°C en moyenne et à 180°C ponctuellement.

La dénomination française « Coupe-Feu CF » correspond aux critères REI.

Les critères E et I permettent d’éviter l’inflammation de matériaux en contact avec la surface non exposée.

Dans les éléments structuraux porteurs comme les poutres, colonnes, murs et dalles, la résistance R empêche l’effondrement de la structure. En général, la fonction séparative (E et I) s’applique aux éléments qui font partie intégrante des parois et de l’enveloppe du compartiment : ainsi les murs et les dalles.

Les éléments en béton des bâtiments peuvent satisfaire à toutes les classes de résistance au feu définies par la Directive Européenne relative à la « Sécurité à l’incendie » sans mesure de protection complémentaire de quelque nature que ce soit (revêtement de plâtre, peinture intumescente...).

Un exemple simple : la résistance au feu des maçonneries (tableau 1)

Les blocs [4] sont répartis en groupe en fonction du pourcentage de vides, qui peut atteindre 70%. Ainsi les masses spécifiques apparentes des blocs sont comprises entre 500 et 2000 kg/ m³.

Les maçonneries en blocs de béton léger du groupe 2 comprennent un pourcentage de vides supérieur à 25% et ont une masse spécifique apparente supérieure à 800 kg/ m³.

Seules les maçonneries ayant une épaisseur au moins égale à 14 cm peuvent être chargées.

Tableau 1 - Épaisseur minimale des murs en maçonnerie (chargés ou non chargés) selon la résistance au feu (REI) recherchée.

L’épaisseur varie selon le type de blocs de béton.

Groupe	1	2a	2b	3
Vides (%)	0 à 25	25 à 50	50 à 60	≤ 70

Épaisseur (cm) des murs en maçonnerie	REI 60	REI 120	REI 240	REI 360
Cas général	9 (*)	14	19	24
Blocs béton légers (groupe 2)	-	19	24 (**)	-
(*) L’épaisseur de 9 cm pour un REI 60 est valable si les joints entre blocs sont parfaitement fermés par le mortier, ou si un enduit est appliqué sur chaque face.				
(**) Les valeurs données pour les blocs de béton du groupe 2 sont très sévères, car il existe une grande dispersion en fonction du mode de fabrication, de la forme et de la disposition des vides.				

4. LES RÉGLEMENTATIONS

4.1. La Directive Produits de Construction

Il est à remarquer que la protection des biens ainsi que la préservation des arrêts de production ne constituent pas en tant que tels des objectifs de la « Directive Produits de Construction », la DPC. La Commission Européenne laisse à chaque pays le soin de déterminer le niveau de sécurité pour les personnes dans leur pays. Les informations additionnelles spécifiques à l'EN 1992-1-2 [2] précisent qu'il est loisible à chaque pays d'imposer dans sa réglementation des critères qui prennent en compte, pour des raisons économiques et/ou environnementales, la protection des biens directement exposés. Les autorités régionales en charge du développement économique et celles en charge de l'environnement peuvent être sensibles à l'aspect de la préservation des arrêts de production et de l'environnement. Ces aspects sont également, bien sûr, du ressort du maître de l'ouvrage (§1 consacré aux objectifs de la sécurité incendie).

4.1.1. Les normes produits

La DPC a longtemps buté sur la mise au point de normes d'essais de réaction au feu, chaque pays disposant de ses propres procédures. Or, les trois quarts des produits de construction sont concernés par la sécurité au feu. [24]

De nombreux produits de construction, par exemple les hourdis et les blocs de béton, font l'objet d'une norme européenne produit harmonisée. Elle est dite harmonisée dès qu'elle dispose d'une annexe Z. Là sont reprises les différentes caractéristiques que tout producteur doit déclarer dans son marquage CE. Ce marquage est apposé sur les produits ou repris sur des documents accompagnant les produits. Un produit "harmonisé" vendu dans l'espace économique européen doit **obligatoirement** porter ce marquage. Les caractéristiques à déclarer doivent être conformes à la norme et sont attestées selon le système d'attestation 1+, 1, 2+, 2, 3 ou 4. Le 1+ correspond à une certification par une tierce partie alors que le 4 correspond à une simple déclaration de conformité du fabricant. Puisque la Belgique s'est dotée d'une réglementation incendie, comme la plupart des Etats Membres, tous les produits de construction dont la norme est harmonisée **doivent**, pour une mise en œuvre, comporter dans leur marquage une déclaration relative tant à la réaction qu'à la résistance au feu.

Retenons que c'est la DPC qui rend obligatoire la déclaration des caractéristiques selon la norme harmonisée, cela pour la mise d'un produit sur le marché d'un pays déterminé.

Les **normes produits** font référence à de très nombreuses **normes d'essais** préparées par le comité européen CEN TC 127. Elles commencent à remplacer les essais décrits dans la norme belge, la NBN 713-020.

4.1.2. Les Eurocodes

Les normes produits sont basées sur des **normes de calcul** européennes dénommées Eurocodes, au nombre de 58, normes produites par le comité technique TC250 du CEN, le Comité Européen de Normalisation. C'est la Commission Européenne qui l'a mandaté pour cette rédaction. Ainsi, à ce jour, les normes de calcul relatives au béton soumis au feu et publiées par l'IBN entre 1995 et 1999, d'application en Belgique, sont :

- la NBN ENV 1991-2-2 + DAN "Actions sur les structures exposées au feu" ;
- la NBN ENV 1992-1-2 + DAN "Calcul des structures en béton" - partie feu ;
- la NBN ENV 1994-1-2 + DAN "Calcul des structures mixtes acier-béton" - partie feu ;
- la NBN ENV 1996-1-2 + DAN "Calcul des maçonneries" - partie feu.

Plus communément, l'on parle des Eurocodes 1, 2, 4 et 6, partie feu. Ces normes belges sont des prénormes européennes, complétées par leur Document d'Application Nationale (DAN).

Ces prénormes (ENV) seront remplacées prochainement par les normes européennes (EN), associées avec leur annexe nationale (ANB pour "Annexe Nationale – Nationale Bijlage").

Il faut noter que le premier numéro, juste après le sigle EN ne correspond pas à une date ! Le CEN a malheureusement attribué les séries 1990 à 1999 aux Eurocodes. La date de parution de la norme est donnée en fin de dénomination des normes.

4.2 Réglementation incendie belge

4.2.1. Contexte général

Les projets de bâtiments nouveaux sont soumis à une réglementation répartie sur plusieurs niveaux de compétences :

1. la commune qui, depuis 1790, a pour mission générale de prévenir et de faire cesser les incendies à travers la réglementation communale et les permis de bâtir ;
2. les Communautés, notamment compétentes pour les hôtels et les maisons de repos ;
3. le Gouvernement Fédéral qui a réglementé successivement la sécurité incendie des lieux de travail (RGPT, depuis 1947), des hôpitaux (1979), des installations électriques (RGIE, 1981) et des nouveaux bâtiments élevés (1972), puis moyens et élevés (1994), bas (1997 et 2003 (normes de base)).

4.2.2. Arrêté royal (AR) de 1997

Les annexes de l'arrêté royal (AR) du 19 décembre 1997 [32] fixent les normes de base en matière de prévention contre l'incendie et l'explosion. Doivent y satisfaire les **bâtiments nouveaux** à étages ainsi que, pour la seule extension, les **extensions aux bâtiments existants**.

Jusqu'au 04 avril 2003 [9], les normes de base étaient également d'application, pour la partie rénovée, lors des **rénovations de bâtiments existants**. Les problèmes répétés, liés à la façon dont les normes de base devaient être appliquées en cas de transformation, ont conduit à exclure du domaine d'application, à partir de cette date, les rénovations de bâtiments existants. Une réglementation spécifique pour les rénovations est actuellement à l'étude.

Les AR de 94 et 97 ne sont pas d'application pour les maisons unifamiliales, pour les bâtiments industriels et pour les bâtiments à deux niveaux maximum, couvrant une superficie inférieure ou égale à 100 m².

Les annexes 1 à 5 de l'arrêté royal (AR) de 1997 sont :

1. Terminologie ;
2. Bâtiments bas (BB) : $h < 10$ m ;
3. Bâtiments moyens (BM) : $10 \text{ m} \leq h \leq 25$ m ;
4. Bâtiments élevés (BE) : $h > 25$ m ;
5. Réaction au feu des matériaux.

Les limites de hauteurs correspondent aux tailles de la petite et grande échelle des pompiers. La hauteur (h) considérée est la distance entre le niveau du plancher de l'étage le plus élevé et le niveau le plus bas des voies entourant le bâtiment et utilisables par les Services d'Incendie. En général [4], les exigences sont :

- 2 h pour les BE et les niveaux en sous-sol des BM ;
- 1 h pour les planchers des BM et les BB ;
- 1/2 h pour les toitures des BB.

Les dispositions constructives suivantes sont notamment abordées :

- distance entre bâtiments opposés (6 m et 8 m) ;
- résistance au feu des parois entre bâtiments contigus (REI d'1 h, de 2 h ou 4 h) ;
- limitation de la superficie des compartiments (2 500 m² ou plus) ;
- dimensions des linteaux et allèges (1 m) ;
- agencement, réaction et résistance des cages d'escaliers et d'ascenseurs ;
- distances maximales à parcourir pour atteindre les chemins d'évacuation.

4.2.3. Octroi du permis de bâtir - résistance au feu

Actuellement, la résistance au feu se détermine soit par des essais dans des fours selon la NBN 713-020, soit par calcul, comme le permettent les normes de base (annexe 1 de l'AR du 19-12-97), selon une méthode de calcul agréée par le Ministre de l'Intérieur.

Pour utiliser cette méthode de calcul, il peut être tenu compte de :

- l'examen de scénarios d'incendie conventionnels ;
- l'examen de scénarios d'incendie naturels, avec examen du rôle des installations d'extinction, des pompiers et des installations de détection incendie.

Au jour d'aujourd'hui, aucune méthode n'est encore agréée. La Commission des dérogations les autorise, au cas par cas. Pratiquement, les calculs effectués avec la courbe ISO sont acceptés s'ils sont établis sur base de nos « DAN » partie 1-2 des Eurocodes et que ces derniers ont été correctement appliqués. La révision des normes de base incendie devrait régulariser cette procédure. Les bureaux d'études vérifient par calcul la résistance au feu demandée. Elle est mentionnée explicitement sur les plans d'exécution. Les architectes et les maîtres d'ouvrage se concentrent sur la conformité technique aux prescriptions des règlements et les exigences tant des services incendie que des assureurs.

Préalablement [22] à l'octroi du permis de bâtir, les plans de la future construction sont transmis aux services d'incendie territorialement compétents. Ceux-ci remettent alors, sous forme de rapport, un avis qui sera joint à la demande de permis de bâtir à fin de décision pour le département urbanisme de la commune concernée. A la fin des travaux, les services incendie effectuent une dernière visite, afin de vérifier si la construction est bien conforme à ce qui a été prévu sur plan, et que le bâtiment ne présente pas de manquements importants.

5. LES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DANS LE BÉTON

5.1. Les phénomènes physiques et chimiques

En cas d'incendie, une très forte augmentation [16] de la température peut provoquer des modifications physico-chimiques dans le béton telles que la déshydratation par séchage du béton et la décarbonatation. Ces phénomènes peuvent produire retraits et pertes de résistance et de raideur des matériaux.

La déshydratation et la décarbonatation sont des réactions endothermiques : elles absorbent de l'énergie et donc ralentissent l'échauffement. Elles vont donc de pair avec l'absorption de chaleur qui retarde l'échauffement du matériau exposé au feu.

A partir de la surface chauffée se forme un front de déshydratation et de vaporisation où la température dépasse à peine les 100 °C (fig. 7). Si les pores capillaires sont trop fins, la pression de vapeur qui augmente peut générer dans le béton des contraintes de traction telles que la limite de résistance du béton est dépassée. Ce phénomène est d'autant plus accentué que l'humidité du béton est élevée et que l'échauffement est rapide. Des fragments de béton peuvent alors être projetés de la surface de l'élément avec plus ou moins de violence (voir plus loin : 'éclatement du béton').

Pour le béton, la perte de résistance résulte surtout de la formation de fissures internes et de dégradation/désintégration de la pâte de ciment. Outre ces fissures internes, on assiste, à des températures très élevées, à la formation de fissures entre la pâte de ciment et les granulats. Comme décrit ci-dessus, plusieurs transformations résultant de l'augmentation importante de la température interviennent dans la pâte de ciment, y provoquant une perte de cohésion.

Le béton se modifie d'une façon extrêmement complexe au cours d'un incendie (voir page suivante).

Les changements [13] qui s'opèrent dans le béton à "basse" température (< 300 °C) reflètent principalement des changements dans la pâte de ciment, puisque presque tous les granulats courants sont relativement stables jusqu'à 350 °C. Il a été montré que le gravier de rivière, 'Thames gravel', éclate déjà à cette température, contrairement à l'excellent comportement des autres granulats.

Le comportement des bétons cellulaires

Il faut retenir l'excellent comportement des bétons cellulaires qui sont d'ailleurs utilisés dans les fours pour réaliser la maçonnerie autour des portes coupe-feu qu'il faut tester !

DIFFÉRENCE ENTRE NORMES ET RÈGLEMENTS

Normes = codes de bonne pratique à caractère volontaire

Il existe des normes belges ou européennes enregistrées par l'IBN (ex : EN 1991-1-2 devient la NBN EN 1991-1-2), éventuellement complétées alors par une annexe nationale (ANB ou DAN) (voir DPC)

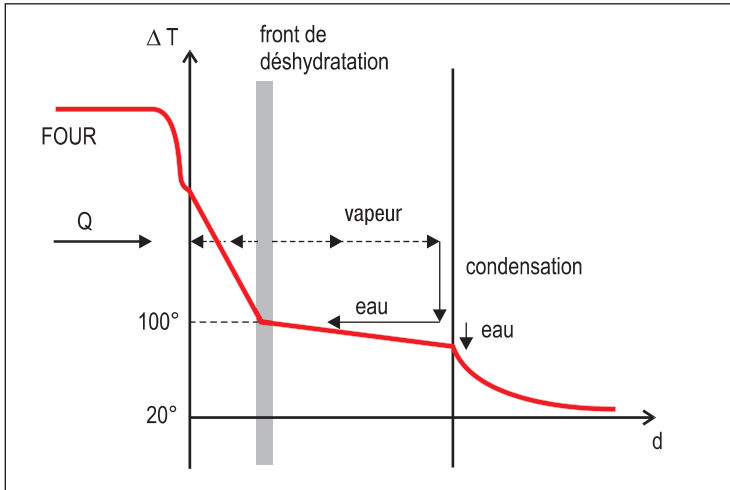
Règlements = documents à caractère obligatoire

C'est par contrat ou par les autorités compétentes que la norme peut être rendue obligatoire ou réglementaire, soit par

- les autorités publiques,
- les assureurs (UPEA > ASSURALIA),
- les organismes de certification (ANPI),
- les organismes de contrôle (SECO, ANPI, SGS),
- les bureaux d'étude spécialisés (i.e. évacuation des fumées et de la chaleur (EFC))

Normes de base pour la sécurité incendie = règlement général

Fig. 7 - Température dans une paroi en béton exposée au feu [4]



Le comportement des granulats et de la pâte de ciment

Les transformations chimiques décrites ci-dessous (et résumées dans les *tableaux 2 et 3*) se répercutent le plus souvent négativement sur les propriétés physiques du béton. **Il faut retenir que, même endommagé, le béton agit en tant que couche isolante, que bouclier thermique. Il protège le noyau porteur du plein effet des hautes températures.** Les effets négatifs de la chaleur mentionnés ci-après ne s'exercent en général que sur une couche externe de 3 à 5 cm d'épaisseur.

En dessous de 100 °C, la pâte de ciment se dilate d'abord légèrement pendant que le béton perd son eau libre. Elle s'évapore des pores capillaires. Cette exposition thermique est en règle générale inoffensive pour le béton.

Au-dessus de 100 °C, la pâte de ciment se contracte sensiblement puisque, tant l'eau libre que celle chimiquement liée s'échappent du béton.

Au-dessus de 300 °C, le gel de tobermorite CSH continue à se décomposer, les composés ferrugineux présents dans la pâte s'oxydent. Leur couleur change du gris au rose/rouge. La pâte se contracte tandis que les granulats continuent à se dilater.

A 400 °C, l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ (ou en abrégé CH), appelé encore portlandite, commence à se décomposer en chaux (CaO) et en eau (H₂O). La vitesse de décomposition est nulle à 400 °C, atteint un sommet à environ 500 °C pour revenir à 0 à 600 °C.

A 575 °C, les granulats (sables et gros granulats) siliceux sont sujets à la transformation cristalline endothermique du quartz α en quartz β. Elle va de pair avec une augmentation brusque d'environ 5,7% de leur volume. Cette augmentation peut être dommageable pour le béton. De tels granulats reprennent les graviers de rivière, les pierres de sable et les roches quartziques.

Les granulats calcaires comme les calcaires et les dolomies, quant à eux, sont stables jusqu'à environ 700 °C.

Au-dessus de 700 °C, la décarbonatation du calcaire (CaCO₃) en oxyde de calcaire (CaO) ou "chaux vive" et dioxyde de carbone (CO₂) s'amorce. Cette réaction endothermique tend à ralentir l'augmentation de température dans les bétons. Elle libère une quantité importante de CO₂.

Au refroidissement, la chaux libre produite lors de la déshydratation de Ca(OH)₂ (au-dessus de 400 °C) et la décarbonatation du CaCO₃ (au-dessus de 700 °C) se combine avec l'humidité ambiante pour former du Ca(OH)₂. Cette réaction est accompagnée d'une augmentation importante de volume (44%) qui entraîne elle-même la désagrégation du béton.

Ainsi après un incendie, le béton situé dans les zones soumises à des températures dépassant 300 °C est enlevé et remplacé.

Au-dessus de 1.100 °C, la pâte de ciment commence à fondre selon sa composition chimique. En général, la pâte de ciment Portland commence à fondre aux environs de 1350 °C.

Interaction entre les granulats et la pâte de ciment

Finalement, la résistance du béton dépend non seulement du comportement des granulats et de la pâte de ciment, comme expliqué ci-dessus mais aussi de l'interface entre ces composants du béton. L'interaction entre les granulats et la pâte de ciment peut être physique (p. ex. incompatibilité thermique) ou chimique.

Interactions physiques

La pâte se contracte tandis que les granulats continuent à se dilater plus ou moins fortement selon leur type : la dilatation est maximale pour les granits et minimale pour le basalte (utilisable pour les tunnels). La pâte de ciment s'accommode de cette forte différence de déformations thermiques entre la pâte et les granulats. Ceci ne peut se comprendre sur base d'une déformation élastique et d'un fluage classique. Cette théorie conduirait à une rupture déjà à partir de 100 °C.

Le comportement extraordinaire du béton est lié à la capacité de la pâte de s'accommoder de ces déformations différentielles. Ce phénomène est connu sous le nom de LITS ('load induced thermal strain') qui correspond à une relaxation du béton sous déformations imposées.

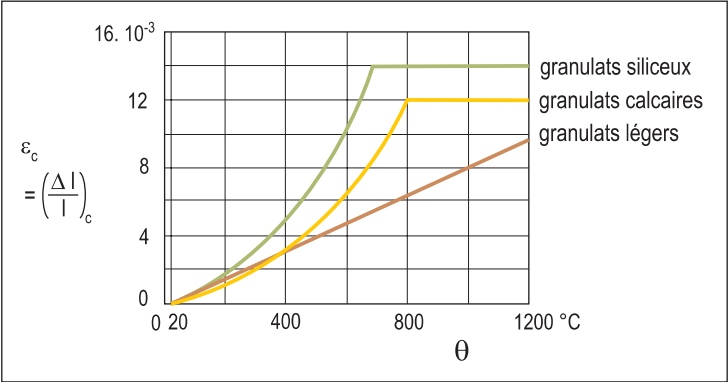


Fig. 8 - Dilatation thermique ε_c des bétons selon le type de granulats [2]

La dilatation thermique ε_c(θ) des bétons selon le type de granulats utilisés en fonction de la température est illustrée à la *figure 8*. Pour limiter la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats, le choix se portera naturellement sur des granulats calcaires (concassés) plutôt que des granulats siliceux (graviers).

Au cours du refroidissement et au cours d'échauffements ultérieurs, l'incompatibilité thermique ne peut être prise en charge que par les déformations élastiques et un fluage classique car le fluage transitoire n'est présent que durant le premier cycle d'échauffement du béton. Dès lors en l'absence de LITS, peuvent apparaître des contraintes internes et des fissures plus importantes entre la pâte et les granulats. Elles nuisent à la résistance mécanique du béton.

Une dilatation empêchée ne provoquera la rupture ni du béton ni de l'acier de par leur fluage. Cette plastification du béton est fondamentale pour comprendre la raison de la résistance du béton aux contraintes intenses de compression qui naissent lors de l'échauffement de la peau du béton et, en général, pour tout béton bridé.

Tableau 2 - Principales transformations chimiques des produits de l'hydratation en fonction de la température [13]

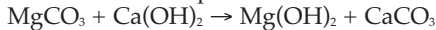
Temp.(°C)	Déshydratation et transformations	Réactions chim. et réhydratation																					
100 - 800	déshydratation du CSH	refroidissement CaO + H₂O → Ca(OH)₂ (44 % de dilatation)																					
400 - 600	Ca(OH) ₂ → CaO + H ₂ O																						
575	quartz α → quartz β (5,7 % de dilatation)																						
> 700	CaCO ₃ → CaOH + CO ₂																						
720	CSH → βC ₂ S + βCS + H ₂ O (*)																						
(*)																							
	<table><tr><th>Dénomination:</th><th>Formule complète:</th><th>Formule abrégée:</th></tr><tr><td>chaux</td><td>CaO</td><td>C</td></tr><tr><td>silice</td><td>SiO₂</td><td>S</td></tr><tr><td>alumine</td><td>Al₂O₃</td><td>A</td></tr><tr><td>oxyde de fer</td><td>Fe₂O₃</td><td>F</td></tr><tr><td>eau</td><td>H₂O</td><td>H</td></tr><tr><td>gel de tobermorite</td><td>silicates de calcium hydratés</td><td>CSH</td></tr></table>	Dénomination:	Formule complète:	Formule abrégée:	chaux	CaO	C	silice	SiO ₂	S	alumine	Al ₂ O ₃	A	oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	F	eau	H ₂ O	H	gel de tobermorite	silicates de calcium hydratés	CSH	
Dénomination:	Formule complète:	Formule abrégée:																					
chaux	CaO	C																					
silice	SiO ₂	S																					
alumine	Al ₂ O ₃	A																					
oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	F																					
eau	H ₂ O	H																					
gel de tobermorite	silicates de calcium hydratés	CSH																					

Tableau 3 - Changements de couleur dans des bétons siliceux chauffés

300°C	normal	non affecté
	rose	d'apparence correcte mais avec une réduction significative de résistance
600°C	gris blanchâtre	faible résistance à friable
900°C	couleur peau de chamois	

Interactions chimiques

Exemple : Sous l'action de la température, le carbonate de magnésium de certains granulats calcaires réagit avec le Ca(OH)_2 produit lors de l'hydratation du ciment portland.



Cette réaction est expansive et provoque l'affaiblissement et la dislocation du béton. Pour prévenir ce type de réaction,

- l'addition de cendres volantes (CV) est une solution. Les silicates des CV réagissent préférentiellement avec le Ca(OH)_2 , laissant les granulats indemnes et une quantité additionnelle de CSH, le constituant liant le ciment, se forme ;
- s'abstenir d'utiliser des granulats de dolomie qui sont riches en oxydes de magnésium.

L'éclatement explosif du béton (« spalling »)

Ce phénomène se manifeste surtout dans les poutres en béton précontraint où les contraintes thermiques résultant du front de déshydratation viennent se superposer aux contraintes très élevées existant dans le béton et où l'âme est bridée par des semelles plus massives. Le bridage d'un élément de construction est l'action d'enraver, de bloquer les déformations de cet élément. L'analyse de la stabilité d'un élément de construction doit tenir compte de la superposition de ces contraintes.

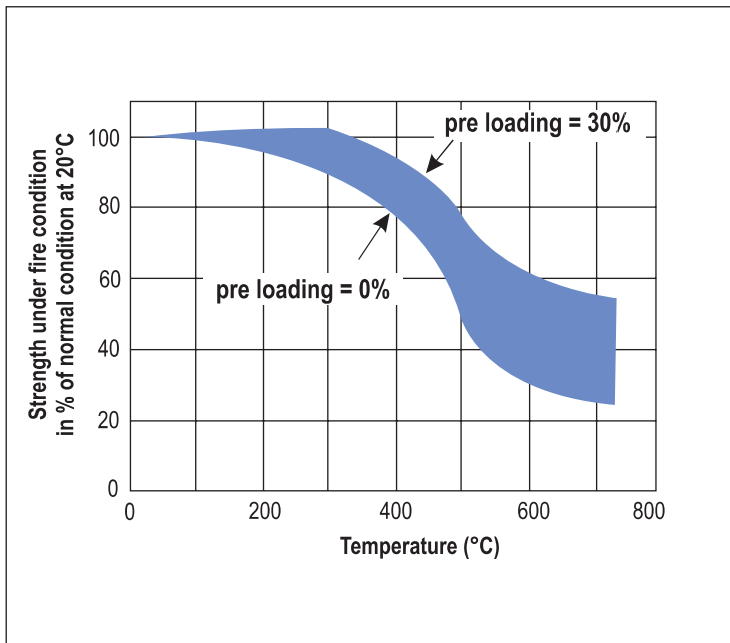
Pour éviter l'éclatement explosif du béton, l'Eurocode limite la contrainte de compression dans le béton en imposant une épaisseur d'âme minimale selon la durée de résistance recherchée (voir § 8.4.2). Cette imposition vise à éviter la rupture brutale de l'âme de la poutre.

Comportement physique des éléments béton

Pour une colonne exposée au feu [4] sur les quatre côtés, par exemple, le béton s'échauffe rapidement en surface et veut se dilater. Sa dilatation est empêchée par le cœur de la colonne qui reste froid. Le cœur est sollicité en traction et l'extérieur de la colonne en compression.

Les contraintes thermiques se superposant aux contraintes résultant des charges appliquées, le béton extérieur, dont la résistance diminue avec l'élévation de la température, est soumis à des contraintes très élevées proches de la résistance ultime. Ces contraintes, combinées aux effets résultant du front de déshydratation et à la dilatation des barres, expliquent les éclats de béton qui sont observés lors des essais. Ces éclats concernent en premier lieu le béton de recouvrement des armatures des coins, ensuite les bétons sur les faces des colonnes. Ils réduisent la section de la colonne et augmentent la flexion, car, localement, l'excentricité de la charge augmente. En outre, les armatures mises à nu s'échauffent plus rapidement qu'aux endroits où elles restent protégées par le béton.

Fig. 9 - Résistance résiduelle en compression du béton
[source: BCA]



5.2. Les résistances résiduelles des bétons et des aciers

Les résistances résiduelles des bétons

Il n'est pas possible, dans le cadre de ce bulletin, de reprendre l'ensemble des paramètres affectant la résistance résiduelle des bétons après incendie. Nous mentionnons seulement :

- le taux de chargement durant le cycle thermique : l'application d'une charge de compression, durant la chauffe et le refroidissement, peut augmenter de 30 à 40% la résistance résiduelle en compression pour des températures maximales de 300 à 500 °C (fig. 9). Il en est de même pour la résistance durant l'incendie.
- le traitement thermique durant le refroidissement : la trempe brusque (dans de l'eau) d'échantillons, chauffés au-delà de 400 °C, peut provoquer 40% de diminution de la résistance résiduelle par comparaison avec un refroidissement progressif.

Ces phénomènes sont fondamentaux pour apprécier les résultats de tests. Les résistances résiduelles tendent à être plus faibles que les résistances à chaud.

Les résistances résiduelles des armatures [12]

Contrairement aux propriétés à chaud, les propriétés résiduelles des armatures ordinaires et à haute limite élastique ont fait l'objet de peu d'attention.

Les armatures laminées à chaud Tempcore ($f_y = 500$ MPa) tendent à retrouver la totalité de leur résistance après un cycle thermique jusqu'à 500 °C. Elles perdent 30% de leur résistance ultime et 40 à 50% de leur limite élastique après leur exposition à une température de 850 °C (fig. 10).

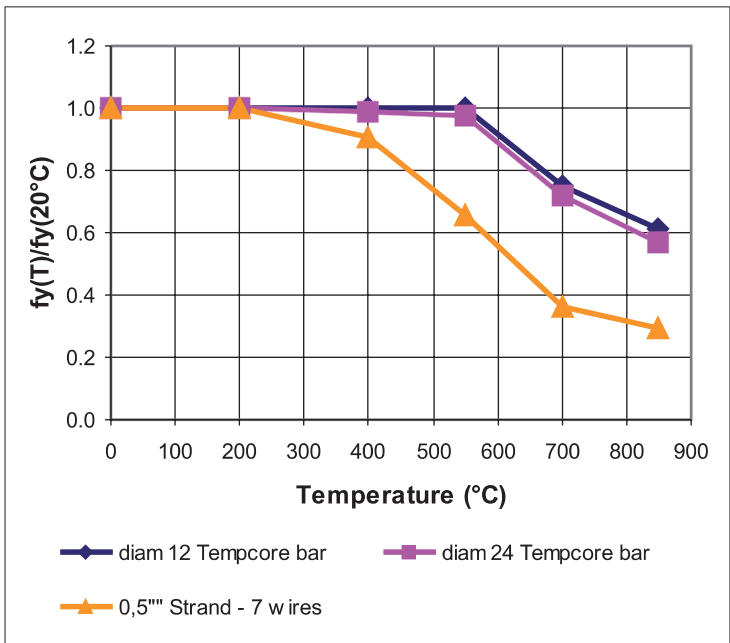
Il faut insister sur le fait qu'il est fait ici mention de température des aciers et non pas de température de surface du béton considéré dans un cycle thermique transitoire tel celui d'un incendie.

Les câbles de précontrainte ($f_y = 1600$ MPa) tendent à retrouver 90% de leur résistance après un cycle thermique culminant à 400 °C. Ils perdent 70% de leur résistance ultime après leur exposition à une température de 850 °C. Après leur exposition à 850 °C, on observe :

- une perte de précontrainte liée à la relaxation des câbles ;
- une chute de résistance des mêmes câbles et
- une chute du module d'élasticité du béton.

Dès lors, ces câbles n'apportent plus qu'une faible contribution à la résistance résiduelle de l'élément en béton.

Fig. 10 - Limite élastique de quelques aciers en fonction de la température d'exposition préalable [12]



6. LES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU BÉTON ET DE L'ACIER

6.1. Le béton normal (jusque C50/60)

Le graphique ci-contre (fig. 11) montre l'évolution de la résistance du béton en fonction de la température et du type de granulats utilisés [2].

L'EC2 feu [2] précise que les bétons contenant au moins 80 % en masse de granulats calcaires sont considérés comme des bétons à granulats calcaires.

L'utilisation des valeurs tabulées (voir plus loin) n'impose **aucune vérification** concernant l'éclatement pour le béton de densité normale ($2000 \leq \rho \leq 2600 \text{ kg/m}^3$). Cependant, si la distance de l'axe de l'armature au parement est supérieure ou égale à 70 mm, alors il faut prévoir des armatures de peau pour s'opposer à d'éventuelles **chutes de béton**. Le treillis de peau disposera d'une maille inférieure à 100 par 100 mm et d'armatures de diamètre supérieur ou égal à 4 mm.

Si d'autres méthodes de calcul sont utilisées, il y a lieu de considérer le phénomène de l'éclatement.

L'**éclatement explosif** est improbable lorsque la teneur en eau du béton est inférieure à k % du poids total du béton. Au-dessus de k %, il convient d'étudier plus précisément l'influence de la teneur en eau, du type de granulat, de la perméabilité du béton et de la vitesse d'échauffement.

Dans chaque pays membre du Comité Européen de Normalisation, le CEN, la valeur de k à utiliser sera fournie dans son Annexe Nationale. Au niveau européen, la valeur recommandée est 3.

On peut supposer que lorsque les éléments sont conçus pour une application intérieure (classe d'environnement EI selon la NBN B15-001), la teneur en eau de ces éléments est inférieure à k % du poids du béton, avec $2,5\% < k < 3,0\%$.

Attention ! Il ne faut pas confondre avec l'éclatement « explosif » des manifestations qui pourraient être qualifiées de « mineures » comme l'écaillage, l'éclatement des granulats ou celui des arêtes.

6.2. Les bétons haute résistance (fig. 12)

La considération des bétons haute résistance (BHR) dans l'EC2 est tout à fait neuve tant pour le calcul des bétons à « froid » qu'à « chaud ».

Les classes recommandées par l'EC2 feu sont :

- la classe 1 pour les C55/67 et C60/75 ;
- la classe 2 pour les C70/85 et C80/95 ;
- la classe 3 pour les bétons C90/105.

Les règles de l'Eurocode 2 feu précisent également les cas où il faut prendre clairement des mesures spéciales vis-à-vis de l'éclatement.

Pour les classes de béton C55/67 à C80/95, les règles données pour le béton normal ci-dessus s'appliquent, pour autant que la teneur maximale en fumées de silice soit inférieure à 6% du poids de ciment. Pour des teneurs en fumées de silice supérieures, les règles données pour les classes de béton $80/95 < C \leq 90/115$ s'appliquent.

La limitation à des bétons BHR C80/95, avec une teneur maximale en fumées de silice de 6% du poids de ciment, permet de s'affranchir de l'utilisation de fibres de polypropylène monofilamentaires, conformément aux règles de la norme Eurocode 2, partie feu.

La résistance au feu des colonnes en BHR des tours North-Galaxy à Bruxelles (photo) a été justifiée par calcul par l'Université de Liège à l'aide de son programme SAFIR classé dans les méthodes avancées.

L'utilisation d'éléments en béton préfabriqué dans les immeubles tours confirme les avantages par rapport à d'autres systèmes :

- assurance d'une résistance au feu de deux heures sans protection complémentaire ;
- rapidité d'exécution ;
- déformation limitée des planchers ;
- meilleure isolation acoustique des planchers ;
- prix plus que compétitif.

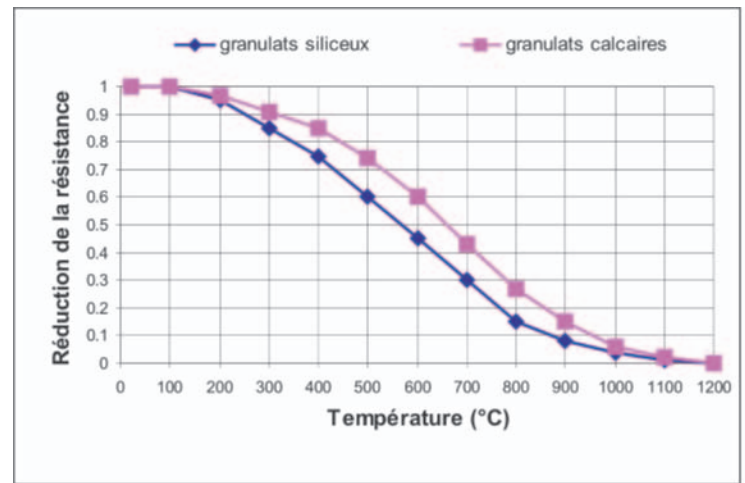


Fig. 11 - Evolution de la résistance du béton en fonction de la température et du type de granulats [2]

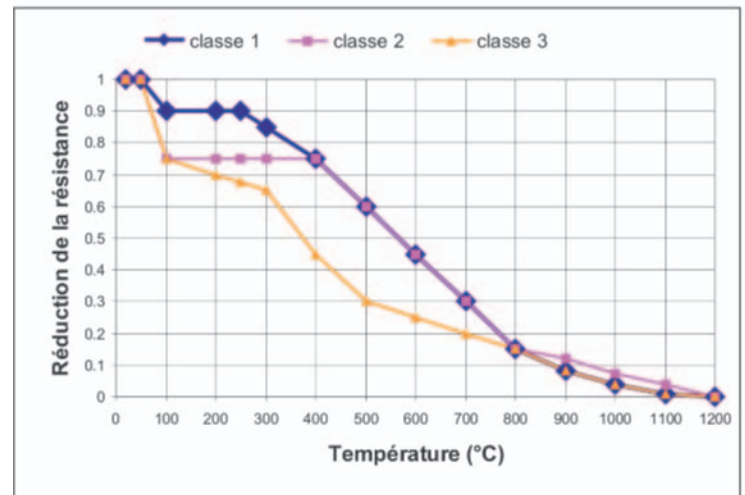


Fig. 12 - Diminution de la résistance à la compression des bétons haute résistance. Les classes sont fonction de la résistance. [2]

Les tours North-Galaxy à Bruxelles [source: ERGON].



Pour les classes de béton $80/95 < C \leq 90/115$, l'éclatement peut se produire en toute situation pour le béton exposé directement au feu et il convient d'appliquer au moins l'une des 4 méthodes suivantes :

– *Méthode A* : placer un grillage d'armatures avec un enrobage nominal de 15 mm. Il convient que ce grillage comporte des fils d'un diamètre supérieur ou égal à 2 mm, avec un pas inférieur ou égal à 50 x 50 mm. Il convient que l'enrobage nominal de l'armature principale soit supérieur ou égal à 40 mm.

Nous déconseillons cette méthode car le bon maintien en place de ce grillage lors du bétonnage n'est pas acquis a priori. Le grillage peut se trouver proche de la surface dans la zone superficielle de 20 mm du béton avec les risques associés de carbonatation. L'enrobage nominal prescrit est inférieur à ceux prescrits dans l'EN1992-1-1 pour toutes les classes d'exposition.

– *Méthode B* : utiliser un type de béton pour lequel il a été démontré (par expérience locale ou par des essais) qu'il n'existait pas de risque d'éclatement du béton exposé au feu.

– *Méthode C* : utiliser des revêtements de protection pour lesquels il a été démontré qu'il n'existait pas de risque d'éclatement du béton exposé au feu.

– *Méthode D* : utiliser un mélange de béton qui contient plus de 2 kg/m³ de fibres de polypropylène monofilamentaires.

Cette dernière méthode est celle que nous recommandons à défaut de démonstration par les méthodes B et C.

6.3. Comparaison acier-béton

Les chutes de résistance du béton et de l'acier, selon l'EC2 feu [2], sont portées ci-dessous sur un même graphique (fig. 13). Pour l'acier, c'est la courbe 3 relative à une déformation de l'acier inférieure à 2‰ qui est portée sur le graphique.

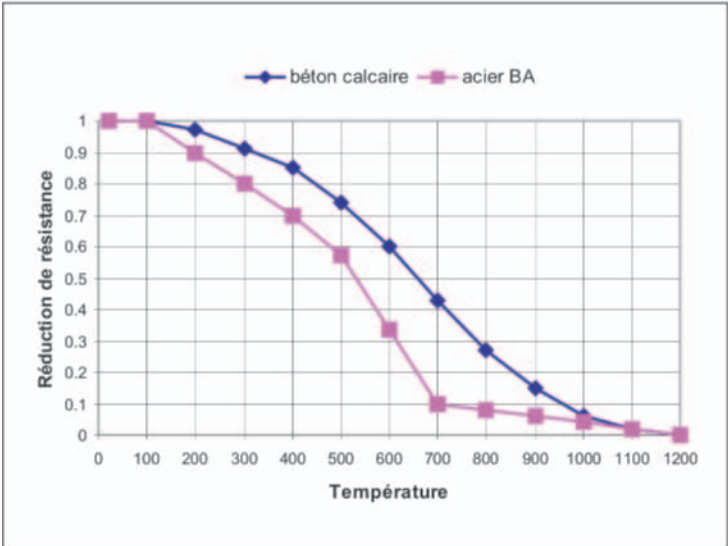
Les chutes de rigidité du béton et de l'acier sont également portées sur un même graphique (fig. 14).

Ce graphique n'est pas commun : il montre que la chute relative de rigidité est plus forte pour le béton que pour l'acier ! Ceci reflète la capacité pour le béton, comme exprimé plus haut, de s'accommoder du bridage.

Cette chute importante de rigidité du béton à température élevée influence relativement peu la rigidité des éléments comprimés en béton, puisque seuls les premiers centimètres à partir de la surface sont affectés.

Par contre, la diffusivité thermique de l'acier, 25 fois plus élevée que celle du béton (§7) combinée avec une faible massivité des pièces, influence gravement le comportement au flambage des pièces en acier (voir photo).

Fig. 13 - Chute de résistance du béton et de l'acier



6.4. La résistance de l'acier de précontrainte

La diminution de résistance est beaucoup plus rapide pour les aciers de précontrainte (fig. 15). Ceci explique l'accroissement d'épaisseur d'enrobage dans les méthodes de valeurs tabulées (§8.4.4) par rapport aux aciers ordinaires :

- 10 mm pour les barres et
- 15 mm pour les torons.

La classe B correspond à une des classes de sécurité. Chaque pays peut déterminer son choix de sécurité : le niveau de sécurité est bien une compétence nationale. Au niveau belge, le choix de classe sera effectué prochainement.

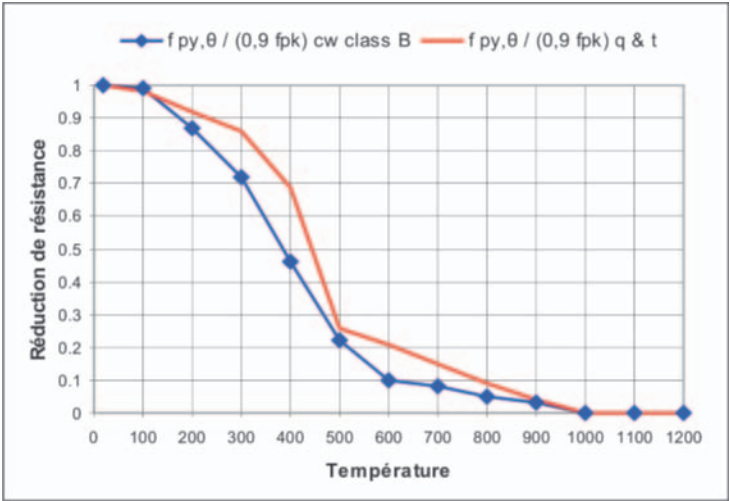


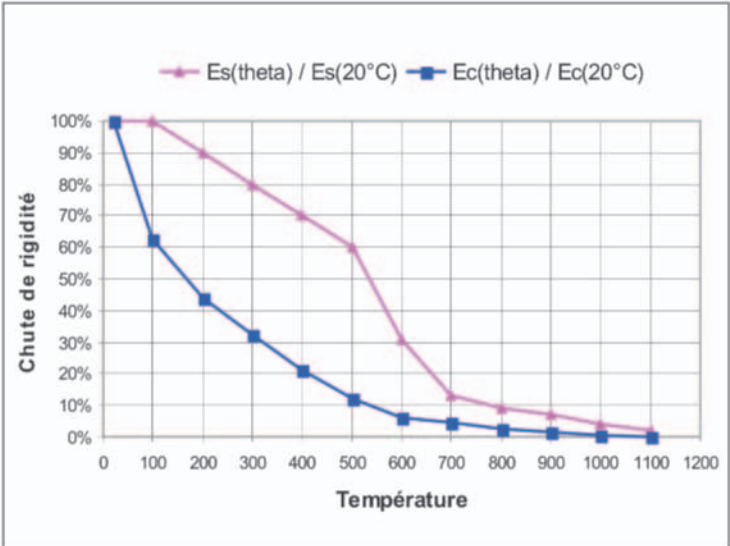
Fig. 15 - Facteur $k_p(\theta)$ applicable pour la diminution de la résistance caractéristique $\beta \cdot f_{pk}$ de l'acier de précontrainte [2]

- courbe $f_{py, \theta} / (0,9 f_{pk})$ cw class B :
acier de précontrainte formé à froid (torons et fils) classe B
- courbe $f_{py, \theta} / (0,9 f_{pk})$ q & t :
acier de précontrainte trempé et revenu (barres)

Flambage des profilés en acier.



Fig. 14 - Chute de rigidité du béton et de l'acier [source : FEBELCEM]



[illegible]

8. LA VÉRIFICATION DE LA RÉSISTANCE AU FEU : CALCUL

8.1. Les actions mécaniques

La combinaison à froid 1,35G + 1,5Q
devient à chaud G + ψ_iQ + A_d

avec :
ψ_i = 0,5 pour les bâtiments privés, résidentiels et de bureau ;
0,7 pour les bâtiments commerciaux et les lieux recevant du public ;
0,9 pour les charges de stockage (bibliothèques,...)
G = poids mort ;
Q = charge d'exploitation et
A_d = la valeur de calcul de l'action thermique indirecte due à l'incendie (bridage, déplacement).

Le rapport maximum entre les combinaisons de charge à chaud et à froid est de 0,7. La plupart des valeurs tabulées sont basées sur ce taux de chargement η_{fi}=0,7.

8.2. Coefficients de sécurité sur les matériaux béton et acier

Tableau 5 - Coefficients de sécurité sur les matériaux

	A froid	A chaud
Béton	1,76 (*)	1
Acier armatures	1,15	1
Structures acier	1,1 (**)	1
(*) 1,76 = 1,5 / 0,85 (**) selon ENV 1993-1-1 NAD (1995)		

8.3. Trois méthodes, trois niveaux de calcul

Il est important que les architectes et les prescripteurs distinguent l'existence des 3 méthodes, associées chacune à un niveau de calcul. Seule la méthode 1 sera détaillée plus loin. Elle offre un maximum de pertinence et de simplicité pour les structures béton. Pour les autres méthodes, le lecteur consultera utilement des revues [10] ou directement la NBN EN1992-1-2 [2].

La partie feu des Eurocodes présente trois types, trois niveaux de modèles pour le calcul de la résistance au feu des structures [10]. Au niveau fédéral, un texte a déjà été rédigé concernant l'acceptation par les autorités compétentes des notes de calcul selon ces différentes méthodes. Dans le futur, ce texte fera l'objet d'un arrêté royal [18]. Du plus simple au plus complexe :

Le niveau 1 : calculs par valeurs tabulées

L'usage de cette méthode serait de la responsabilité du bureau d'étude contrôlé par la commune, elle-même conseillée par les Services incendie.

La norme européenne EC2 partie 1-2 permet de vérifier, pour un feu ISO, les poutres, colonnes, murs et dalles en béton armé ou précontraint. Cette norme se base sur des tableaux (*tabulated data*) qui fournissent les dimensions minimales des sections ainsi que la distance de l'axe (axis distance) des armatures jusqu'au parement le plus proche. Les valeurs fournies par ces tableaux ont été calculées soit après calibrage des caractéristiques du matériau et des modèles de calcul, soit sont déduites de formules empiriques calibrées à partir d'essais.

L'Eurocode maçonnerie partie 1-2 précise l'épaisseur minimale à donner aux murs en fonction du type de blocs utilisés (voir tableau 1).

Les tableaux prenant en compte le taux de chargement pour les murs et les colonnes en béton armé ou précontraint permettent d'affiner le résultat.

Ce type de vérification est considéré de même accessibilité qu'un calcul à froid.

Le niveau 2 : modèles simplifiés de calcul

L'usage de cette méthode serait également de la responsabilité du bureau d'étude, contrôlé par la commune, elle-même conseillée par les Services incendie sur base d'attestations de conformité :

soit le bureau d'étude est certifié par un organisme de certification accrédité BELAC (EN 45013) et il atteste lui-même la conformité de sa note de calcul ;

soit le bureau d'étude n'est pas certifié et la conformité doit être attestée par un organisme de certification accrédité BELAC (EN 45004).

Un calcul plus poussé de niveau 2 utilise la même démarche que pour le dimensionnement à froid. Elle intègre en plus la perte de résistance du béton et des armatures en fonction de leur température (*fig. 17-18*). Leur température est déterminée, pour un feu ISO, soit à l'aide d'abaques, soit à l'aide d'un programme effectuant l'analyse thermique pour la section étudiée. Si la capacité de résistance est supérieure aux sollicitations, l'élément de structure aura dès lors une durée de résistance au feu au moins égale à la durée recherchée.

Le niveau 3 : modèles avancés de calcul

Les notes de calcul recourant à ces modèles avancés ne sont acceptées qu'au cas par cas par la Commission de dérogation du Service Public Fédéral de l'Intérieur.

Ces modèles avancés nécessitent des programmes de calcul sophistiqués, exigeant un haut degré de connaissance. Ces modèles peuvent réaliser une analyse thermique des éléments sous des feux naturels. La sollicitation thermique peut être couplée avec une analyse mécanique complète de la structure, entre autres par éléments finis. Il convient de considérer les grands déplacements, afin de prendre en compte les sollicitations du second ordre. Le logiciel SAFIR de l'Université de Liège est couramment utilisé.

Les deux premières méthodes font référence à la courbe standard ISO d'échauffement. Seule la méthode de niveau 3 peut prendre en considération d'autres conditions. En outre, les Eurocodes donnent des règles de dispositions constructives à respecter.

Pour le béton, le niveau 1 permet une **vérification immédiate** pour les poutres et dalles. Une approche conservatrice en guise de prédimensionnement – en prenant un taux de chargement de 0,7 – donne **immédiatement les sections minimales** des colonnes et les épaisseurs des murs.

Les méthodes de niveau 2 et 3 permettent d'affiner les résultats et de prendre en compte les réserves structurales offertes par l'hyperstaticité éventuelle de la structure : la continuité des armatures supérieures au droit des appuis et les effets bénéfiques de membrane dans les planchers monolithiques sont autant d'exemples.

Les concepteurs de structures métalliques ou structures mixtes acier-béton exploitent au maximum ces dernières méthodes dans leur démonstration de la tenue des bâtiments au feu.

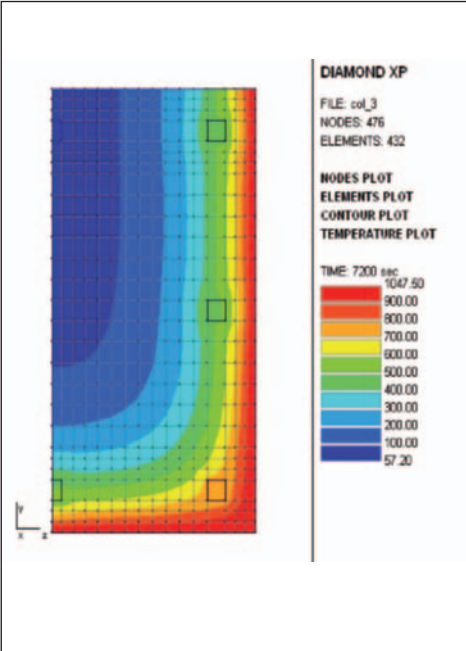


Fig. 17 - Détermination des températures par programme suivie d'un calcul mécanique (poutre rectangulaire) - calcul par logiciel SAFIR (ULg)

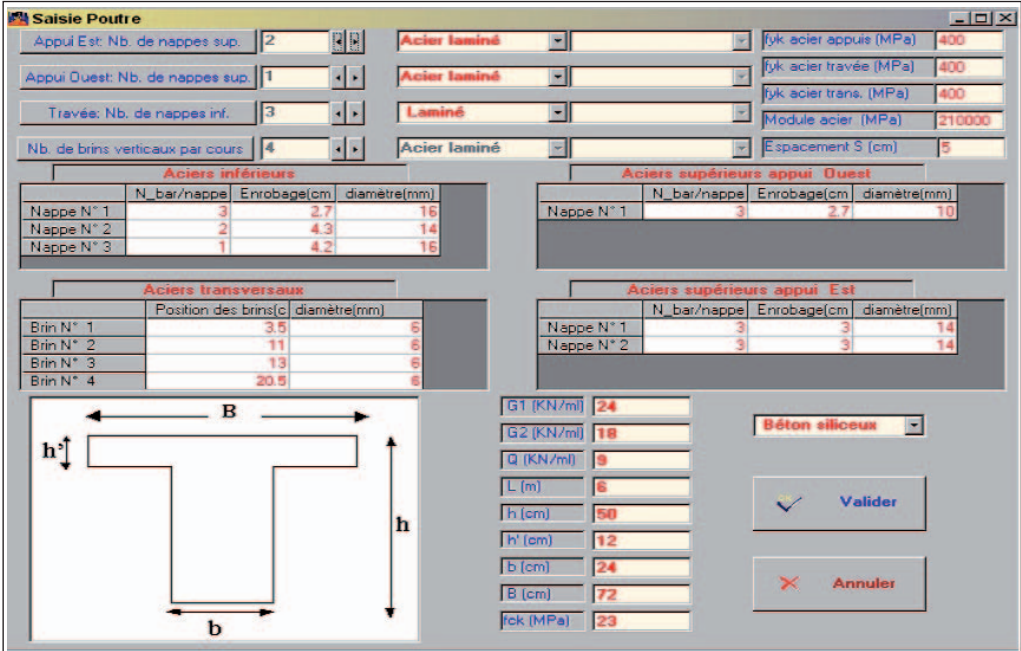


Fig. 18 - Exemple de programme convivial pour le calcul au feu : logiciel CIMFEU (selon DTU français)

Les différentes approches de calcul au feu sont :

- la classification basée sur la courbe standard ISO,
- l'usage des feux paramétriques et
- l'usage des courbes de feux naturels couplées avec des coefficients réducteurs sur les charges calorifiques. Ceci est un des développements du Fire Safety Engineering (FSE)

Elles ne conduisent pas au même niveau de sécurité !

Les propriétaires des bâtiments et les compagnies d'assurances doivent se rendre compte que les structures en béton sont normalement classées selon la courbe standard ISO. Elles sont robustes, peuvent être réparées après un incendie et il est possible d'effectuer des changements durant la vie du bâtiment.

La température critique des structures en acier sans protection au feu est selon les prénormes européennes de 540 °C. Cette température est atteinte dans les 10 à 15 minutes en fonction de la massivité des éléments. Leur limite de stabilité est alors atteinte si le taux de chargement est de 0,7. C'est pourquoi l'industrie de l'acier a développé des méthodes de calcul pour montrer que les températures

sont beaucoup plus basses que celles rencontrées dans un feu ISO. Cette industrie montre également que les charges mécaniques peuvent être inférieures à celles requises pour une classification standard selon la courbe ISO. L'industrie du bois partage les mêmes intérêts.

Même si les exigences peuvent être satisfaites au moyen de courbes paramétriques ou du FSE, les propriétaires des bâtiments ont **davantage de sécurité et de flexibilité pour le même prix s'ils choisissent le béton** avec une classification standard.

Dans sa partie la plus avancée, le « Fire Safety Engineering » tient compte par le biais des coefficients réducteurs de l'action des occupants, des services de secours, des sprinklers, des alarmes et autres, pour compenser un manque de résistance inhérent au feu.

Ces outils sont relativement neufs [26] et **seules des personnes très qualifiées et averties doivent les manipuler**.

De plus, une dérogation auprès des autorités compétentes doit être introduite pour en tirer les bénéfices.

L'EC2 feu donne des valeurs tabulées pour les colonnes, les poutres, les planchers et les murs porteurs ou non porteurs.

8.4.1. Domaine d'application

- Les tableaux couvrent des durées d'exposition au feu normalisées de la courbe ISO jusqu'à 240 minutes ;
- Les bétons doivent avoir une masse comprise entre 2000 et 2600 kg/m³ ;
- Dans le cas de granulats calcaires, les dimensions minimales des sections peuvent être réduites de 10% sauf pour les colonnes ;
- L'utilisation de cette méthode dispense de toute vérification complémentaire de torsion, d'effort tranchant, d'ancrage des armatures et d'éclatement (tout en gardant l'imposition éventuelle de « treillis de peau », voir § 6.1). Il faut noter que les ruines par effort tranchant sont très rares.
- Attention néanmoins : dans le cas de BHR (de classe supérieure à C50/60), l'utilisation des tableaux est conditionnée par des règles complémentaires.

8.4.2. Lecture des tableaux

En fonction de la durée d'incendie requise et, éventuellement du niveau de chargement, les tableaux fournissent des couples de valeurs du type 200/35. La première valeur correspond à la dimension minimale de la section droite de la pièce ($b_{\min}$). La deuxième valeur correspond à « a », la distance de l'axe de l'armature longitudinale jusqu'au parement le plus proche.

Tableau 6 - Dimensions et distances de l'axe des armatures au parement minimales pour les poutres sur appuis simples sans moment sur appuis en béton armé et précontraint [2]

Résistance au feu normalisé	Dimensions minimales (mm)						
	Combinaisons possibles de a et $b_{\min}$ avec a = distance moyenne des axes des armatures au parement et $b_{\min}$ = largeur de la poutre				Epaisseur d'âme minimale b_w		
					Classe WA	Classe WB	Classe WC
1	2	3	4	5	6	7	8
R 30	$b_{\min} = 80$ $a = 25$	120 20	160 15 (*)	200 15 (*)	80	80	80
R 60	$b_{\min} = 120$ $a = 40$	160 35	200 30	300 25	100	80	100
R 90	$b_{\min} = 150$ $a = 55$	200 45	300 40	400 35	110	100	100
R 120	$b_{\min} = 200$ $a = 65$	240 60	300 55	500 50	130	120	120
R 180	$b_{\min} = 240$ $a = 80$	300 70	400 65	600 60	150	150	140
R 240	$b_{\min} = 280$ $a = 90$	350 80	500 75	700 70	170	170	160

$a_{sd} = a + 10 \text{ mm}$
 a_{sd} est la distance de l'axe des aciers à la paroi latérale de la poutre dans le cas des armatures d'angle (câble ou fil) des poutres présentant un seul lit d'armatures.
 Pour les valeurs de $b_{\min}$ supérieures à celles données dans la colonne 4, aucune augmentation de la valeur de a_{sd} n'est requise.

Il convient de prendre en compte, pour les poutres précontraintes, l'augmentation de la distance d'axe des aciers au parement conformément au § 8.4.3.

(*) L'enrobage exigé par l'EN 1992-1-1 est normalement déterminant.

8.4.4. Enrobage à l'axe

- Dans le cas de **plusieurs lits d'aciers** (notamment dans les poutres), « a » désigne ici : « am » = barycentre des aciers. Chaque barre doit néanmoins respecter un « a » minimum ;
- Dans le cas de poutres à un seul lit d'aciers, la valeur « a » des armatures d'angles devra être augmentée de 10 mm par rapport à celle donnée dans les tableaux ;
- Les tableaux sont basés sur une température 'critique' de l'acier :
 - 500 °C pour les aciers de béton armé,
 - 400 °C pour les barres de précontrainte,
 - 350 °C pour les fils et torons de précontrainte.Cette différence de température critique peut-être traduite par une majoration d'enrobage dans le cas de précontrainte. Ainsi, dans le cas des aciers de précontrainte, les mêmes tableaux que pour le béton armé peuvent être utilisés en majorant la distance « a » de :
 - 10 mm pour les barres de précontrainte et
 - 15 mm pour les torons et fils de précontrainte.

Ajustement de l'enrobage : pour les poutres et les dalles, lorsque la section des **armatures à froid est surabondante et pour un taux de chargement η_{tr}** , l'EC prévoit une procédure simple, sur la base de températures critiques. Pour les éléments sur appuis simples fléchis, elle permet de réduire l'enrobage donné dans les tableaux.

8.4.5. Poutres continues

L'EC2 fournit un tableau semblable à celui des poutres isostatiques avec des distances à l'axe « a » réduites.

Nous nous contenterons de signaler l'importance, dans les structures continues, de prolonger sur toute la travée les armatures supérieures prévues au droit des appuis, du moins une partie, pour rencontrer l'apparition de moments négatifs (fig. 20). Ces derniers apparaissent en travée, suite aux gradients thermiques dans les sections.

8.4.6. Dalles

Le graphique ci-contre (fig. 19), extrait de l'EC2, donne la distribution de température pour un écoulement thermique unidimensionnel, distribution qui s'applique pour les dalles. Ces mêmes courbes sont utilisées pour les dalles alvéolaires appelées plus communément hourdis.

L'EC2 feu fournit des tableaux pour

- les dalles sur appuis linéaires simples sans moment aux appuis à un ou deux sens porteurs en béton armé ou précontraint ;
- les dalles continues ;
- les planchers-dalles. Ce sont les planchers reposant sur des colonnes ;
- les planchers nervurés dans un ou deux sens. Un plancher-caisson, par exemple, est un plancher nervuré dans lequel les nervures et les armatures inférieures sont disposées dans les deux sens de portée.

8.4.7. Les colonnes

Pour la vérification de la résistance au feu des poteaux, deux méthodes sont fournies : A et B. Les deux méthodes peuvent être utilisées indifféremment dans leur champ d'application.

Elles prennent en compte :

- la taille et l'élancement des colonnes ;
- le niveau de chargement ;
- l'excentricité du premier ordre ;
- la résistance du béton ;
- l'armatures et enfin
- la distance de l'axe des barres au parement.

Les valeurs tabulées sont indiquées uniquement pour des structures contreventées. Ainsi, des colonnes d'un bâtiment supportant des planchers reliés à un noyau central sont typiquement contreventées.

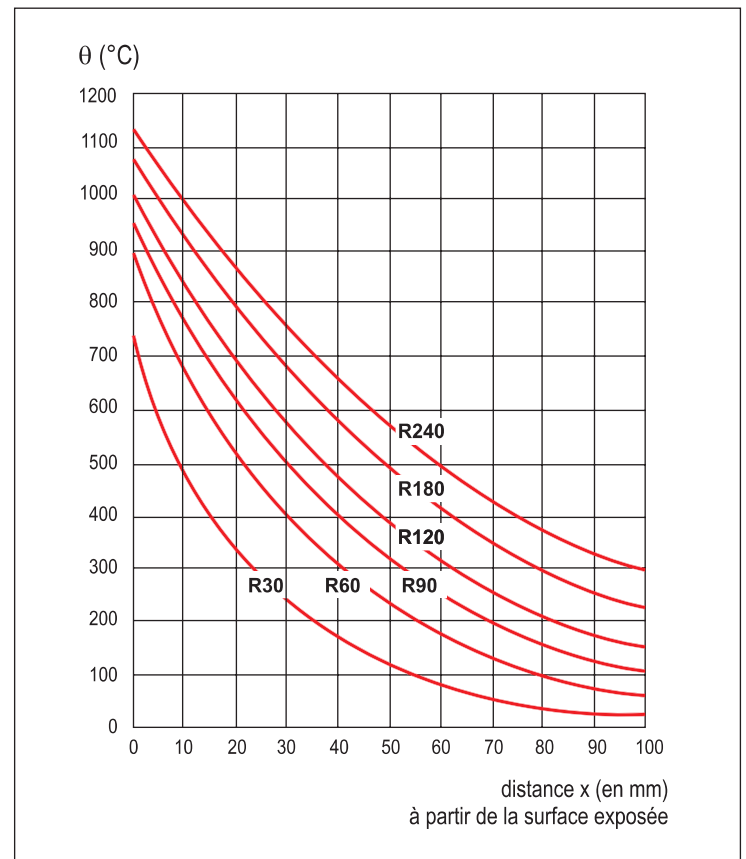


Fig. 19 - Distribution des températures dans les dalles pour R60 à R240 (épaisseur $h = 200$ mm) [2]

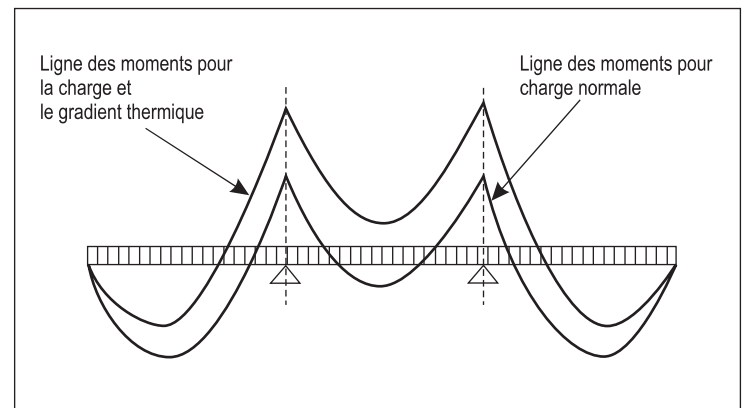


Fig. 20 - Augmentation des moments aux appuis pour les structures continues [11]

8.4.8. Voiles

L'EC2 feu fournit des tableaux pour

- les voiles porteurs ;
- les voiles non-porteurs (exigence EI) ;
- les voiles coupe-feu (rencontrant l'exigence complémentaire de résistance aux chocs).

POURQUOI CHOISIR UNE STRUCTURE BÉTON ?

Le béton est spécifié dans les bâtiments et dans les projets de génie civil pour plusieurs raisons : question de coût, de vitesse de construction, d'esthétique ou d'apparence architecturale. Néanmoins, un des bénéfices majeurs, inhérent au béton, est sa performance en cas d'incendie et ce, sans surcoût, élément qui peut s'avérer prédominant au regard des facteurs affectant le processus de décision lors de la conception d'un projet.

Le béton et les structures en béton présentent des caractéristiques particulièrement favorables :

- Le béton est, avec la maçonnerie, le seul matériau porteur capable de résister remarquablement à un incendie, **sans mesure de protection** complémentaire de quelque nature que ce soit, comme un revêtement de plâtre ou de peinture intumescente. Ses propriétés relatives au comportement face au feu ne se modifient pas dans le temps. Elles restent **permanentes**, sans dépenses supplémentaires en maintenance. Le simple choix du béton constitue un élément important dans les mesures de sécurité préventives contre l'incendie ;
- Le béton offre d'une façon économique la résistance exigée : il suffit le plus souvent de vérifier l'**enrobage** et les dimensions minimales indiqués dans les tableaux des normes de calcul. Cette approche simple par tableaux ne nécessite pas le recours à tout l'art complexe du « *Fire Safety Engineering* » ;
- Les structures portantes en béton offrent une résistance très élevée lors des incendies. Ainsi dans les grands bâtiments à plusieurs étages, le béton **réduit les risques** pour les occupants de ce type de bâtiments et pour les services d'incendie. Ces derniers peuvent pénétrer dans le bâtiment et intervenir de façon rapprochée et donc efficace ;
- Grâce à leur **inertie thermique** et leur **massivité**, les éléments en béton, contrairement aux profilés métalliques non protégés, résistent très longtemps à des températures élevées, avec un minimum de déformations. Les armatures d'un béton armé n'atteignent qu'après 2 heures leur température critique de 500 °C, à une profondeur de 3,5 cm. Un béton d'agréats légers peut répondre à des exigences encore plus élevées. Il constitue une barrière efficace à la propagation du feu ;
- L'inertie thermique élevée des parois en béton présente également un intérêt considérable pour le **retardement** de l'embrasement généralisé (« *flashover* ») ;
- Le béton est **non combustible** : aucun élément en feu ne s'en détache ou n'en dégouline. Il ne fond pas. Le béton ne propage pas le feu et n'émet ni fumées, ni gaz toxiques, même dans les conditions les plus extrêmes de température ;

- Les parois coupe-feu en béton marient harmonieusement **résistance au feu**, **isolation acoustique** et **inertie thermique**. Le compartimentage effectif des grandes surfaces par des planchers et des murs en béton réduit le risque de perte totale en cas d'incendie. Ces éléments ainsi que les cages d'escaliers en béton offrent des **voies d'évacuation** sûres, simples et économiques ;
- Les constructions en béton fournissent, par leur sécurité intrinsèque au feu, une plus grande **liberté architecturale**. Les exigences au feu pèsent lourd pour d'autres matériaux qui doivent être protégés à l'aide de revêtements ou s'adjoindre des mesures de protections actives dont le béton ne s'encombre pas. De cette manière, l'architecte peut se concentrer pleinement sur sa création architecturale ;
- Les éléments structuraux en béton disposent en général de **réserve de sécurité** au feu qui peuvent être exploitées sans dépenses supplémentaires si les exigences de sécurité à l'incendie venaient à être relevées, notamment en cas de reconversion du bâtiment, comme c'est souvent le cas ;
- Les excellentes propriétés du béton sous incendie sont valorisées par les assureurs de biens immobiliers : les bâtiments en béton bénéficient des **primes d'assurance incendie les plus avantageuses** ;
- Le béton **ne craint pas l'eau**, souvent utilisée en grande quantité pour éteindre les incendies ;
- Grâce à sa capacité de compartimentation des espaces, le béton empêche la propagation des incendies et réduit par là l'**impact environnemental** associé. L'attaque du béton par le feu ne génère pas de résidus toxiques ;
- De par la protection qu'il offre, le béton permet la **continuité des activités** dans les installations d'intérêt vital. Il protège également les compartiments qui abritent notre **patrimoine culturel** ;
- L'usage d'éléments préfabriqués en béton permet une **rapidité d'exécution** très appréciée ;
- Les planchers en béton sont sujets à de **faibles déformations**, en regard d'autres matériaux ;
- Après un incendie, le béton offre également une **restauration simple** et peu coûteuse.

RESTAURATION DES STRUCTURES - ENSEIGNEMENTS TIRÉS D'INCENDIES

La « *Concrete Society* » (UK) a investigué un nombre important de structures différentes endommagées par des incendies en Grande-Bretagne [6][8].

L'investigation rassemblait des informations détaillées sur la performance, l'évaluation et la réparation de plus de 100 structures comprenant des logements, des bureaux, des entrepôts, des usines et des parkings pour voitures. Les constructions étaient à un étage ou à étages multiples. Les types de constructions examinées incluaient des dalles champignons et d'autres reposant sur un réseau de poutres, poutres et colonnes associées pour des structures tant coulées sur place que préfabriquées et tant armées que précontraintes.

L'examen de la liste des dégâts et des réparations a montré que :

- la plupart des structures ont été réparées. Parmi celles qui ne l'ont pas été, nombreuses sont celles qui auraient pu l'être mais qui ont été démolies pour d'autres raisons que les dommages subis ;
- presque toutes les structures se sont correctement comportées durant et après l'incendie.

Les structures en béton incendiées peuvent en général être restaurées là où des structures en d'autres matériaux seraient irrémédiablement endommagées, même par des charges d'incendie moindres.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] NBN EN 1992-1-1 : 2005 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments
- [2] NBN EN 1992-1-2 : 2005 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-2 : Règles générales - Calcul du comportement au feu
- [3] NBN EN 13501-1:2002 : Classement au feu des produits et éléments de construction - Partie 1 : Classement à partir des données d'essais de réaction au feu
- [4] BRÜLS A. ; VANDEVELDE P.
Sécurité contre l'incendie dans les bâtiments, partie 1 : prévention passive
ISIB, mai 2000
- [5] DOTREPPE J.C. ; BRÜLS A.
Résistance au feu des constructions, application des Eurocodes dans le cadre de la formation « Fire Safety Engineering »
2000
- [6] *Concrete and Fire, using concrete to achieve safe, efficient buildings and structures*
The Concrete Centre, 2004
www.concretecentre.com
- [7] GULVANESESIAN H. ; CALGARO J.A. ; HOLICKY M.
Designers' Guide to EN 1990 Eurocode : Basis of structural design
2002
- [8] *Assessment and repair of fire-damaged concrete structures*
Technical Report n° 33
Concrete Society, 1990.
- [9] PICARD Y.
Construction et incendie : les solutions - Les constructions privées et industrielles, les infrastructures
Evolution de la réglementation belge en matière de sécurité incendie
Journée AILG du 19 novembre 2004
- [10] MARTIN Y.
La résistance au feu des constructions et les Eurocodes, 1^{ère} partie
Magazine CSTC, 3^{ème} trimestre 2001
- [11] *Conception de constructions en béton préfabriqué, Modèle de cours - Leçon 10 : Résistance au feu des constructions en béton préfabriqué*
Bruxelles : FEBE, 2005
- [12] BAMONTE P. ; FELICETTI R. ; GAMBAROVA P.G. ; MEDA A.
Guidelines for Structural Design of Concrete Buildings Exposed to Fire, Expertise and assessment of structures after fire
Milan University of Technology & University of Bergamo
(to be published)
- [13] *Fire Design of Concrete Structure, Material, Structures and Modeling, Guide to good Practice*
FIB
(to be published)
- [14] *Sécurité incendie*
Collection Mémento acier, 2002
- [15] *Le béton et l'incendie*
Bruxelles : FIC (FEBELCEM), octobre 1981
- [16] *Le béton et le feu : mécanisme des dégâts en cas d'incendie, éclatement : le phénomène comment l'éviter*
Magazine n°169
Bruxelles : ANPI, mars 2004
- [17] *Le comportement au feu des structures*
Commission nationale de recherches – incendie, 29 mai 1975
- [18] SPEHL P.
Appropriation des Eurocodes faite en Belgique
Journée d'étude LCPC
Paris : 13 juin 2005
- [19] www.bbri.be/antenne_norm/brand/french/home/norm_and_regl/norm_Europe/index.html
- [20] Décision de la Commission du 3 mai 2000 mettant en œuvre la directive 89/106/CEE du Conseil, en ce qui concerne la classification des caractéristiques de résistance au feu des produits de construction, des ouvrages de construction ou de parties de ceux-ci (2000/367/CE) (voir [19])
- [21] Décision de la Commission européenne du 8 février 2000 en ce qui concerne la classification des caractéristiques de réaction au feu des produits de construction (2000/147/CE) (voir [19])
- [22] GOFFINET D.
Evaluation du risque d'incendie dans les bâtiments à appartements multiples
Travail de fin d'études
Bruxelles : ECAM, 2004
- [23] *Usine Entreprise* n° 3031, novembre 2004
- [24] *Réaction au feu des produits de construction : le nouveau système européen*
CSTB Magazine n° 145, janvier-février 2003
- [25] SZOKE S.
Are We Protected From Fire in Buildings ?
Open forum, problems and solutions
PCI journal, janvier-février 2005
- [26] *Built to Burn ?*
Construction Manager, magazine of the CIOB, juin 2005
- [27] NECK U.
Challenge : comprehensive fire protection
CPI (Concrete Plant International), n° 5, octobre 2002
- [28] DOTREPPE J.C.
Construction et incendie : les solutions - Les constructions privées et industrielles, les infrastructures
Journée AILG du 19 novembre 2004
- [29] Présentation du 25-01-2006 de « Byggutengrenser.no » aux Compagnies d'assurances en Norvège. « Byggutengrenser.no » représente le secteur complet de la maçonnerie, du ciment et du béton en Norvège.
- [30] LUNDBERG O.
Brand i flerbodstadshus (Fire in multi family houses), Report on the cost of fire damages in relation to the building material of which the houses are constructed
(Cette étude se base sur les statistiques de la Fédération des assureurs suédois (Försäkringsförbundet) couvrant la période de 1995 à 2004 et limitées aux feux dont la couverture par les assurances est supérieure à € 150 000, mobilier exclu.)
- [31] *Conception des bâtiments d'activités en béton - Murs séparatifs coupe-feu et façades à fonction d'écran thermique en béton*
réf. B67
Paris : CIMBETON, mars 2006
- [32] AR 19 DECEMBRE 1997. Arrêté royal modifiant l'arrêté royal du 7 juillet 1994 fixant les normes de base en matière de prévention contre l'incendie et l'explosion, auxquelles les bâtiments nouveaux doivent satisfaire



ce bulletin est publié par :
FEBELCEM - Fédération de
l'Industrie Cimentière Belge
rue Volta 8 - 1050 Bruxelles
tél. 02 645 52 11
fax 02 640 06 70
www.febelcem.be
info@febelcem.be

auteur :
Ir J.F. Denoël

éditeur responsable :
J.P. Jacobs

dépôt légal :
D/2006/0280/04



Albert Cariaux

« Plus d'incendies désastreux », peut-on lire sur les plans du 'pont Hennebique' construit à Liège en 1905. Ce concepteur génial, inventeur de l'étrier en béton armé avait vite compris l'intérêt extraordinaire de ce matériau. Il en avait fait son slogan promotionnel.

Illustration couverture d'après CIMBETON