



Sécurité incendie et constructions en béton



Ir Jean-François Denoël

Cette publication est disponible auprès de :

FEBELCEM Fédération de l'industrie cimentière belge
Rue Volta 8
1050 Bruxelles
téléphone : 00 32 2 645 52 11
fax : 00 32 2 640 06 70
adresse électronique : info@febelcem.be
site web : www.febelcem.be

Ce document est téléchargeable à partir du site www.febelcem.be

Cette publication existe en version française, néerlandaise et anglaise.

Photo couverture : source CIMBETON

Editeur responsable : Jean-Pierre Jacobs, FEBELCEM

Auteur et réalisateur : Ir Jean-François Denoël, Ingénieur Conseil Bâtiments, FEBELCEM

Tous droits réservés : Aucun extrait de cette publication ne peut être placé sur un serveur ou rendu public ou reproduit sous quelque forme et quelque support que ce soit (électronique, mécanique, au moyen de photocopies ou selon tout autre procédé) sans autorisation écrite préalable de FEBELCEM.

FEBELCEM, l'auteur, les traducteurs et toutes les personnes qui ont contribué à cette publication, ont apporté la plus grande minutie à la composition de ce document. Cependant, il n'est pas exclu que des erreurs, inexactitudes ou omissions se soient glissées dans cette publication. Quiconque utilise les données reprises dans cette publication accepte d'en prendre le risque. FEBELCEM décline, pour tous ceux qui ont collaboré à cette publication, toute responsabilité pour quelconque dommage pouvant découler de l'utilisation de cette publication

© FEBELCEM, 2007

ISBN 2-9600430-2-2

ISBN 978-2-9600430-2-0 (nouvelle nomenclature)

EAN 9782960043020

D/2007/280/02

Sécurité incendie et constructions en béton

Choix du béton, réglementations, résistance au feu, risque incendie, « Fire Safety Engineering » et restauration du béton après incendie

Remerciements

Que soient remerciés, pour leur collaboration,

- les Professeurs A. Brûls, J.C. Dotreppe, J.M. Franssen et J.B. Schleisch de l'Université de Liège,
- les Professeurs L. Taerwe et P. Vandewelde de l'Université de Gand,
- Messieurs G. Baes et E. Briers de l'ANPI,
- Monsieur P. Chana (BCA),
- Madame F. Robert (CERIB),
- Monsieur S. Horvath (CIMBETON),
- Monsieur A. Van Acker (FEBE),
- Monsieur T. Hietanen (Finnish Association of Construction Product Industries),
- Monsieur P. Spehl (SECO) et
- Monsieur U. Neck (VDZ).

Jean-François Denoël

Préambule

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 sur et 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.

Cette publication est destinée aux professionnels de la construction qu'ils soient auteurs de projets, architectes ou bureau d'études, spécificateurs, entrepreneurs, assureurs ou autorités publiques.

Le document :

- présente les concepts fondamentaux propres au domaine du feu ;
- qualifie le risque incendie ;
- démystifie les protections actives et le « Fire Safety Engineering » ;
- remet en contexte les 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 apporter des réponses aux nombreuses questions soulevées et permettre une meilleure compréhension de ce vaste et passionnant sujet.

Le document est téléchargeable depuis le site www.febelcem.be

Il a servi de document de base pour la rédaction du bulletin n°37 intitulé
« La protection incendie par les constructions en béton » (20p)
également téléchargeable depuis le même site web.

Table des matières

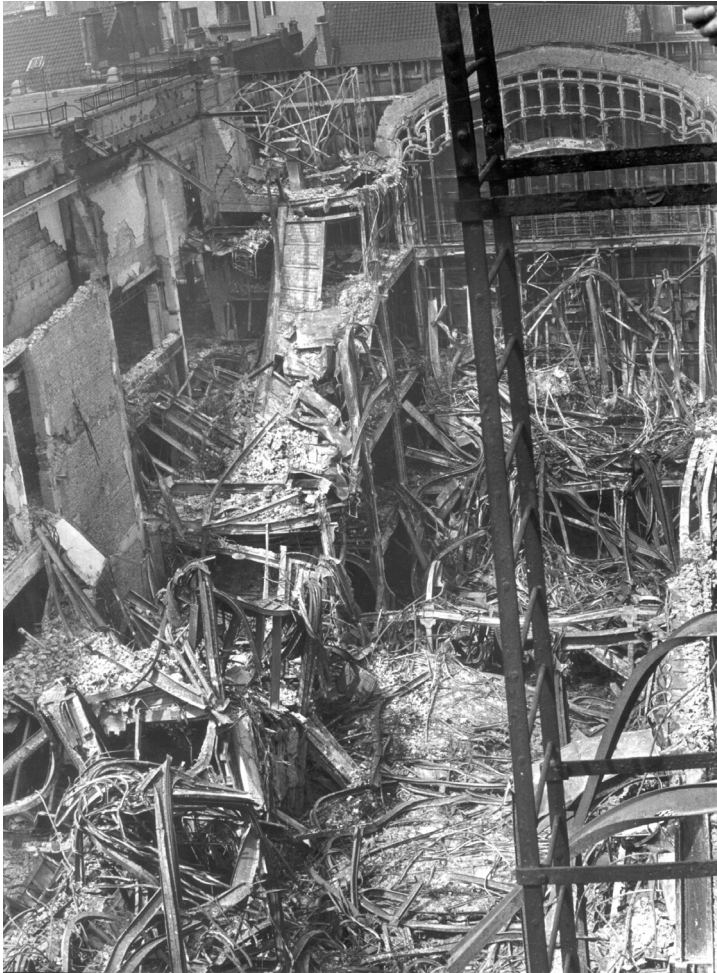
Préambule	7
A. Introduction	11
B. La sécurité incendie	14
1. Objectif de la sécurité incendie : la protection des personnes et des biens.....	14
2. Physique de l'incendie - notions de base	16
2.1. Terminologie : feu et incendie.....	16
2.2. Déroulement d'un incendie.....	16
2.2.1. Le triangle du feu	16
2.2.2. Le développement d'un incendie – le flashover.....	16
2.3. Courbes nominales – la courbe ISO.....	16
2.4. Réaction et résistance au feu	17
2.4.1 La réaction au feu des produits de construction - leur classification	18
2.4.2. La réaction au feu – attestation de conformité.....	19
2.4.3. La résistance au feu des éléments structuraux	20
3. Les réglementations.....	22
3.1. Les directives européennes et les Eurocodes.	22
3.1.1. Les directives européennes	22
3.1.2. Les Eurocodes	23
3.2. Situation de la réglementation incendie belge.....	24
3.2.1. Contexte général.....	24
3.2.2. Les normes de base en matière de prévention contre l'incendie et l'explosion	24
3.2.2.1. Domaine d'application et date de référence.....	24
3.2.2.2. Arrêté royal (AR) de 1997	25
3.2.2.3. Arrêté royal (AR) du 4 avril 2003.....	26
3.2.2.4. Les nouveaux règlements en projet	27
3.2.3. Octroi du permis de bâtir - résistance au feu.....	27
3.2.4. Réglementation pour les détecteurs incendie dans les logements.....	27
3.2.5. Les bâtiments anciens	28
4. Protections et risques.....	29
4.1. L'incendie : risques, facteurs, origine et propagation	29
4.2. Protection passive et active... et comportement humain	29
4.2.1. Mesures de protection passives - le compartimentage.....	29
4.2.2. Mesures de protection actives.....	31
4.2.3. Comportement humain	33

5. Mécanismes thermiques	36
5.1. Mécanismes de transfert de la chaleur.....	36
5.2. Principaux facteurs influençant la température des gaz	36
5.2.1. La charge incendie et son débit calorifique maximal (RHR)	36
5.2.2. La ventilation	38
5.2.3. Caractéristiques thermiques des parois.....	38
5.3. La sévérité de l'incendie	39
6. Actions.....	40
6.1. Les actions mécaniques.....	40
6.2. Les différents modèles de l'action thermique	40
6.2.1. Courbes nominales.....	40
6.2.2. Courbes paramétriques	40
6.2.3. Modèles de zone	41
6.2.3.1. Modèles à une zone	41
6.2.3.2. Modèles à deux zones.....	41
6.2.4. Modèles de feux localisés	41
6.2.5. Modèles CFD.....	41
6.2.6. Quelle courbe, quel modèle choisir ?	41
7. Les matériaux	43
7.1. Les phénomènes physiques et chimiques dans le matériau béton.....	43
7.2. Les caractéristiques mécaniques et thermiques du béton et de l'acier	45
7.2.1. Le béton normal.....	45
7.2.2. Les bétons légers.....	47
7.2.3. Les bétons haute résistance.	47
7.2.4. Les bétons autoplaçants.....	48
7.2.5. L'acier.....	48
7.2.6. Comparaison des caractéristiques mécaniques des matériaux acier et béton	50
8. Calcul de la protection et du risque.....	51
8.1. La vérification de la résistance au feu : calcul	51
8.1.1. Trois méthodes, trois niveaux.....	51
8.1.2. Méthode des valeurs tabulées (niveau 1)	52
8.1.2.1. Domaine d'application.....	52
8.1.2.2. Lecture des tableaux	52
8.1.2.3. Enrobage à l'axe	53
8.1.2.4. Les poutres isostatiques	54
8.1.2.5. Poutres continues.....	55
8.1.2.6. Dalles	55
8.1.2.7. Colonnes.....	55
8.1.2.8. Voiles	56

8.2. Le Fire Safety Engineering.....	56
8.3. Le risque incendie.....	62
8.3.1. Réglementations prescriptive et performancielle.....	62
8.3.2. Méthodes d'évaluation du risque incendie.....	62
8.3.2.1. Les méthodes qualitatives.....	62
8.3.2.2. Les méthodes semi-quantitatives.....	62
8.3.2.3. Les méthodes quantitatives	63
8.4. Le cas des bâtiments industriels	64
8.4.1. Classification des activités exercées et des risques incendie pour les bâtiments industriels	64
8.4.2. Les incendies d'entrepôts	65
8.5. Le cas des tunnels	71
C. Exemples de comportement au feu des structures en béton lors d'incendies	73
1.« Feux instructifs »	73
1.1. Que s'est-il passé à Madrid ?.....	73
1.2. Le viaduc des 3 Fontaines.....	75
2. Conception de bâtiments.....	76
3. Tests au feu de bâtiments	77
3.1. Gand 1974	77
3.2. Cardington 2001	78
D. La restauration des structures béton	79
1. Méthodes d'inspection.....	79
1.1. Constatation visuelle.....	79
1.2. Méthodes d'essais	79
2. Possibilités de réparation	79
E. Annexe	81
Annexe 1 - Discussion sur les systèmes de sprinklers.....	81
F. Bibliographie	85
1. Bibliographie générale.....	85
2. Normes	87
3. Règlements	87

A. Introduction

Le tragique incendie [1] de l'Innovation à Bruxelles en 1967 coûta la vie à plus de 250 personnes. Le recul montre que ceci devait arriver tôt ou tard. En cas d'incendie, de nombreux bâtiments publics de l'époque se transformaient en véritables pièges.



Après l'incendie, tout ce qui restait de l'Innovation était un amas d'acier tordu

A l'Inno par exemple, il n'y avait pas de système de détection d'incendie ni de sprinklers ; pas de compartimentage ; pas d'issues de secours ; la structure métallique n'était pas protégée, des panneaux en carton, hautement inflammables, recouvraient les murs et servaient de faux plafonds ; l'accès des pompiers au bâtiment en flammes fut sérieusement entravé par les panneaux publicitaires qui obstruaient les fenêtres de la façade et par l'étroitesse de la rue encombrée par un trafic intense et les nombreuses voitures en stationnement.

Le choc produit par la catastrophe força les autorités à intervenir. Très rapidement, le Ministère de l'Intérieur mit au point une série de lois, d'arrêtés royaux, de circulaires

ministérielles et de son côté l'Institut Belge de Normalisation (IBN) publia des normes.

Le cas de la Belgique n'était pas unique, tous les autres pays européens durent faire face à ce même problème. Un peu partout, des laboratoires furent fondés en toute hâte et des séries d'essais furent entrepris.

En 1988, la « Directive Produits de Construction » issue du Conseil des Communautés européennes reconnaît la sécurité en cas d'incendie comme une des six exigences essentielles auxquelles les ouvrages de construction doivent satisfaire.

Aujourd'hui, après des dizaines d'années de gestation, apparaissent enfin les véritables normes européennes harmonisées « produits » ainsi que les normes de calcul européennes. Elles sont appelées à servir de base pour les réglementations nationales.

Même si le béton reste « le » matériau par excellence qui fait preuve de la meilleure résistance au feu, il nous est apparu indispensable de visiter au préalable ou de revisiter les fondements de la physique de l'incendie. Dans la perception très émotionnelle des incendies, ceci devrait apporter des éléments d'appréciation et améliorer la compréhension du comportement des structures soumises au feu.

Il est vital de concevoir et de construire des bâtiments et des structures qui protègent effectivement et efficacement tant les personnes que les biens. Les statistiques annuelles des décès causés par les incendies dans les habitations et partout ailleurs nous renvoient à la dure et triste réalité. Simultanément ces événements nous permettent de tirer des enseignements relatifs à la sécurité incendie pour la conception des constructions.

Une imposante législation nationale et internationale existe pour nous protéger des risques d'incendie. Elle est continuellement mise à jour. Une information pertinente et une initiation se doivent d'exister pour les professionnels de la construction qu'ils soient des auteurs de projets, des architectes ou des bureaux d'études, des spécificateurs, des assureurs ou des autorités publiques. Cette publication est précisément destinée à ces personnes qui ont besoin d'une synthèse concernant l'importance que revêt la sécurité incendie dans la conception des bâtiments et le rôle que le béton peut y jouer. Cette synthèse couvre bâtiments et structures. Référence est faite aux tunnels et à d'autres configurations extrêmes où le béton est utilisé.

« Plus d'incendies désastreux »

Peut-on lire sur les plans du pont Hennebique (Paris, le 24 novembre 1904) 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.

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 [21] 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 de 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, il **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'une dalle en 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** ;
- 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.

Le lecteur notera que ce document **ne constitue pas un guide complet** sur la sécurité incendie. Il s'agit plutôt d'une vue d'ensemble sur les points clés de la sécurité incendie et du comportement du béton dans les constructions. Ainsi, ce document constitue une bonne introduction aux Eurocodes 1 et 2 partie feu.

Une liste de différentes publications, de différentes normes et différents sites est présentée en fin de document pour tous ceux qui chercheraient des **informations techniques plus pointues**.

Le lecteur qui cherche « **Un document court mais pertinent !** » s'instruira par l'introduction ci-dessus et par les textes placés dans les cadres à fond ocre, comme celui qui concerne l'usage de façades en béton dans les bâtiments industriels (voir p69) ou la chaussée en béton dans les tunnels (voir p71). Il prendra connaissance des exemples de comportement au feu des structures en béton lors d'incendies. Ces exemples sont fournis en fin de document (voir p73).

Les réglementations (voir p22) font l'objet d'un chapitre qui peut être abordé indépendamment. Dans le chapitre consacré à l'AR de 1997 (voir p25), chacun pourra profiter d'un rappel succinct, des dispositions imposées par la réglementation belge au niveau des **cages d'escaliers, des cages d'ascenseur, des allèges et trumeaux**.

B. La sécurité incendie

1. Objectif de la sécurité incendie : la protection des personnes et des biens

Les objectifs de la sécurité incendie [18], [20] sont la protection efficace contre les risques d'incendie des personnes et des biens. 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

En l'absence de police d'assurance spécifique couvrant les arrêts de production, les primes d'assurances ajustées en fonction des risques encourus ne couvrent, dans les bâtiments industriels, que la perte de biens mais pas 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 [6].

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.

Le tableau suivant [33] montre comment les éléments béton satisfont à ces exigences fondamentales de la protection incendie.

La sécurité [32] 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.

Dans nombre de pays européens, il existe une tendance [33] 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 :

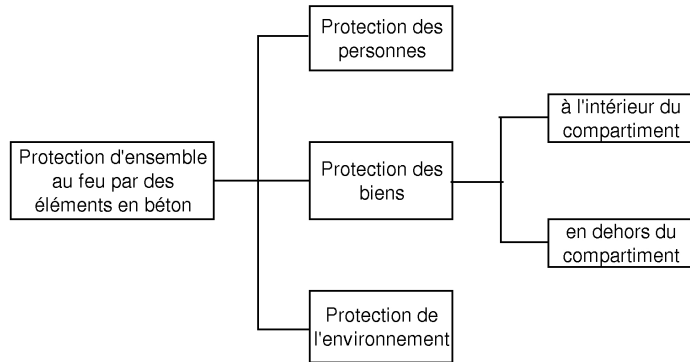
- Le coût total des dommages incendie est de 0,2 à 0,3 % du produit national brut ;
- Le nombre de décès lors d'incendies varie par 100 000 habitants de 0,55 en Suisse à 1,32 en Belgique et à 2,12 en Finlande.
- La somme des coûts liés aux mesures de protection et aux dommages incendie atteint 0,6 %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

exigences de base de la protection incendie			
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
↓	↓	↓	↓
mesures de prévention et de protection			
p.e. À l'aide de murs, sols et plafonds incombustibles	p.e. À l'aide de parois tant intérieures qu'extérieures hautement coupe-feu	p.e. Des chemins d'évacuation constitués d'éléments dotés d'une haute résistance au feu et utilisables pendant un long laps de temps	p.e. Des structures portantes à haute résistance au feu qui permettent une attaque effective du feu à l'intérieur du bâtiment

Relations entre exigences de base de la protection incendie et mesures de protection

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 effets d'ensemble d'une protection incendie avec l'usage d'éléments en béton (Neck, 2002)

Les rapports de la NFPA [41] (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.

Pour une lutte efficace contre l'incendie, l'intervention des services d'incendie doit se faire par l'intérieur du bâtiment [23]. 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 [32] 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.

La filière béton participe à l'effort d'optimisation de la **sécurité** et à **l'économie** des projets. La présentation dans ce document de la démarche scientifique utilisée par le « Fire Safety engineering » se veut un gage de son ouverture. Elle espère fournir ainsi une vue objective de la problématique. Assurément, elle refusera les approches réductrices ou compartimentées et non intégrées. Les intérêts des parties : propriétaires, architectes, entrepreneurs, producteurs, assureurs, occupants des bâtiments et visiteurs, ne sont pas nécessairement convergents. Une réglementation équilibrée devra prévoir des formations, des agrégations de personnes pour les calculs et les contrôles.

Un manque de mesures et de moyens, au niveau des pouvoirs publics doit être un signe clair pour privilégier des solutions fiables et une distribution des responsabilités à ceux qui ont à la fois la volonté et la capacité de les assumer.

2. Physique de l'incendie - notions de base

2.1. Terminologie : feu et incendie

Un **feu** est une combustion [4]. On le trouve dans des fours, des chaudières sous forme de **combustion contrôlée**. Dans le domaine de l'incendie, il devient une **combustion incontrôlée**. Il prend alors une dimension telle qu'il peut provoquer un **incendie**.

Il y a une différence fondamentale entre feu et incendie. Les **experts du feu** maîtrisent une combustion contrôlée qui répond au scénario défini par un programme thermique prédéterminé. On les trouve dans l'industrie du verre, celle de la céramique et autres, dans les laboratoires d'essai également, tous lieux où des feux sont réalisés dans des fours ou enceintes d'essai, où les fumées sont canalisées pour ne pas incommoder les opérateurs. Les **experts de l'incendie** que sont les sapeurs-pompiers doivent, eux, tenter de maîtriser une combustion incontrôlée qui répond à un scénario parsemé d'imprévus, avec des vies humaines qui doivent être secourues, qui doivent aussi secourir, intervenir...

2.2. Déroulement d'un incendie

2.2.1. Le triangle du feu

Pour qu'un incendie puisse prendre naissance [5], il faut la présence conjuguée de trois éléments : l'oxygène (21 % en volume d'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 ci-dessous. Les deux premiers éléments [19] 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 .

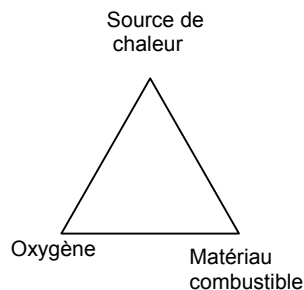


figure : le triangle du feu

2.2.2. Le développement d'un incendie – le flashover

Un incendie comporte une phase de développement où la température s'élève, puis une phase de décroissance où cette température diminue.

Une source de flamme provoque le début d'incendie d'une quantité de matériaux. Les premiers gaz et la fumée apparaissent. En milieu fermé, sous l'action de la chaleur croissante, la fumée s'élève en panache jusqu'à heurter le plafond. A ce moment, elle s'étale radialement le long du plafond jusqu'à heurter une paroi et continuer son chemin vers le bas où elle stagne dans une couche supérieure sous le plafond.

En général, le local contient une couche inférieure froide se composant de l'air ambiant, de gaz et une couche supérieure chaude (modèle à deux zones). Une température de l'ordre de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ provoque l'éclatement des vitres des fenêtres, créant un apport subit d'oxygène frais qui redonne de la vigueur à l'incendie. La couche supérieure se rapproche du plancher, car elle croît en volume de par son alimentation en panaches de fumées.

Au cours du développement de l'incendie, il peut exister, un moment où la température du mélange gazeux de la couche supérieure est tellement élevée qu'elle provoque l'ignition de tout élément combustible dans le compartiment. Ce phénomène s'appelle le **flash-over** ou **l'embrassement généralisé**. Il correspond généralement à une température de 500 à $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. La montée très rapide des températures dans le compartiment et l'accroissement du dégagement de chaleur provoquent un brassage des fumées où les couches se mélangent (modèle à une zone). L'incendie est alors dit "complètement développé".

Ces différentes phases de développement d'un incendie sont schématisées dans le graphique ci-après, montrant l'évolution de la température dans le compartiment en fonction du temps.

Le feu sera contrôlé par le combustible s'il y a suffisamment d'oxygène disponible pour la combustion. Il sera contrôlé par la ventilation s'il n'y a pas suffisamment d'oxygène.

La résistance au feu des colonnes, poutres, voiles et dalles devra empêcher la propagation de l'incendie et l'effondrement de la structure pour permettre le bon déroulement des opérations d'extinction sans que les pompiers ne courent de risques excessifs.

Quand le combustible est grosso-modo consommé à 70% , la température des gaz baisse. Pour information, la vitesse de carbonisation du bois est de 3 à 6 cm par heure selon son essence.

2.3. 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.

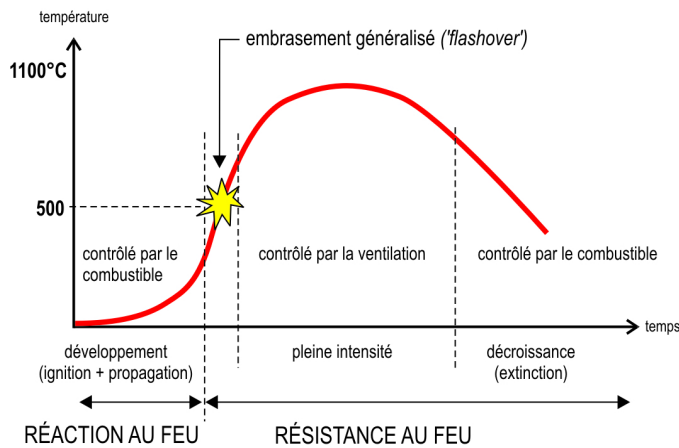


Figure : phases de développement d'un incendie

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 (voir §2.4 plus loin). 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 [32] de durée de résistance est conforme au concept performanciel : 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 qui suit. 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.

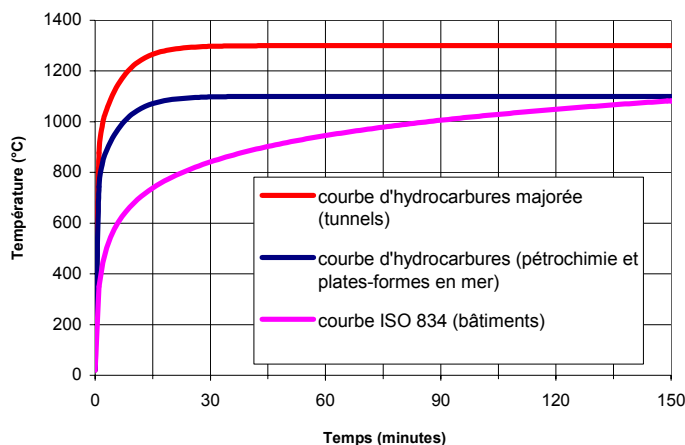


Figure : Différentes courbes de température

La courbe standard ISO : $\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t+1)$

Avec θ_g = température des gaz dans le compartiment en °C

T = temps en minutes

Pour la courbe ISO, il est facile de retenir que, après ¼ h, la température ambiante atteint environ 745 °C et continue à augmenter d'environ 100 °C chaque fois que l'on double le temps.

Dans cette équation, les deux phases [5] qui se produisent lors d'un incendie se retrouvent clairement : la période d'embrasement généralisé durant laquelle se produit une augmentation très rapide de la température jusqu'à environ 800 °C, puis la période où l'incendie est entièrement développé.

La courbe d'hydrocarbures [55] développée dans les années 70 par la compagnie pétrolière Mobil présente une montée en température très rapide avec une température de 900 °C dans les 5 premières minutes et un plateau à 1100 °C. Cette recherche avait été initiée pour mettre au point une procédure de test pour évaluer les matériaux de protection contre le feu pour les plates-formes de forage en mer et les complexes pétroliers.

Les courbes d'hydrocarbures plus sévères ont été mises au point plus récemment suite à la vague d'incendies majeurs dans les tunnels, qui ont indiqué que des scénarios de feu plus sévères devaient être considérés. Les Pays-Bas ont mis au point la courbe « RWS » simulant le comportement de camions citernes en feu transportant de l'essence avec une puissance calorifique de 300 MW, générant une température de 1350 °C et causant un feu d'une durée de 2 heures. Les Pays-Bas se sont dotés de cette courbe comme référence de calcul thermique réaliste et indispensable pour garantir la tenue de leurs tunnels passant sous leurs ouvrages hydrauliques.

Les Allemands ont développé leur courbe : la courbe RABT (ou encore appelée parfois ZTV), moins sévère que la courbe RWS, montant à 1200 °C pendant ½ heure pour redescendre linéairement à la température ambiante après 170 min.

Une nouvelle courbe, différente des courbes RWS et RABT, connue sous la dénomination « courbes d'hydrocarbures majorées » (HCM) a enfin été créée par une majoration de 18 % de la courbe d'hydrocarbures. Le plateau de température est alors de 1300 °C.

Les éléments en béton s'accommodent sans problème d'un feu ISO d'1 heure. Une résistance supérieure peut être obtenue sans difficulté, ce qui est très loin d'être le cas des éléments métalliques non protégés. Après 10 à 15 minutes, l'acier atteint 500 à 600 degrés 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.

2.4. Réaction et résistance au feu

La réaction au feu [18] 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 [5], 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.

Ainsi le bois [5] 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. Chaque modification (rénovation, agrandissement) est soumise à un nouveau permis de bâtir ou à une révision du permis d'exploiter où les services d'incendie sont consultés.

Il n'en est pas de même pour les parachèvements, en particulier dans les immeubles d'habitation, où le propriétaire/locataire de l'immeuble peut modifier le contenu du bâtiment et la nature des revêtements à un point tel que la charge et le risque d'incendie sont fondamentalement modifiés.

2.4.1 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 [40] a fait l'objet de décisions de la Commission Européenne les 08-02-2000 [61], [63] 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 [12]: 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 [105], se déclinent comme suit : A_{1,FI}, A_{2,FI}, B_{FI}, C_{FI}, D_{FI}, E_{FI}, et F_{FI} pour les revêtements de sol (FI pour « floor ») ;
- A1, A2, B, C, D, E, et F pour les autres produits de construction.

Les classes A1 et A2 (respectivement A_{1,FI}, A_{2,FI}) 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_{FI}, E_{FI}) 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.

A côté de la réaction proprement dite, certains produits de construction reçoivent deux qualifications supplémentaires :

- s1, s2 ou s3 pour la **production de fumée** (s = 'smoke' = fumée : Plus le chiffre est élevé, plus l'émission de fumée est importante) :
 - s3 : aucune limitation pour l'émission de fumées ;
 - s2 : l'émission totale de fumée et la vitesse d'émission de la fumée sont limitées ;
 - s1 : exigences plus sévères que pour s2.
- d0, d1 ou d2 pour le comportement face aux **retombées de gouttelettes et particules enflammées** : (d = 'drop' = goutte : Plus le chiffre est élevé, plus la production de gouttes est importante) :
 - d2 : pas de limitation ;
 - d1 : production de gouttelettes / particules incandescentes pendant un temps déterminé ;
 - d0 : pas de production de gouttelettes/ particules incandescentes

Le tableau [51] ci-dessous permet la transposition des classes de réactions au feu entre l'ancienne classification française et la nouvelle classification européenne (EN 13501-1) :

Classes selon NF EN 13501-1 nouvelle classification			Exigence ancienne classification
A1	-	-	Incombustible
A2	s1	d0	M0
A2	s1	d1	M1
A2	s2	d0	
	s3	d1	
	s1	d0	
B	s2	d1	M2
	s3		
C	s1	d0	M3
	s2	d1	
	s3		
D	s1	d0	M4 (non gouttant)
	s2	d1	
	s3		
Toutes classes autres que E-d2 et F			M4

En 1996, la Commission Européenne a publié une liste réglementaire des matériaux de construction [34], [61] qui, sans examen complémentaire, peuvent être groupés dans la classe de protection A1. Cette liste contient les différents types de béton ou de constituants minéraux utilisés dans le béton. Pour les matériaux contenus dans cette liste, cette classification est liée à l'exigence d'une teneur inférieure à 1 % en constituants organiques distribués de façon homogène.

Le béton, matériau de construction minéral [33], 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 se détache ou ne coule du béton.

Selon ce système, les matériaux de construction qui appartiennent à la classe A2 ne sont pas considérés comme inflammables mais contiennent typiquement des constituants inflammables qui en conséquence peuvent brûler par incendie et causer des dommages.

Le comportement au feu d'un produit dépend fortement du scénario de sollicitation thermique auquel il est soumis. Pour reproduire les scénarios de feux les plus couramment rencontrés dans les bâtiments, trois niveaux d'exposition thermique sont envisagés. Ils correspondent à trois étapes du développement possible d'un feu :

- l'attaque par une petite flamme ;
- l'attaque par un feu pleinement développé dans la pièce voisine ou par un objet en feu ;
- l'attaque par un feu pleinement développé dans la pièce.

Les Euroclasses font l'objet de 5 types d'essais, sur des échantillons, dont 4 sont nouveaux, notamment le SBI (single burning item : objet isolé en feu).

2.4.2. La réaction au feu – attestation de conformité

Le tableau [64] ci-après explicite les différents niveaux d'attestation de conformité requis, selon les produits et leurs classes. Ces systèmes d'attestation permettent d'obtenir la présomption de conformité aux normes « produits », en rapport avec l'enjeu de la sécurité incendie.

Classe	systèmes d'attestation de conformité
A1*, A2*, B*, C*	1
A1**, A2**, B**, C**, D, E	3
(A1 à E)***	4
* produits subissant un traitement pour améliorer la réaction au feu	
** produits sans traitement	
*** produits « deemed to satisfy », classés sans essai	

Le tableau ci-après détaille les tâches dédiées à chaque partie pour les différents niveaux d'attestation de conformité :

Systèmes	Tâches dédiées aux organismes agréés	Tâches dédiées au producteur
1	- essais de type initiaux - inspection initiale de fabrication	- contrôle de production - essais complémentaires
3	- essais de type initiaux par le laboratoire agréé	- contrôle de production
4		- essais de type initiaux - contrôle de production

2.4.3. La résistance au feu des éléments structuraux

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**.

Dans certains Etats Membres, l'exigence de performance **W** (rayonnement limité) peut être exigée. S'y ajoutent des critères complémentaires : **M** (résistance aux impacts), **C** (fermeture automatique) et **S** (étanchéité aux fumées) ainsi que des suffixes apportant des précisions relatives à la configuration d'exposition au feu et au domaine d'application des résultats d'essais.

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, [61], [62].

A titre d'exemple, un essai sur un mur porteur conduit aux résultats suivants :

	Temps	Classement
Capacité portante	130 min	R 120
Etanchéité au feu	92 min	RE 90
Isolation thermique	46 min	REI 45

Le mur bénéficie donc des classements R 120 / RE 90 / REI 45

Le critère « stabilité » (R) d'un élément indique le temps durant lequel est assurée sa résistance mécanique sous charge statique définie au §6.1 et durant lequel ses déformations restent compatibles avec sa fonction dans la stabilité de la construction (généralement 1/30ème 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. .

Ces deux derniers critères permettent d'éviter l'inflammation de matériaux en contact avec cette face.

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.

Pour la fonction de capacité portante, il convient d'évaluer tous les modes de rupture, tels la rupture par flexion, par effort tranchant, par flambement ou rupture de l'ancrage des armatures d'éléments en béton.

L'essai avec la courbe ISO ne prend pas en compte les liaisons aux éléments voisins, qui permettent des redistributions de contraintes vers des sections ou des éléments moins exposés.

Certains phénomènes, surtout la dilatation d'ensemble de la structure sous l'influence des hautes températures, ne sont pas considérés dans l'essai sous courbe ISO, alors qu'ils peuvent être déterminants dans la réalité.

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...).

Attention ! Qu'un élément structural ait résisté à un incendie ne signifie pas que l'élément n'a pas subi de dégâts, ni que l'élément ne doit pas être remplacé. Cela signifie seulement que les fonctions structurales de l'élément ont été remplies sous les charges thermiques et mécaniques supportées.

Le calcul pour une période exigée de résistance au feu, n'explore pas le comportement de la structure au-delà de cette période ni, à fortiori, après refroidissement de la structure à température ambiante.

Les essais comportent des limites : coûteux, ils ne permettent que de tester des éléments de longueur limitée, généralement sans pouvoir, à leurs extrémités, reproduire les liaisons à la structure.

Afin d'éviter [37] qu'un essai de résistance au feu ne soit nécessaire pour chaque produit de construction, des méthodes de calcul ont été mises au point pour définir les sollicitations thermiques (§6.2) et mécaniques (§6.1) et ainsi évaluer la résistance au feu (§8.1) des structures en béton, en acier, en acier/béton mixte, en bois, en maçonnerie et en aluminium. Ces méthodes de calcul se retrouvent dans la partie des Eurocodes relative au comportement au feu. L'objectif de ces documents est de définir d'une manière uniforme à travers toute l'Europe la tenue aux feux des structures.

Sur base de ces normes de calcul, une norme produit européenne a été élaborée spécifiquement pour chaque type d'élément. Ainsi les faux plafonds, les gaines techniques, les façades, les murs, les clapets, les dalles alvéolées en béton... disposent d'une norme spécifique. Cette disposition n'était pas celle qui prévalait en Belgique où, précédemment, l'ensemble de ces éléments était traité au sein d'une seule et même norme.

Les dénominations R, E et I ne sont pas reprises dans les normes de base belges mais elles sont reprises actuellement au plan international et notamment par le CEN, le Comité Européen de Normalisation. La dénomination R_f en heures de la norme NBN 713.020 sera adaptée à la dénomination REI en minutes, suivant les normes CEN. Les textes sont déjà préparés dans ce sens au SPF de l'Intérieur.

A présent, les essais au four ont été normalisés au niveau européen, afin de veiller à leur reproductibilité d'un four à l'autre.

Précédemment, les résultats pouvaient varier sensiblement [1], par exemple de deux à plus de cinq heures pour un même élément de plancher alvéolé dans différents fours. En comparant les élévations de température [5] mesurées sur la face exposée d'un élément identique placé dans 14 fours européens respectant la courbe ISO, la température de 800 °C est atteinte après des temps compris entre 28 et 48 minutes. Les fours belges sont parmi les plus sévères.

Les différences étaient dues, entre autres, au rayonnement des flammes et des parois du four, à la surpression imposée dans le four, aux conditions d'appuis. La Belgique était la seule à imposer une valeur aussi élevée de surpression des gaz (20 Pa). Cette différence modifie de façon significative les durées de résistance au feu des éléments qui ont une fonction de séparation mais pas la résistance des éléments portants entièrement entourés par le feu.

3. Les réglementations

3.1. Les directives européennes et les Eurocodes.

3.1.1. Les directives européennes

Si nous ne voulons pas passer à côté de la compréhension des profondes mutations du marché et de la réglementation incendie, il nous faut comprendre le cadre global.

La « Directive Produits de Constructions », la DPC, [2] distingue six exigences essentielles (ER pour « Essential Requirements ») pour lesquelles il est admis que les Etats Membres peuvent réglementer les ouvrages de construction :

1. la résistance mécanique et la stabilité ;
2. la sécurité incendie ;
3. la santé ;
4. l'hygiène et l'environnement ;
5. la sécurité d'utilisation ;
6. les économies d'énergie et l'isolation thermique.

La DPC, comme son nom l'indique, est imposée par l'Union européenne aux PRODUITS mis sur le marché européen, livrés sur chantier, mais PAS aux OUVRAGES construits sur chantier avec ces produits : les exigences relatives aux ouvrages restent de la compétence des Etats Membres.

L'ER 2 de la sécurité incendie est réglementée en Belgique au niveau fédéral. La réglementation de l'ER 1 repose actuellement sur la responsabilité décennale du concepteur et de l'entrepreneur. L'ER 6 fait l'objet d'une directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments récemment transposée dans nos réglementations régionales.

Cette directive "Produits de Constructions" est une des directives "nouvelle approche" promulguées dans le prolongement du Traité de Rome du 25 mars 1957, instituant la Communauté économique européenne. Sa création avait notamment pour but de supprimer les obstacles à la libre circulation des personnes, des services et des biens (et donc des produits) entre les Etats membres. Un document interprétatif, rédigé par la Commission européenne, en collaboration avec des experts européens, est lié à chacune des exigences essentielles. Suivant les objectifs généraux dégagés dans le document interprétatif pour l'ER incendie, le bâtiment [107] doit être conçu et construit de telle manière qu'en cas d'incendie :

- la propagation de l'incendie et de la fumée dans le bâtiment soit limitée ;
- les éléments structuraux conservent leur fonction pendant un temps déterminé ;
- la propagation de l'incendie aux bâtiments voisins soit évitée ;
- les personnes puissent quitter le bâtiment ou puissent être sauvées d'une autre manière ;
- la sécurité des services d'incendie soit assurée.

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 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 la NBN EN 1992-1-2 [107] 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 (voir §1. consacré aux objectifs de la sécurité incendie).

Toujours [107] selon ce document interprétatif n°2, l'exigence essentielle peut être respectée en suivant les différentes possibilités de stratégie de sécurité incendie en vigueur dans les Etats membres, tels des scénarios de feux conventionnels (feux normalisés) ou "naturels" (feux paramétrés), qui comprennent des mesures de protection passives et/ou actives contre l'incendie.

Les fonctions [107] et les niveaux de performance exigés peuvent être spécifiés, soit en termes de degré de résistance au feu normalisé (standard), comme c'est le cas en Belgique, soit en se référant aux études d'ingénierie de la sécurité incendie pour évaluer les mesures de protection passives et actives. Voir la NBN EN 1991-1-2 [106] (voir demande de dérogation en Belgique)

Des exigences supplémentaires [107] concernant, par exemple :

- la possibilité d'installer et d'entretenir des systèmes de sprinklers ;
- les conditions d'occupation du bâtiment ou d'un compartiment de feu ;
- l'emploi de matériaux d'isolation ou de revêtement agréés, y compris leur entretien

ne figurent pas dans l'EC1 feu, car elles doivent faire l'objet de spécifications émanant de l'autorité compétente.

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.[12]

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.

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.



Colruyt Gent [58] : (source ERGON)

Ce bâtiment est équipé au niveau inférieur d'un parking de 3000 m² pour la clientèle ainsi que d'un quai de déchargement pour les livraisons. Le magasin proprement dit se trouve au-dessus du parking et les locaux du personnel se trouvent, quant à eux, à un niveau intermédiaire.

Les colonnes ont été équipées de différents accessoires permettant à la fois la fixation des éléments de façade en béton cellulaire et celle des escaliers de secours préfabriqués.

Les dalles TTPL 840 du plancher du magasin franchissent une portée de 17 m et reprennent une charge de 1200 kg/m². La toiture est composée de poutres IV.

Les colonnes de l'axe central sont prévues avec une descente d'eau pluviale diam 160 mm.

Le montage de la structure a été réalisé en une vingtaine de jours.

3.1.2. 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 ou ENV 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 (voir exemple ci-dessous).

Quelle est la signification des termes "annexes informatives" et "normatives" ?

Lorsqu'une annexe de norme est rendue normative, le concepteur doit se conformer au mode de calcul exposé dans cette annexe, s'il doit y recourir. Si elle est présentée comme informative, le concepteur, s'il veut y recourir, peut s'inspirer de cette annexe, avec l'approbation du client et des autorités compétentes. Il est uniquement tenu de l'appliquer si le client l'impose.

Chaque pays membre du CEN fixe les niveaux de sécurité et les classes via des paramètres à déterminer au niveau national (connus sous la désignation des " National Determined Parameters ", NDP en anglais). L'annexe nationale de la norme NBN EN 1991-1-2:2003 " Actions sur les structures exposées au feu " sera publiée cette année.

Qu'en est-il de la normalisation au niveau européen? [13]

Le projet prévoit la mise à disposition pour les Etats membres européens, sous peu, de normes EN relatives au calcul de la tenue au feu des ouvrages structuraux. Dans un délai prescrit, chaque pays doit les transposer en normes nationales. Par exemple, dans les annexes informatives, chaque pays est libre d'adopter des charges au feu différentes. En effet, le choix du niveau de sécurité est du ressort des Etats. La publication des Eurocodes feu homologués pourrait voir le jour en 2007 (Moniteur belge). Soulignons que ces normes deviennent obligatoires uniquement par contrat ou actes administratifs ou légaux.

La NBN EN 1992-1-2:2005 " Calcul des structures en béton ," partie feu a été publiée début 2005 par l'IBN.

La prénorme européenne, couplée avec son document d'application nationale (DAN), la NBN ENV 1992-1-2, est actuellement en vigueur en Belgique.

La norme européenne, la NBN EN 1992-1-2:2005, est en cours de traduction vers le néerlandais.

Son annexe nationale (ANB) devrait être disponible cette année pour pouvoir être utilisée en conjonction avec les normes produits béton.

Après enquête publique et publication, elle connaîtra une période de coexistence maximale de trois ans avec l'ENV, période au terme de laquelle l'ENV sera retirée.

3.2. Situation de la réglementation incendie belge

La sécurité en cas d'incendie relève de la responsabilité du Maître de l'ouvrage. Il détermine avec l'architecte les mesures actives et passives qui protégeront son bâtiment.

3.2.1. Contexte général

Fédéral				Communautés			Régions		
SPF intérieur	SPF Emploi - Travail	SPF Economie	SPF Santé Publique	NL	FR	D	Flandre	Bruxelles	Wallonie
Normes de base	Législation sur le Bien-être au Travail, RGPT (les écoles également)	RGIE - DPC	Hôpitaux et instituts psychiatriques	Hôtels			Aménagement du territoire		
							Maisons de repos		

Tableau : Vue générale, à titre d'illustration, de la répartition des compétences dans le domaine de la prévention des incendies en Belgique

Légiférer [40] dans le domaine de la prévention des incendies en Belgique n'est pas chose aisée. En effet, en termes juridiques, on dit que la prévention des incendies est une compétence accessoire. En langage commun, cela signifie qu'il n'y a pas un seul ministre en charge de la prévention des incendies mais plusieurs. Pour cette matière, 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 ;
3. Les Régions, notamment compétentes pour les maisons de repos ;
4. 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) (normes de base revues en 2003).

Au niveau fédéral, la détermination des **normes de base** pour la prévention, communes à une ou plusieurs catégories de construction, indépendamment de leur destination, relève de la compétence du SPF INTÉRIEUR. Toujours au niveau fédéral, pour l'application de certaines exigences en matière de prévention des incendies, ce sont d'autres ministres qui sont compétents au travers d'autres règlements. Le tableau ci-après reprend à titre d'illustration la répartition des compétences.

Par ailleurs, à l'occasion de la révision de ce règlement, l'appellation "normes de base" devrait rationnellement disparaître au profit du vocable "Règlement Général", ceci afin de ne pas entretenir la confusion par le vocable "normes". En effet, une norme synthétise les règles de l'art dans un domaine. Elle ne devient obligatoire que si elle est consacrée comme telle dans un règlement.

Il existe [40] quelques sites où trouver des informations détaillées, notamment : www.previ.be [66], www.previlex.be, www.normes.be [7], www.anpi.be [60]. Ces sites fourmillent d'informations. Il est cependant toujours prudent de contrôler

les informations publiées sur ces sites et de vérifier si elles sont à jour.

3.2.2. Les normes de base en matière de prévention contre l'incendie et l'explosion

3.2.2.1. Domaine d'application et date de référence

Les annexes de l'arrêté royal (AR) du 19 décembre 1997 [201] 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 4 avril 2003 [40], 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 ces rénovations est actuellement à l'étude.

Dans le cadre de l’attribution d’un permis d’urbanisme, malgré l’exclusion des rénovations, des mesures de sécurité peuvent être exigées. Elles pourront être basées sur les prescriptions reprises dans les normes de base. Si certaines prescriptions des normes de base sont difficilement applicables pour un bâtiment rénové, elles pourront être réduites et compensées par d’autres, sur base d’une décision prise à un niveau local (le bourgmestre, conseillé par son Service incendie).

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 totale inférieure ou égale à 100 m².

C'est la date de l'accusé de réception par la commune du dossier complet de demande de permis d'urbanisme qui fait foi pour déterminer la version des normes de base qui est d'application.

En résumé :[8]

Permis de bâtir	Bâtiments bas	Bâtiments moyens	Bâtiments élevés
Avant 1972	Néant	Néant	Néant
22/12/1972	Néant	Néant	AR 04/04/1972 reprenant la NBN 713-010
1980	Néant	NBN S 21-201,2,3	NBN S 21-201,2,3
26/05/1995	Néant	AR 07/07/1994	AR 07/07/1994
01/01/1998	AR 19/12/1997	AR 19/12/1997	AR 19/12/1997
04/04/2003	AR 04/04/2003	AR 04/04/2003	AR 04/04/2003

Tableau : Dates de référence pour l’application des arrêtés de modification [101, [102], [103], [104].

3.2.2.2. Arrêté royal (AR) de 1997

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

1. Terminologie ;
2. Bâtiments bas (BB) $h < 10\text{m}$;
3. Bâtiments moyens (BM) $10\text{m} \leq h \leq 25\text{m}$;
4. Bâtiments élevés (BE) $h > 25\text{m}$;
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 [5], 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 ;
- ½ h pour les toitures des BB.

Les exigences [20] pour les sous-sols sont plus sévères que pour les rez-de-chaussée et les étages supérieurs du même bâtiment, vu la plus grande difficulté d'intervenir dans le cas d’un incendie en sous-sol.

Les prescriptions de ces normes de base applicables aux bâtiments concernent :

- l’implantation et les chemins d’accès ;
- le compartimentage et l’évacuation ;
- certains éléments de construction ;
- la construction des bâtiments et des espaces d’évacuation ;
- la construction de certains locaux et espaces techniques ;
- l’équipement des immeubles.

Le classement pour la réaction au feu, repris dans l’annexe 5 des normes de base, comprend 5 classes : A0 à A4. Le document propose également des exigences de réaction au feu en fonction des types de locaux. Une réécriture de cette annexe, introduisant le nouveau classement européen, est en voie de finalisation.

Spécifiquement, pour les matériaux d’isolation, un tableau de corrélation des réactions au feu passées et nouvelles a été établi sous deux versions différentes. En effet, faute d'un consensus au sein du Conseil Supérieur, deux propositions différentes ont été rédigées et transmises au Ministre de l’Intérieur, afin qu’il marque son choix pour l’une d’elles.

Les quelques dispositions architecturales à retenir et reprises ci-dessous ne peuvent bien sûr se substituer au texte complet des normes de base (110 pages) [11] :

La **distance horizontale** entre un bâtiment et un bâtiment opposé est de 6 m pour les BB, 8 m pour les BM et les BE, sauf si les parois répondent aux exigences telles que définies pour les bâtiments contigus. Cette distance n’est pas d’application pour des bâtiments qui sont séparés par des rues ou chemins, ... existants appartenant au domaine public.

Les **parois qui séparent des bâtiments contigus** présentent un Rf de 1 h pour les BB, 2 h pour les BM, 4 h pour les BE.

Les bâtiments sont divisés en **compartiments** dont la **superficie** est inférieure à 2500 m², sauf pour les parkings. Pour les **atriums**, le compartiment qui s’étend sur plusieurs niveaux doit être équipé d’une installation d’extinction automatique et d’une installation d’évacuation de fumée et de chaleur. La présence de ces installations permet de dépasser la limite des 2500 m².

Les linteaux (partie en dessous du plancher), **les allèges** (partie au-dessus du plancher sous la fenêtre) **et les trumeaux** (partie de façade entre deux fenêtres) : la somme des dimensions, telles que reprises dans les normes de base, est supérieure à 1 m (BM et BE)

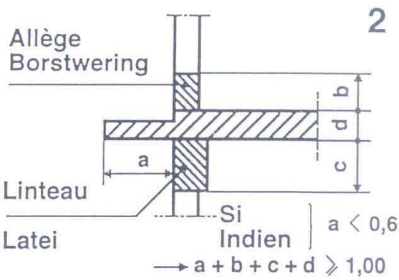


Figure : allège [18]

Fig. 1

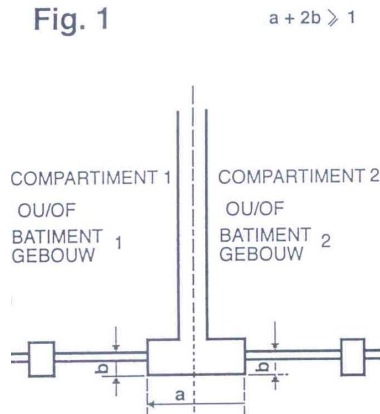


Figure : trumeau [18]

Même si l'observateur extérieur ne peut s'en rendre compte, les façades-rideaux en verre doivent également satisfaire à ces exigences relatives aux allèges et aux trumeaux.

Les cages d'escaliers et les ascenseurs

- Pour les escaliers extérieurs donnant accès à un niveau d'évacuation : aucune résistance au feu n'est requise mais le matériau est de classe A0 (incombustible) ;
- Les cages d'escalier desservant les sous-sols ne peuvent pas être dans le prolongement direct de celles desservant les niveaux situés au-dessus d'un niveau d'évacuation sauf en présence d'une paroi et porte Rf les séparant ;
- Pour les BB, à chaque niveau, la communication entre le compartiment et la cage d'escalier est assurée par une porte Rf.

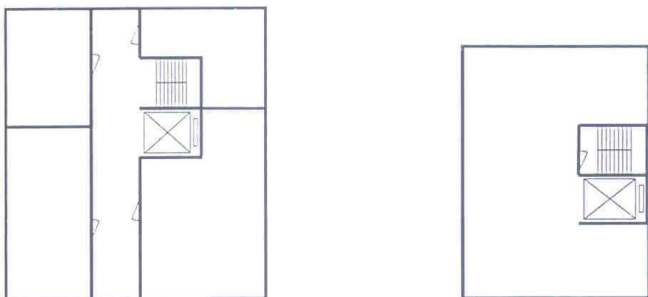
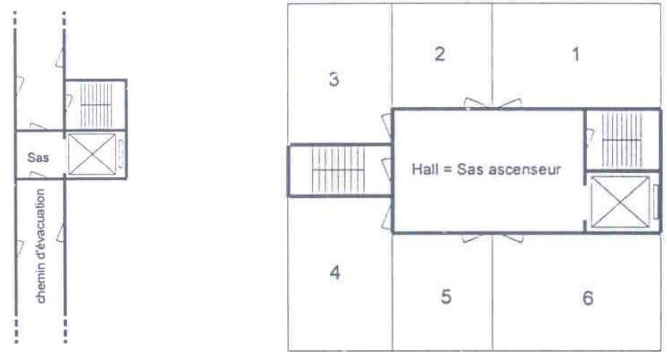


Figure : BB cas général [18]

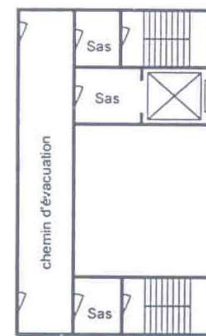
- Pour les BM, le palier du ou des ascenseurs peut-être inclus dans le chemin d'évacuation ;
- Pour les BM ne comprenant pas plus de 6 appartements par niveau, desservis par une même cage d'escaliers intérieurs, le hall commun de ces appartements peut constituer le sas des ascenseurs ;



BM cas général [18]

BM - 6 appartements [18]

- Pour les BE, le palier d'accès du ou des ascenseurs doit être distinct des paliers et des sas des cages d'escaliers. Ils doivent ne pas être inclus dans le chemin d'évacuation, sauf dans les cas repris dans les normes de base (cas complexes avec 4 et 6 appartements par niveau non repris ici).



BE cas général [18]

3.2.2.3. Arrêté royal (AR) du 4 avril 2003

L'arrivée de nouvelles technologies sur le marché, le constat de certaines imprécisions dans le texte initial, la modification de la réglementation à d'autres niveaux ont poussé le législateur à introduire un nouvel arrêté de modification. L'arrêté royal du 4 avril 2003 [202] a permis d'opérer plusieurs adaptations relatives notamment aux :

- Bâtiments existants : voir §3.2.2.1 ci-avant ;
- Escaliers tournants admis si giron de 24 cm sur la ligne de foulée ;
- Chaufferies : exigences en fonction de la puissance de l'installation de chauffage ;
- Ascenseurs : distinctions des types avec exigences propres ;
- Installations électriques : maintien des ascenseurs pour les personnes à mobilité réduite ;
- Clapets résistant au feu : prescriptions nouvelles plus claires ;
- Comportement au feu des toitures : selon classification européenne, les matériaux superficiels de la couverture des toitures sont de classe A1 ou de la classe BROOF (t1).

3.2.2.4. Les nouveaux règlements en projet

3.2.2.4.1. Les bâtiments industriels

Les nouveaux bâtiments industriels ne sont pas encore couverts par la réglementation fédérale sur les bâtiments nouveaux. Leur réglementation a fait l'objet de très longues discussions pour aboutir à un projet de norme de base, la future Annexe 6. Elle n'a jamais été publiée sous forme d'AR mais la plupart des services d'incendie ont pris connaissance du document et, faute d'une réglementation applicable en la matière, s'en servent pour établir leur rapport de prévention relatif à des bâtiments industriels. Ce projet reprenait entre autres une classification issue d'une norme sur les installations d'extinction automatique ou sprinklers se basant sur le type d'activités dans ces bâtiments. Cet AR a été rejeté par le Conseil d'Etat argumentant notamment que le type d'activité dans ces bâtiments était du ressort des Régions et pas du Fédéral.

Pour combler le manque de réglementation en la matière et sur base d'une proposition d'Agoria et de Technum, relayée par la FEB, un groupe ad hoc du Conseil Supérieur de la Sécurité contre l'Incendie et l'Explosion a rédigé un nouveau projet d'annexe 6, actuellement en cours d'approbation. Il est basé sur une classification des bâtiments industriels en fonction de leur densité de charge calorifique caractéristique. Il fixe :

- une charge calorifique maximale admissible par compartiment de laquelle est déduite la surface maximale des compartiments,
- une résistance au feu pour les parois des compartiments ainsi que pour les autres éléments structurels,
- des distances minimales par rapport aux bâtiments voisins,
- les exigences à satisfaire pour l'évacuation des occupants et la sécurité des équipes de secours.

L'annexe 7 reprenant les objectifs généraux a été abandonnée.

3.2.2.4.2. Les façades

Des règles de conception des façades sont actuellement à l'étude au sein d'un groupe de travail du Conseil Supérieur. Elles viendront détailler les prescriptions déjà reprises dans les normes de base actuelles.

3.2.2.4.3. Les traversées de paroi

Des recommandations relatives à la réalisation des traversées de paroi par des conduites de fluide ou d'électricité ont déjà été distribuées aux services incendie sous forme de circulaire. Une procédure de modification des normes de base a déjà été entamée. Elle reprend ces recommandations.

3.2.3. 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 à l'octroi du permis de bâtir [8], 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.

Selon l'AR de 1997, **les portes** ont, quant à elles, leur résistance au feu attestée par la marque Benor-ATG. Elles doivent être placées par des placeurs agréés par notre Ministre de l'Intérieur.

Cette double exigence a été cassée par le Conseil d'Etat en 2004, suite à une plainte concernant le recours à des placeurs agréés. Le paragraphe de l'arrêté énonçant les deux exigences a été balayé d'un seul coup alors que l'exigence de sécurité relative à l'attestation Benor-ATG pouvait être maintenue. Le SPF de l'Intérieur a préparé un texte comblant le vide actuel.

3.2.4. Réglementation pour les détecteurs incendie dans les logements



+ pays
nordiques

Dans les pays nordiques et anglo-saxons, les détecteurs de fumée sont imposés depuis longtemps déjà parce que beaucoup de maisons étaient en bois et que la nécessité de prévenir apparaissait plus élémentaire : partout où sont placés des détecteurs, on constate en moyenne une chute de 80 % du nombre de décès et de blessés graves.



Détecteur de fumée (source [8])



Pris en 2004, l'arrêté du gouvernement bruxellois impose, depuis juillet 2005, des détecteurs d'incendie pour tous les logements mis en location dans la Région bruxelloise.



En Région wallonne, depuis le 20-11-2004, tous les nouveaux logements doivent être équipés de détecteurs incendie, qu'ils soient donnés en location ou occupés par leur propriétaire. Depuis le 01-07-2006, tous les autres logements doivent l'être également.

Le détecteur doit porter le label CE et être agréé par le BOSEC ou un organisme européen équivalent. Il doit être garanti 5 ans par le constructeur. L'installation est prise en charge par le propriétaire et le remplacement éventuel des piles par le locataire. A cet égard, le choix de piles au lithium d'une durée de vie de 5 ans permet de se mettre l'abri de leur remplacement par les occupants, remplacement parfois aléatoire. Lorsque la pile est en fin de vie, l'appareil émet un signal d'avertissement sonore.

Pour couvrir ses meubles et sa maison par une assurance incendie, tout le monde accepte de donner 300, 500, 600 euros.

Pour protéger les personnes, le prix de base annoncé d'un détecteur agréé est d'une dizaine d'euros. Il serait ridicule et irresponsable d'hésiter encore pour cet investissement.



En Région flamande, aucune réglementation relative aux détecteurs dans les logements n'existe.



En France, il n'y a pas encore d'obligation.

3.2.5. Les bâtiments anciens

Les bâtiments anciens... toute une problématique [8], [9], [10]

Le mercredi 20 février 2003, durant la nuit, un incendie criminel se déclare dans un immeuble d'appartements situé à Mons. Le bilan est lourd : sept morts, dont un enfant.

Cet incendie frappe l'opinion publique : la population se sent concernée et, au lendemain de ce drame, de nombreuses sociétés de logement et de gérance envoient des demandes d'inspection aux services d'incendie afin d'établir si leur bâtiment répond aux critères actuels de sécurité. Elles souhaitent également compléter la formation de leurs agents de proximité, de leurs concierges ou autres responsables. Rien qu'à Bruxelles, en quelques semaines, plus de 22 000 demandes sont enregistrées. D'autres sont encore reçues régulièrement.

Même si, aujourd'hui, un avis des services d'incendie est joint à la demande de permis de bâtir et a, dans ce cas, force de loi, il en est ainsi seulement pour les bâtiments neufs. C'est pourtant là que le problème réside : la plupart des demandes d'inspection concernent les bâtiments anciens, car ils ne satisfont plus aux exigences actuelles en matière de prévention incendie. Les risques sont donc réels dans ces immeubles et nous ne pouvons les prendre à la légère, comme nous l'a démontré le drame de l'incendie de Mons. Les principaux bâtiments concernés sont les immeubles de logements sociaux, souvent regroupés pour former une " cité ". En effet, aux problèmes dus à la construction à moindre coût s'ajoute le problème du vandalisme, intervenant autant dans les causes d'incendies, souvent volontaires, que dans l'état de délabrement des immeubles. Il suffit, par exemple de placer de nouveaux extincteurs pour que le lendemain ils soient arrachés ou utilisés par une main malveillante.

Aucune des législations mentionnées plus haut n'a malheureusement d'effet rétroactif : aucun bâtiment construit avant 1972 et qui présente souvent les risques les plus grands n'est soumis à une quelconque réglementation, excepté ses éventuelles extensions bâties ultérieurement.

4. Protections et risques

4.1. L'incendie : risques, facteurs, origine et propagation

Dans un bâtiment bien protégé, il existe un équilibre entre danger et protection. Le **risque** se définit donc par le rapport entre danger et protection. Le danger est plus grand dans les bâtiments élevés puisque, plus encore que pour les autres bâtiments, l'attaque du feu doit se faire par l'intérieur. Il est également plus grand dans les bâtiments abritant des personnes à mobilité réduite, dont l'évacuation est plus difficile. Plus le danger est élevé, plus les règles de sécurité doivent être sévères.

Les **facteurs** [38] à considérer dans le **développement** d'un incendie sont :

- la probabilité de la naissance d'un incendie ;
- l'intensité du feu ;
- la vitesse d'extension possible de l'incendie ;
- l'existence de risques particuliers (produits toxiques).

La probabilité de **naissance** d'un incendie est fonction :

- des installations de chauffage et appareils électriques ;
- de la présence de gaz inflammable ;
- de certains procédés de chimie industrielle ;
- de la présence de poussières pouvant générer des explosions.

Relativement au dernier point, des déchets comme les copeaux de bois, les poussières etc. doivent être régulièrement évacués pour contrer un sérieux danger d'incendie. Citons aussi la combustion spontanée de chiffons pleins d'huile, l'auto inflammation de laines de fer par des piles...

L'**origine** du danger incendie peut être :

- interne, lié :
 - au bâtiment lui-même et à son contenu ;
 - aux activités qui s'y déroulent (activités industrielles) ;
 - aux personnes occupant le bâtiment (fumeurs, déchets).
- externe, lié :
 - aux bâtiments adjacents (par les fenêtres par exemple) ;
 - aux installations voisines (gaz liquéfié) ;
 - à des conduites de gaz sous la voirie.

Son **développement dans le compartiment** est limité par :

- le choix des matériaux dans les bâtiments (voir §2.4 réaction au feu) et
- la fiabilité des installations techniques de protection active telles des détecteurs, des alarmes, des sprinklers, des évacuations de fumées et chaleur.

Sa **propagation hors du compartiment** est limitée par la résistance au feu du compartiment (sécurité passive).

4.2. Protection passive et active... et comportement humain

Les mesures de prévention sont classiquement divisées en mesures de protection passives et actives :

- les premières sont réalisées lors de la construction du bâtiment et sont opérationnelles à tout moment ;
- les secondes peuvent être réalisées pendant ou après la construction du bâtiment et ne deviennent opérationnelles que lorsqu'un incendie se produit.

4.2.1. Mesures de protection passives - le compartimentage

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.

Le **béton permet la continuité des activités dans les installations d'intérêt vital.**

La continuité est primordiale pour les bâtiments d'intérêt public comme les centrales électriques, les gares de chemins de fer, les hôpitaux, les bureaux des administrations publiques.

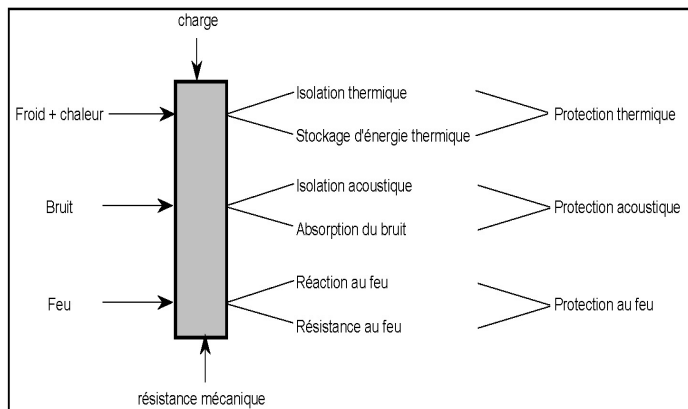
Dans les entrepôts, hôtels, halls industriels, complexes de bureaux, centres de distribution, les feux interrompent non seulement le fonctionnement des entreprises qui les exploitent mais interrompent également :

- le service aux personnes qui y recourent
- la productivité des entreprises ou des organisations qui gravitent autour des activités de l'entreprise touchée.

Outre sa fonction porteuse, le béton combine une protection au feu, une protection thermique et une protection acoustique

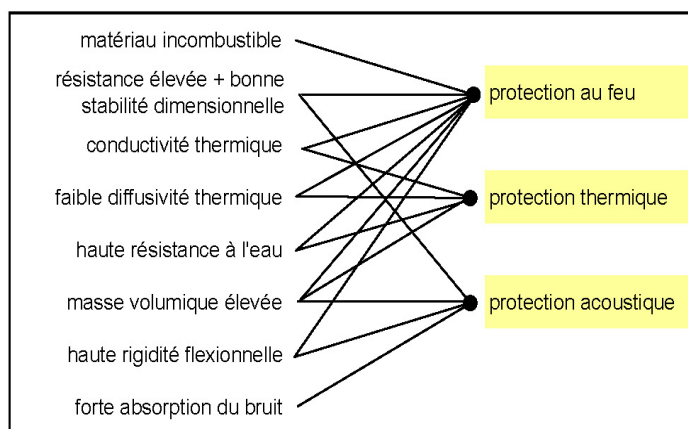
Les parois intérieures, les façades extérieures et les planchers des bâtiments sont soumis non seulement à des charges mécaniques mais aussi aux sollicitations thermiques du climat, aux bruits ambiants et aux incendies.

La figure ci-après montre les sollicitations agissant sur une paroi de compartimentage et les propriétés associées nécessitées par ces sollicitations, remplissant les fonctions adéquates de protection.



(Neck, 1999)

La figure ci-après reprend les propriétés du matériau et les propriétés structurales des composants grâce auxquelles ces derniers remplissent les exigences de protection au feu, de protection thermique et de protection acoustique.



La prévention incendie est basée sur

- un choix de matériaux présentant une bonne réaction au feu ;
- la réalisation d'un compartimentage permettant de confiner l'incendie dans l'enceinte où il a pris naissance ;
- des issues suffisantes pour l'évacuation des personnes : nombre d'issues, largeur, balcons continus...

Les points faibles du compartimentage ne peuvent être détaillés ici (consultez [5]). Ils concernent d'abord les portes (Benor-ATG) : nous revenons sur ce point dans le chapitre de la réglementation. Ils concernent aussi les traversées pour conduites et gaines, les déformations locales (interrupteurs...), les sous-sols (apport d'air), les façades (allèges + linteaux + balcons), ainsi que les toitures.

«Si elle n'est pas fermée, la meilleure porte [5] résistant au feu n'est d'aucune utilité lors d'un incendie. Lorsque le législateur exige des ferme-portes, on constate souvent que dans la réalité, ces portes sont maintenues en position ouverte afin de faciliter l'exploitation du bâtiment.» La BS 7974:PD7 [111] fournit d'ailleurs des valeurs repères relatives à la fiabilité de ces portes : la probabilité que ces portes coupe-feu soient bloquées en position ouverte est de 30 %. La probabilité que des portes

automatiques ne se referment pas correctement est de 20 %. « L'utilisation [5] de dispositifs de fermeture, couplés à un système de détection, permet d'éviter cette situation qui met en péril tout l'effet recherché par le compartimentage. »



Paroi non re-maçonnerie dans une paroi EI, au niveau des canalisations de chauffage la traversant (source [8])



A proscrire ! Une ouverture dans une paroi EI laissant passer des câbles électriques et qui n'a pas été rejointoyée (source [8])



*Coursives longeant toute la façade du bâtiment (source [8]).
Ces balcons continus constituent des chemins d'évacuation
pour les personnes.*

4.2.2. Mesures de protection actives

Les mesures de protection actives, prises en compte par le 'Fire Safety Engineering' permettent la lutte contre l'incendie par :

- la détection automatique couplée avec un système d'alarme ;
- les systèmes d'extinction (extincteurs, installation automatique de sprinklage permettant de contrôler la taille de l'incendie) ;
- l'évacuation des fumées et de la chaleur (EFC) : peut être partiellement du type passif et partiellement du type actif ;
- les équipes locales d'incendie, les services d'intervention de pompiers.

Distinction entre annonce, alerte et alarme

Comme mentionné dans le dernier paragraphe de l'annexe 1 de l'arrêté royal de 1997 relatif aux normes de base incendie, on distingue en Belgique l'annonce, l'alerte et l'alarme :

- **l'annonce** qui est l'information aux services d'incendie de la découverte ou de la détection d'un incendie ;
- **l'alerte** qui est l'information transmise à des personnes concernées de l'organisation, de la découverte ou de la détection d'un incendie ;
- **l'alarme** qui est l'information aux occupants d'un ou plusieurs compartiments qu'ils doivent évacuer leur compartiment.



Ouvertures de désenfumage au sommet de la cage d'escalier (source FEBELCEM)



Dans ce couloir bon nombre d'éléments de protection active sont présents : dispositif d'alerte, dévidoir, panneau de signalisation, détecteur de fumées, éclairage de secours (source : FEBELCEM)

La performance des sprinklers [41] , habituellement mise en exergue pour leur fiabilité opérationnelle, est évaluée aux USA dans des conditions de test de laboratoires où, dans 96 à 99 % des cas, le sprinkler est activé lorsque la température est atteinte au niveau des têtes. Mais cette démarche ne considère pas les mises en situation réelles, où ce même niveau de performance de contrôle ou d'extinction de l'incendie n'est pas atteint. Les statistiques rapportées par M. Rohr de la NFPA en septembre 2001 dans « U.S. Experience with Sprinklers » indiquent que, pour des feux d'une taille telle que les sprinklers auraient dû être activés, le système a failli dans sa mission dans 13 % des appartements, 17 % des hôtels, 20 % des hôpitaux et bureaux, 26 % des lieux publics, avec une moyenne nationale de 16 % d'échecs. (Nous revenons plus loin sur la valeur de la fiabilité des sprinklers !). Sur base de ces chiffres, la performance réelle s'avère dès lors **10 fois moins élevée qu'annoncé**.

Comment définit-on le succès d'un système de sprinklers ?

L'« area of operation », la surface d'action ou de calcul des sprinklers varie en fonction du risque. Des classes de risques

sont définies pour les risques légers, ordinaires (OH) ou élevés. A chaque classe est associée une surface sprinklée qui doit être maintenue sous contrôle. Ceci signifie que le feu ne doit pas s'étendre au-delà de cette surface. Le tableau suivant de la NBN EN 12845 reprend la définition de ces surfaces d'action, associées avec un nombre de tête de sprinklers et un débit minimum par têtes de sprinkler :

Classes de risque	Nombre de têtes de sprinklers	Surface d'action (m²)	débit minimum par têtes de sprinkler (l/m²/min)
Légers	1 / 21m²	84	2,25
ordinaires	1 / 12m²	72 à 360	5
Élevés sauf HHP4	1 / 9m²	260	7,5 à 12,5



Sprinkler (source [8])

Au Canada, la réglementation dans l'Ontario conduit à l'usage de détecteurs de fumée et d'alarmes incendie en combinaison avec une compartimentation. Le principe est que les alarmes incendie fournissent un temps d'évacuation approprié et donc que les dépenses et les problèmes liés à la défaillance des sprinklers sont écartés. Si la réglementation est maintenue telle quelle, c'est qu'il a été démontré que, pour la sécurité des personnes et des biens, la combinaison d'alarmes incendie et d'une compartimentation résistante au feu ne présentait pas plus de risque que celle des alarmes incendie et des sprinklers.

Une discussion approfondie sur l'usage et la performance des sprinklers est reprise dans l'annexe 1 (voir chapitre E.) de ce document.

Le choix de murs et planchers en béton pour une résistance élevée au feu constitue un maître choix. Ces éléments permettent en outre de réduire la transmission du bruit à travers les murs et les sols (moins de planchers ou de cloisons légères). Ils améliorent le confort thermique, réduisent les frais d'entretien du propriétaire, augmentent la durabilité. Ces caractéristiques se traduisent par une meilleure valeur de revente pour les propriétaires, un gain financier lié à une prime d'assurance incendie plus faible tout en diminuant le risque d'exposition au danger des services de secours ainsi que les frais indirects encourus après incendie.

L'attitude responsable d'un certain nombre de concepteurs, de développeurs et de propriétaires qui améliorent la sécurité incendie dans leur bâtiment au-delà de la réglementation sur une base volontaire mérite d'être soulignée. Dans le même temps, pour d'autres bâtiments, ces mêmes personnes, sous le couvert de maintien de compétitivité, sont priées de réduire au minimum les exigences réglementaires de sécurité incendie. Nous pensons spécialement à ceux qui obtiennent des dérogations permettant la construction de projets qui répondent à des exigences moindres que celles formulées dans les réglementations prescriptives des constructions.

L'efficacité des sprinklers est réduite lorsque les dispositions prises par l'exploitant pour le stockage de produits diffèrent de celles initialement prévues (matières stockées différentes, emplacements différents, manière de stocker différente).

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

LES MESURES DE PROTECTION ACTIVE : UNE PART SIGNIFICATIVE DES FRAIS DE CONSTRUCTION DES BÂTIMENTS INDUSTRIELS [6]

"On sous-estime trop souvent la part prise par les frais 'sécurité incendie' dans le budget lié à la construction d'un bâtiment industriel," déclare Bruno Robberechts. « Pour des entrepôts industriels standards, il faut tout de même compter sur 15 à 20 % de l'investissement total. Le système de sprinklage représente une bonne partie de ces frais. Deux frais fixes sont à prendre en compte dans ce cadre : le local pompe et la citerne.... Il faut prévoir un local pompe ESFR avec deux pompes diesel et une citerne pour 12 têtes de sprinkler pour un fonctionnement de 60 minutes. Il faut aussi tenir compte des frais liés au réseau du système de sprinklers... » « Cela sans omettre les frais d'entretien : un contrôle périodique et un check-up d'un système de sprinklage sont aujourd'hui obligatoires, » affirme Bruno Robberechts. "Mais cela peut également engendrer une réduction de la prime d'incendie", conclut Alain Georges.

4.2.3. Comportement humain

Le comportement des occupants des immeubles et celui des visiteurs intervient d'une façon non négligeable dans l'occurrence des incendies et le fonctionnement des protections.

Prévoir des séances d'exercice anti-incendie (évacuation et première intervention), ne pas laisser des objets encombrants dans des chemins d'évacuation, ne pas verrouiller des issues de secours... sont autant d'éléments qui augmentent la sécurité.

Un essai d'évaluation [8] du risque incendie a été mené récemment pour des bâtiments à appartements multiples. Il s'intéresse à la sécurité des personnes et se base sur des fiches d'évaluation à points. Il s'appuie sur les normes de base belges en matière d'incendie (AR 1997) et sur l'expérience des services d'incendie. Chaque critère est relativement simple à vérifier et ne nécessite pas des techniques élaborées pour son évaluation. Il suggère une pondération équilibrée entre les différents paramètres limitant le risque d'incendie : 2/3 pour les protections passives, 1/9 pour les protections actives et 2/9 pour le comportement des occupants et des responsables des immeubles.



*A proscrire : Cette armoire empêche l'évacuation par la course.
(source [8])*



*A proscrire ! Des journaux traînent dans un dégagement de sous-sols,
combustible idéal pour tout acte de malveillance (source [8])*

L'importance notoire du comportement humain est confirmée par l'expérience canadienne où, grâce à une vaste campagne d'information, le nombre d'incendies d'appartements a fortement diminué ces dernières années.

Il faut noter qu'à partir du moment où la sécurité incendie ne concerne plus des établissements destinés à recevoir du public, aucune mesure n'est prévue par la réglementation permettant un suivi et une vérification des mesures prises en prévention incendie.



Pictogrammes réglementaires indiquant la présence d'un hydrant quelconque, d'un dévidoir, d'un extincteur ou des sorties de secours

La sécurité active ne compense-t-elle pas les points faibles des structures en acier? [13]

« La sécurité active prend en compte la présence des sprinklers, la détection automatique, la disponibilité d'une réserve d'eau suffisante, la proximité des services d'interventions, le type d'activité exercée dans l'immeuble. Ces éléments sont utilisés dans l'ingénierie du feu pour diminuer artificiellement les exigences en matière de résistance au feu. Il serait téméraire de ne pas conserver au bâtiment une sécurité structurale intrinsèque minimale raisonnable (c'est la sécurité passive) pour parer à des défaillances extérieures.

La sécurité active ne peut être envisagée que complémentaiement à la sécurité passive. Nous pensons aux incendies criminels en hausse et à une défaillance possible du contrôle et de l'entretien qui restent dans des mains humaines. **Cette stratégie de sécurité active confère au maître de l'ouvrage et à l'occupant une responsabilité qu'ils ne sont pas toujours à même d'assumer, par manque de conscience, de formation et de contrôle.** Les ouvrages gérés par un maître d'ouvrage peu soucieux cumulent souvent une série de négligences en cascade qui peuvent s'avérer dramatiques.

Nous reprenons un extrait de l'exposé du **Commandant J. Rahier** [39] daté de 2004, que nous intitulerons « Les protections actives et le comportement humain » :

« ...Une caractéristique commune des techniques de sécurité active apparaît tout de suite : c'est la nécessité d'une intervention humaine pour prendre connaissance de l'événement et réagir en fonction des informations reçues :

- l'installation de détection automatique n'éteindra jamais un incendie et n'organisera jamais une évacuation correcte ;
- l'installation d'extinction automatique laissée à elle-même n'éteindra pas l'incendie, voire provoquera des dégâts « collatéraux » excessifs ;
- l'installation EFC n'éteindra jamais un incendie et, au contraire, activera ce dernier.

Cette caractéristique est également un des points faibles des systèmes de sécurité active : sans réaction humaine appropriée, sans personnel formé, elles perdent une grande partie, voire la totalité de leur efficacité.

La deuxième caractéristique commune aux trois techniques est d'être intimement liées à l'organisation spatiale des locaux, à l'organisation technique des bâtiments.

On ne place pas n'importe où une tête de détection, une tête de « sprinklage », une grille de désenfumage.

Et toute modification des lieux (création de nouvelles parois, ouverture de certaines parois, modification du système de conditionnement d'air, etc) doit entraîner une réévaluation de la protection par sécurité active.

Cette deuxième caractéristique commune montre l'importance de l'entretien régulier de ces systèmes. Ces systèmes craignent l'influence néfaste du couple formé par le commercial et le financier (si on joint à ce couple un décorateur on atteint un mélange explosif) qui pour des raisons qui leur sont propres vont modifier la disposition des lieux et des techniques : ce qui compte c'est l'aménagement commercial du magasin, c'est la beauté des meubles du bureau du directeur, c'est l'introduction d'une nouvelle technique qui modifie toute l'organisation du travail. Et c'est bien sûr dans les budgets d'entretien que le financier va penser pouvoir faire des coupes sombres : pourquoi entretenir une installation technique qui de toute façon ne sert jamais (du moins on l'espère) ?...

Les deux caractéristiques que je viens de développer : l'obligation d'une action humaine, l'obligation d'un entretien continu sont les raisons pour lesquelles, les officiers préventionnistes, au contraire de certains chantres du Fire Safety, pensent que ces techniques ne constituent pas une panacée et que dans beaucoup de cas, elles ne peuvent être utilisées seules. Au contraire, la prévention incendie doit être un savant équilibre entre ces trois techniques (EFC, sprinklers et détection) et entre les mesures de sécurité incendie passive et les mesures de sécurité active. ...

C'est dans le quotidien que l'importance de la redondance en matière de sécurité incendie est clairement perçue. Je ne citerai qu'un exemple : l'incendie de l'usine Mabelpap à Verviers le 06-08-2002 : lorsque l'incendie provoque une explosion et que le système de sprinklage fonctionne à moins de 1 m du sol, lorsque les exutoires ne peuvent s'ouvrir..., il reste les murs de compartimentage R_f pour limiter l'extension de l'incendie. Une vision aérienne des lieux après incendie est riche d'enseignements. ...

Les systèmes de détection ont gagné en fiabilité. Nous pouvons l'affirmer, même si l'on est assez desservi au niveau des statistiques. Des évolutions sont encore à venir, par exemple pour le détecteur communiquant par ondes électromagnétiques avec le central. Le danger réside peut-être dans l'intégration du système de détection automatique dans un super ordinateur qui gère le « risque » d'un bâtiment, d'une entreprise où, à force d'affiner les asservissements, on en arrive à ne plus connaître avec précision ce qui se passe. Trop de procédures tue l'initiative humaine : la gestion des centrales nucléaires l'a clairement démontré. ...

C'est l'être humain qui a conçu tous les systèmes dont nous venons de parler. C'est lui qui devra les installer pour qu'ils aient leur efficacité maximale, qui les testera dans toutes les configurations possibles, qui devra les entretenir. C'est surtout lui qui ira prendre les informations et déterminera les suites à donner pour combattre efficacement l'incendie.

"Je suis furieux quand j'entends dire que l'être humain est toujours le maillon faible d'une chaîne de sécurité. Car, quand tout foire - permettez-moi l'expression - c'est sur les épaules du personnel présent que repose la bonne gestion de l'incident. A ce moment, il est trop tard pour se demander : a-t-il bien été formé, y a-t-on consacré les budgets nécessaires (ndlr : taux d'encadrement pendant la nuit dans les homes), lui laisse-t-on suffisamment d'initiative, a-t-on organisé des exercices de simulation ?

Croyez-moi, le rôle de l'être humain est primordial. Dans une intervention incendie le rôle de l'équipier de 1ère intervention est fondamental, lorsqu'il pose les premiers gestes, lorsqu'il renseigne correctement et avec détail les Services extérieurs de secours.

Pour parler des accidents domestiques et en particulier de l'incendie, les Services de secours seraient heureux de disposer d'autant d'heures que n'en a la prévention routière... »



Photo : entrepôt industriel de 7200 m² nord Rognac (France) - samedi 15 juin 1996 (source CIMBETON) : Les murs coupe-feu en béton ont parfaitement isolé l'incendie et empêché sa propagation aux entrepôts voisins.

5. Mécanismes thermiques

5.1. Mécanismes de transfert de la chaleur

Il y a trois mécanismes [38] de base de transfert de la chaleur :

- la convection ;
- le rayonnement ;
- la conduction.

Les trois mécanismes interfèrent durant un incendie. Il y a prédominance plus ou moins prononcée de l'un ou de l'autre suivant le moment et les endroits.

La **convection** est le mode de transfert de la chaleur vers un solide à partir des mouvements du gaz qui l'entoure. Au début de l'incendie, elle est prédominante entre le milieu environnant et l'élément de construction. Le flux de chaleur q_c - exprimé en W - échangé entre le gaz à une température T_g et 1 m² de paroi à une température T_p vaut :

$$q_c = \alpha_c \cdot (T_g - T_p)$$

où α_c = coefficient d'échange par convection, variant de 4 à 50 W/m²°C selon la face de la paroi considérée (exposée ou non au feu) et la courbe de température choisie.

Le **rayonnement** est un transfert d'énergie par ondes électromagnétiques et ne requiert la présence d'aucun milieu entre la source de chaleur et le receveur. Ce mécanisme est prédominant lors de l'extension de l'incendie et lorsque le feu est en pleine intensité. Le flux de chaleur q_r échangé entre l'environnement (parois+gaz) à une température T_g et 1 m² de paroi à une température T_p vaut :

$$q_r = \Phi \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_g^4 - T_p^4)$$

où

Φ = facteur de forme du profil de l'élément. Il est égal à 1 si la section est rectangulaire ou circulaire. Il est plus petit que 1 dans les autres cas. Ce concept se base sur le flux énergétique réel qui atteint les surfaces exposées aux gaz chauds ;

ε = facteur conventionnel représentant l'émissivité relative globale entre l'environnement et la paroi. Selon les normes européennes (les EN) béton et feu, il vaut 0,8 par défaut, 0,7 pour une surface béton, 0,8 pour une surface acier, 0,4 pour les aciers inox. il faut noter que les prénormes européennes (les ENV) donnaient des valeurs de 0,8, 0,7=0,56 (par défaut)

σ_0 = constante de Stefan-Boltzmann = 5,68.10⁻⁸ W/m²K⁴,

T_g et T_p sont les températures absolues exprimées en kelvins.

La **conduction** est le mode de transfert dans les solides. La conductivité λ caractérise l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Des valeurs de conductivité pour différents matériaux sont données dans le tableau du §5.2.3. Dans le cas d'un

écoulement thermique unidimensionnel, le flux de chaleur q_λ qui traverse une surface de 1 m² perpendiculaire à la direction de l'écoulement vaut :

$$q_\lambda = \lambda \cdot (\partial T / \partial x)$$

où

λ varie de 2,0 à 0,6 W/m°C pour le béton en fonction de la température. Cette variation est explicitée au §7.2.1.

$\partial T / \partial x$ représente le gradient thermique à l'intérieur de la paroi.

La matière intérieure des parois va se réchauffer sous l'élévation de la température. La quantité de chaleur absorbée par seconde et par m³ de matériau de masse volumique ρ vaut :

$$q_m = \rho \cdot c \cdot (\partial T / \partial t)$$

où

c = chaleur massique (J/kg) qui varie en fonction de la température. Cette variation est explicitée au §7.2.1.

Les températures au sein des éléments de construction se déterminent en résolvant soit par différences fines, soit par éléments finis les équations couplées :

$$q_m = (q_c + q_r) - q_\lambda$$

exprimant le bilan thermique au niveau des couches superficielles des parois et

$$q_m = -q_\lambda \quad c \cdot \rho \cdot (\partial T / \partial t) = -\lambda \cdot (\partial T / \partial x) \quad (\text{équation 1})$$

exprimant le bilan thermique à l'intérieur des parois.

5.2. Principaux facteurs influençant la température des gaz

Le développement d'un incendie [38] et donc la température des gaz est lié à trois paramètres principaux : l'importance de la charge combustible et son débit calorifique maximal, la surface des ouvertures du compartiment sur l'extérieur et les propriétés thermiques des parois.

5.2.1. La charge incendie et son débit calorifique maximal (RHR)

Si l'alimentation en air est suffisante, ce qui entraîne un feu contrôlé par le combustible, c'est l'importance de la charge incendie, associée à son débit calorifique, et sa disposition qui exercent une influence décisive sur la sévérité du feu.

La densité de charge incendie est définie comme :

$$q = (\sum M_i P_i) / S$$

Avec S = surface du compartiment (en m²)

M_i = masse du matériau i (en kg)

P_i = potentiel calorifique du matériau i (en kJ/kg)

Cette somme porte sur tous les matériaux du compartiment y compris ceux du bâtiment lui-même. Le béton, étant incombustible, ne contribue pas à la charge calorifique.

Pour des raisons historiques et de facilité, la charge définie ci-avant est encore parfois remplacée par une “ charge équivalente de bois ” (1 kg de bois correspond à 17,5 MJ). Pour la facilité du lecteur, nous utilisons cet équivalent bois plutôt que des MJ.

En réalité, la valeur de la charge incendie définie ci-avant doit être affectée d’un coefficient d’utilisation qui tient compte du fait que la majorité des matériaux ne se consomment pas entièrement et ne libèrent donc pas la totalité de l’énergie qu’ils contiennent. Ceci est lié au matériau lui-même, à sa géométrie, à sa surface exposée aux flammes, etc. La charge incendie contribuant réellement à la combustion se situe entre 50 et 90 % de la charge incendie théorique définie ci-dessus. Dans le cas des matériaux principalement cellulosiques, selon l’annexe E de la NBN EN 1991-1-2 [106], il est admis de supposer un coefficient de combustion $m=0,8$.

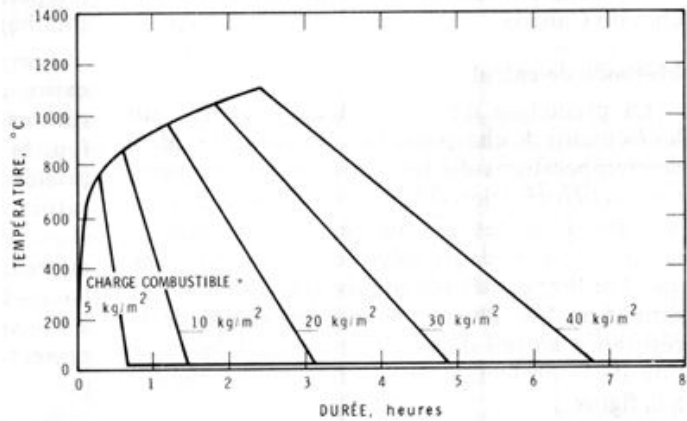


Figure : Effet de la charge combustible sur la courbe de température du feu. [57]

Pour fixer les idées, cette norme précise, dans son annexe informative E, des valeurs de densité de charges calorifiques. Converties en équivalent de kg de bois par m², les charges combustibles moyennes sont déterminées pour les bâtiments, suivant les différents types d’occupation :

Type d’occupation	charges combustibles moyennes (kg de bois /m²)
bibliothèque	86
habitation	45
centre commercial	34
bureau	24
hôtel	18
théâtre cinéma	17
école (classe)	16
hôpital	13
transport	6

Tableau : densités de charge calorifique [106]

La charge incendie théorique [5] ne peut pas être utilisée comme critère absolu pour le danger incendie. En effet, les matériaux diffèrent entre eux par la facilité avec laquelle ils peuvent être enflammés et par la vitesse à laquelle ils brûlent, c’est-à-dire par la quantité de chaleur qu’ils peuvent libérer par unité de temps. La première caractéristique influence la fréquence avec laquelle des incendies peuvent survenir, alors que la seconde détermine l’intensité d’un incendie éventuel.

L’expérience montre que, si les autres paramètres sont constants, la durée d’un incendie est proportionnelle à sa densité de charge calorifique. Il en résulte qu’une augmentation d’une charge normale d’incendie provoquera généralement une augmentation de la durée de l’incendie, mais pas spécialement de la valeur maximale de la température moyenne dans le local.

Le mode de stockage des matériaux conditionne la vitesse de combustion. Par exemple, les rouleaux de papier s’effeuillent : il est nécessaire de les stocker horizontalement (voir §8.4.1 activités dans les bâtiments industriels).

A ce titre, les deux paramètres t_{α} et RHR_f permettent de caractériser la distribution des matériaux combustibles :

t_{α} = le temps nécessaire pour atteindre un débit calorifique de 1 MW et
 RHR_f = RHR pour “ Rate of Heat Release ” : le débit calorifique maximal produit par 1 m² de feu dans le cas d’un feu contrôlé par le combustible. A titre indicatif, voir le tableau suivant :

Type de stockage – d’occupation	RHR_f (kW/m²)	t_{α} (s)
Palettes de bois empilées sur une hauteur de 0,5 m	1250	
Palettes de bois empilées sur une hauteur de 3,0 m	6000	
Bouteilles en plastique dans des cartons empilés sur une hauteur de 4,6 m	4320	
Panneaux rigides en mousse de polystyrène empilés sur une hauteur de 4,3 m	2900	
Magasins de détail, bibliothèque, centre commercial, salle de théâtre et de cinéma	500	150
Bureaux, logement, hôpitaux, chambre d’hôtel, classe d’école...	250	300

Tableau : débit calorifique maximal produit par m² de feu [42]

Une vitesse de développement élevée du feu est caractérisée naturellement par un t_{α} faible. C’est le cas d’une bibliothèque, d’un centre commercial, d’une salle de théâtre, d’un cinéma. Parallèlement, un débit calorifique maximal important se rencontre dans ces mêmes lieux.

Le débit calorifique RHR peut être limité par la ventilation. Ceci est déterminé par un programme « une zone » (voir §6.2.3.1 plus loin), où l’EC1 feu donne une expression simplifiée de ce débit calorifique maximum limité.

Le schéma ci-après montre la représentation classique du débit calorifique en fonction du temps. Ce débit augmente selon une loi parabolique, reste constant jusqu’à ce que 70 % de la charge au feu soit consommée puis décroît linéairement. La surface sous la courbe représente la charge calorifique totale accessible.

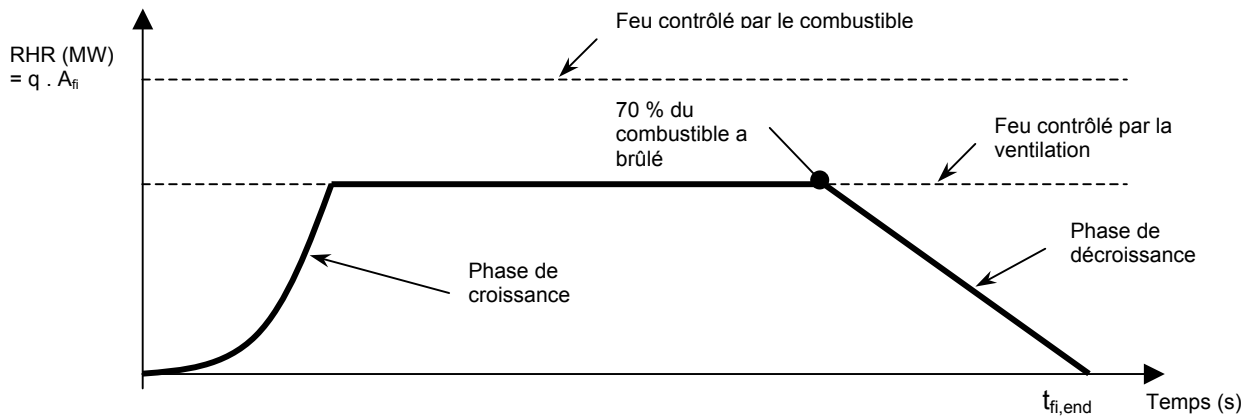


Figure : débit calorifique en fonction du temps

5.2.2. La ventilation

La ventilation influence fortement le développement d'un incendie. Le phénomène n'est en rien différent d'un poêle ou d'une cassette où l'arrivée d'air peut être modulée, modifiant ainsi le développement et l'intensité maximale du feu. Le débit de ventilation est directement proportionnel au facteur de ventilation, appelé encore facteur d'ouverture O :

$$D = C^{te} \cdot O = C^{te} \cdot (A_v/A_t) \cdot (h_{eq})^{0,5}$$

où

- A_v = surface totale des ouvertures sur tous les murs (m^2),
- A_t = surface totale du compartiment (murs, plafond et plancher, y compris les ouvertures) (m^2),
- h_{eq} = moyenne pondérée des hauteurs de fenêtre sur tous les murs (m),
- O = ouverture (en $m^{0,5}$),
- D est exprimé en kg d'air/s.

L'augmentation des surfaces d'ouverture permet une meilleure ventilation et se traduit donc par des pics de température plus élevés et par une phase de décroissance plus rapide.

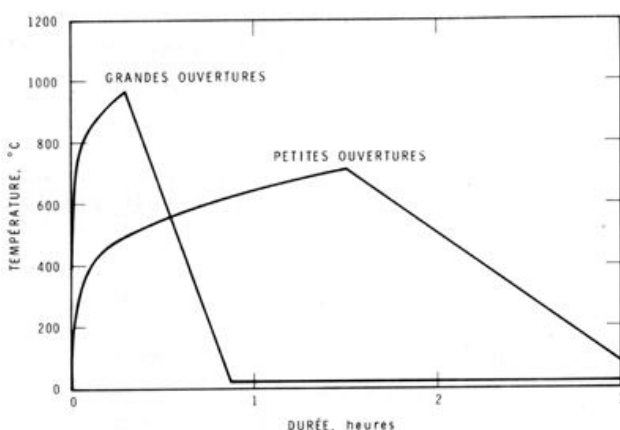


Figure : effet des ouvertures comme facteur sur la courbe de température du feu. [57]

Lorsqu'il est fait usage de bouches d'évacuation des fumées, actionnées automatiquement par des éléments sensibles à la température, l'amenée d'air complémentaire qui en résulte

active l'incendie. La pratique a montré que l'effet est très positif : en effet, une meilleure visibilité offre la possibilité d'une intervention plus rapide des services de secours. De plus, grâce à l'extension moindre des fumées, les dégâts des fumées ainsi que le risque d'intoxication des occupants sont réduits.

5.2.3. Caractéristiques thermiques des parois

Ces caractéristiques influencent le développement de l'incendie, mais dans une moindre mesure que la charge incendie et la ventilation.

La chaleur qui est produite au début de l'incendie est en partie transportée vers l'extérieur par la ventilation et en partie absorbée par les planchers, les parois et le plafond.

La température dans le local est déterminée par le bilan thermique entre production et transport de chaleur.

La quantité de chaleur qu'il faut fournir au matériau pour élever sa température dépend de son **effusivité thermique**

$$Eff = (\lambda \cdot \rho \cdot c)^{0,5}$$

L'effusivité donne une image de l'inertie thermique des parois. Plus elle est grande, plus elle absorbera de l'énergie lors de son exposition au feu. La vitesse de montée en température des parois sera d'autant plus faible que l'inertie est importante.

Si une face des parois est soumise à une variation brusque de température T , maintenue ensuite pendant un temps t , la quantité totale de chaleur Q absorbée par la paroi répond à l'équation :

$$Q = 2 \cdot T \cdot (t/\pi)^{0,5} \cdot Eff$$

Le calcul [5] montre que, avec un revêtement appliqué sur une paroi en béton et sur une paroi recouverte d'une couche de matière isolante de faible densité, le rapport entre les temps d'embrasement généralisé vaut 10, alors que le rapport des effusivités est voisin de 30.

L'effusivité thermique élevée des parois en béton se révèle dès lors intéressante autant pour le confort thermique que pour le retardement du flashover.

La diffusité thermique

a = λ / (ρ.c)

est quant à elle une mesure de la vitesse à laquelle la température évolue dans le matériau. Cette grandeur apparaît dans l'équation 1 donnée au §5.1. Plus elle est grande, plus le matériau s'échauffe rapidement.



Photo : RASTRA

La longueur de diffusion L_{diff} est la profondeur x à laquelle la variation de température vaut près de la moitié de la variation brusque de température à la surface. L'équation :

$L_{diff} = (a.t)^{0.5}$

néglige les changements de phase éventuels dans le matériau lui-même.

Le tableau ci-après donne un aperçu des propriétés thermiques pour quelques types de matériaux :

Matériau	température de fusion (°C)	α 10 ⁻⁶ /°C	ρ (kg/m³)	λ (W/m°C)	c (kJ/kg°C)	Eff (J/m²s ^{0.5} °C)	a (m²/s.10 ⁻⁶)
béton	1200 à 1400	12 à 18	2400	0,6 à 2,0	1	1200 à 2200	0,25 à 0,8
Terre cuite	-	5 à 7	1500	0,4 à 0,5	0,84	710 à 800	0,3
acier	> 1500	12 à 17	7850	50 à 60	0,45	13300 à 14600	15
Bois massif	300 (*)	3 à 5	400 à 1000	0,12 à 0,16	0,12 à 0,16	80 à 160	0,1
Laine de roche	1200	-	10 à 200	0,03 à 0,04	0,03 à 0,04	3 à 18	0,2 à 5
plâtre	-	10 à 12	1500 à 1800	0,5 à 0,8	0,84	800 à 1100	0,4
* température de combustion							

Le transfert de chaleur dans le matériau est, en régime permanent, directement proportionnel à la conductivité thermique alors qu'en régime transitoire, il est, comme montré ci-dessus, directement proportionnel à l'effusivité thermique. Dans le domaine de l'incendie, c'est donc l'effusivité thermique $Eff = (\lambda.\rho.c)^{0.5}$ élevée, associée à la massivité des éléments en béton, qui se révèle particulièrement favorable dans l'évolution des **températures des gaz** (retardement du flashover).

Le gradient de température dans le matériau, en régime permanent, est inversement proportionnel à la valeur de la conductivité, alors qu'en régime transitoire, le champ de température est fonction de la diffusivité thermique. Dans le domaine de l'incendie, c'est donc la diffusivité thermique $a = \lambda/(\rho.c)$ faible, associée avec la massivité des éléments en béton qui est particulièrement favorable dans l'évolution des **températures au sein du matériau**, plutôt que la conductivité thermique seule du béton.

5.3. La sévérité de l'incendie

En résumé, la sévérité de l'incendie est caractérisée par les paramètres suivants :

- la durée de l'incendie, déterminée par la charge d'incendie et la ventilation ;
- la température moyenne dans le compartiment, déterminée par la ventilation et l'isolation thermique du compartiment ;
- la vitesse avec laquelle le feu se développe et avec laquelle la température croît, influencée par le comportement thermique des parois.

6. Actions

La présentation des actions mécaniques est nécessaire pour la compréhension de la résistance au feu des structures où intervient la notion de taux de chargement. La prise en compte de ce paramètre permet un dimensionnement plus affiné.

La présentation des actions thermiques a pour but, quant à elle, la compréhension des « feux naturels » dans la démarche du « Fire Safety Engineering ». Cette démarche prend en compte les phénomènes physiques et les conditions d'intervention rencontrés pour le bâtiment étudié.

La performance des éléments de structure en béton vis-à-vis du feu permet au concepteur de bâtiments qui le choisit de ne pas s'encombrer de protections complémentaires ou de ne pas recourir à des évaluations complexes et à des demandes de dérogation.

Dans le même esprit, le recours au béton donne le plus souvent, sans dépenses additionnelles, des résistances au feu dépassant les courbes nominales. La sécurité relative des autres modèles, quant à elle, est souvent plus faible que celle atteinte avec la courbe ISO. Exception est faite dans le cas où les charges au feu sont extrêmement élevées comme, par exemple, dans les bibliothèques pour autant que des coefficients de réduction des charges au feu n'aient pas été appliqués pour tenir compte des sécurités actives !

6.1. Les actions mécaniques

Les actions sur les structures soumises au feu sont classées comme des actions accidentelles. Dès lors, les combinaisons d'actions à considérer sont des combinaisons dont les coefficients de pondération des charges sont réduits par rapport à ceux qui sont utilisés lors du dimensionnement à froid. En effet, la probabilité d'occurrence simultanée d'un incendie et de sollicitations extrêmes est très faible.

Ainsi pour fixer les idées :

la combinaison à froid $1,35G + 1,5Q$

devient à chaud $G + \psi_k Q + A_d$

Avec

$\psi_k = \psi_2 = 0,3$ pour les bâtiments privés, résidentiel et de bureau ;
 $\psi_2 = 0,6$ pour les bâtiments commerciaux recevant du public et les lieux recevant du public ;
 $\psi_2 = 0,8$ pour les charges de stockage (bibliothèques, ...);
 $\psi_2 = 0$ pour la neige ;
 $\psi_k = \psi_1 = 0,2$ pour le vent ;
 $G =$ poids mort ;
 $Q =$ charge d'exploitation ou charge climatique et

$A_d =$ la valeur de calcul de l'action thermique indirecte due à l'incendie (bridage, déplacement).

En général, l'application de ces combinaisons d'action conduit à une charge en situation d'incendie de l'ordre de 50 à 70 % de celle prise en compte lors du dimensionnement à froid.

Le taux de chargement à chaud η_i le plus élevé qui soit est 1/1,35 soit 0,74. En pratique, il y a toujours une petite charge d'exploitation qui donne le taux de chargement de 0,7.

Nous utiliserons à nouveau cette notion dans la présentation de la méthode des valeurs tabulées (voir §8.1.1 et 8.1.2).

6.2. Les différents modèles de l'action thermique

Il y a plusieurs façons de modéliser l'incendie [18] à l'intérieur d'un bâtiment. Dans un ordre croissant de complexité, les modèles utilisés le plus couramment sont :

- les courbes nominales ;
- les courbes paramétriques ;
- les modèles de zones ;
- les modèles CFD

et enfin les modèles de feux localisés qui eux n'affectent pas uniformément la surface du compartiment.

Ils sont développés dans la norme EC1 feu : la courbe ISO dans le corps de la norme et les autres modèles dans les annexes informatives.

6.2.1. Courbes nominales

Les courbes nominales dont la courbe ISO ont été présentées ci-avant. Elles ont toutes les caractéristiques suivantes :

- la température est uniforme dans le compartiment ;
- le seul paramètre dont elles dépendent est le temps ;
- il n'y a pas de phase de refroidissement.

La courbe nominale ASTM, utilisée aux Etats-Unis, est très proche de la courbe ISO.

6.2.2. Courbes paramétriques

Une courbe paramétrique montre également l'évolution de la température des gaz de combustion en fonction du temps. La température dans le compartiment est uniforme mais, contrairement aux courbes nominales, la relation est calculée sur base des trois paramètres principaux : charge incendie, ventilation et propriétés des parois.

Il faut noter que ces courbes ne peuvent être utilisées qu'au stade du prédimensionnement, car elles sont parfois insécuritaires. Ceci est mentionné dans notre future annexe nationale (ANB) à l'Eurocode 1, partie 1-2. Au stade de la réalisation, un calcul suivant un modèle de zone doit être réalisé si le concepteur souhaite aller au-delà de la courbe ISO.

6.2.3. Modèles de zone

Ces modèles utilisent les paramètres développés au §5.2.

6.2.3.1. Modèles à une zone

Les modèles à une zone sont des modèles numériques qui calculent l'évolution de la température des gaz en fonction du temps, en intégrant les équations différentielles ordinaires exprimant les bilans massiques et énergétiques. Ils supposent que la température est uniforme dans le compartiment. Un exemple en est donné à la figure ci-après.

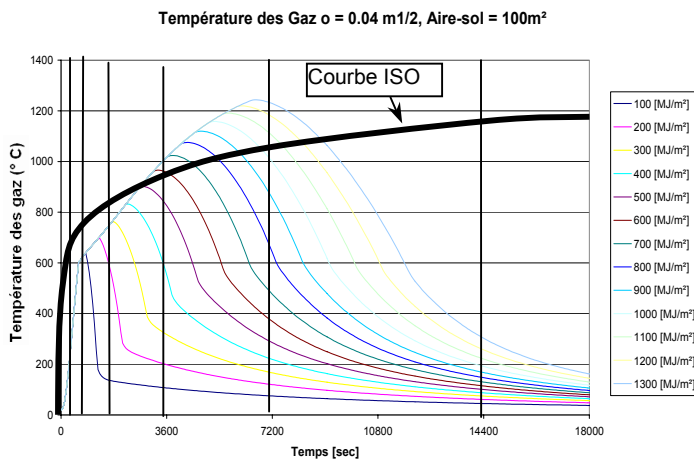


Figure : exemple de courbe obtenue par un modèle de zone pour différentes charges au feu de calcul q_{fa} pour un compartiment de $10\text{m} \times 10\text{m} \times 3\text{m}(=h)$ avec des parois de 12 cm de béton recouvertes de $1,5 \text{ cm}$ de plâtre dans le cas d'un RHR_f de 250 kW/m^2

6.2.3.2. Modèles à deux zones

Les modèles à deux zones sont des modèles numériques qui calculent l'évolution de la température des gaz en fonction du temps dans la couche inférieure et supérieure, à l'aide des bilans massiques et énergétiques écrits pour chacune des deux couches au sein desquelles la température est supposée uniforme.

Un incendie peut être appréhendé par un modèle à deux zones qui lui-même basculera vers un modèle à une zone au moment du flashover. Ces modèles ont été développés plus particulièrement par l'Université de Liège, notamment au sein du programme OZONE.

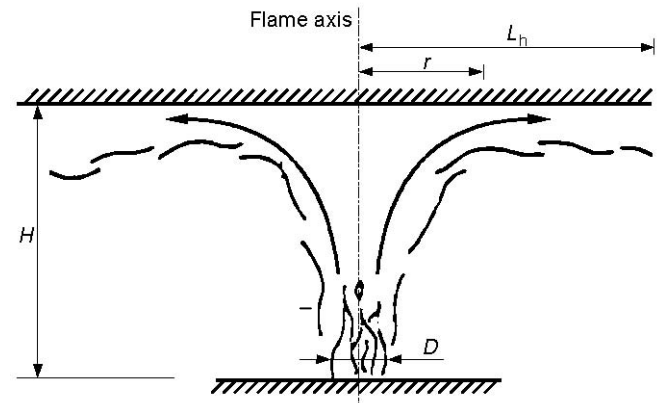
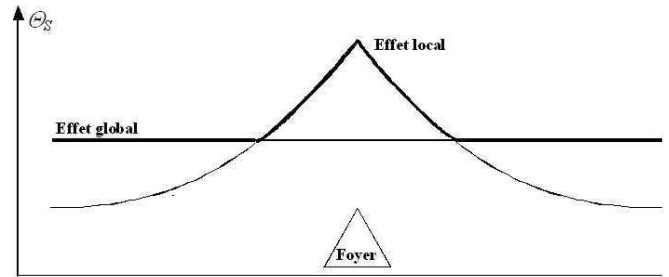
Ces modèles sont utilisés lorsque l'incendie est de petite taille comparée à celle du local.

L'épaisseur de la couche inférieure reste à température assez basse et ne contient pas de produits de combustion. Elle est très importante pour apprécier les conditions de survie des occupants dans le compartiment.

6.2.4. Modèles de feux localisés

La norme EC1 feu donne également la possibilité d'effectuer un calcul de l'échauffement local des gaz au droit d'un feu localisé

qui pourrait se développer. Ce type de feu peut entraîner, au même titre qu'un feu généralisé, la ruine d'un bâtiment.



Feu localisé : modèle d'Hasemi [106]

6.2.5. Modèles CFD

Les méthodes avancées en Dynamique des fluides (CFD pour Computational Fluid Dynamics) analysent les systèmes incluant l'écoulement des fluides, les transferts de chaleur et les phénomènes associés, cela en résolvant les équations fondamentales de la Mécanique des Fluides.

Ces équations constituent une représentation mathématique des lois physique de conservation.

Dans ces modèles, les équations différentielles de la thermodynamique et de l'aérodynamique sont résolues en un très grand nombre de points du compartiment pour déterminer, entre autres, les températures et les composantes de vitesse des fumées. Très complexes à manipuler et très sensibles aux hypothèses, ces modèles sont réservés à la recherche. Ils sont surtout utilisés pour étudier la dispersion de la fumée et de la chaleur, rarement pour évaluer en termes de flux de chaleur l'impact du feu vers les éléments de structure.

6.2.6. Quelle courbe, quel modèle choisir ?

Notre réglementation actuelle n'accepte que l'usage des courbes nominales. Une dérogation spéciale doit être introduite auprès du Service Public Fédéral si le concepteur souhaite justifier la résistance au feu de son bâtiment à l'aide d'autres courbes.

Dans la conception des bâtiments, le dimensionnement selon les courbes paramétriques ou de modèles de zone plutôt que de la courbe ISO influence fortement le risque d'effondrement des ouvrages en cas d'incendie : un feu ISO de 2 heures dans des habitations, des bureaux ou tout autre bâtiment, avec une

densité de charge calorifique inférieure, est plus sévère qu'un feu calculé avec des courbes paramétriques ou des modèles de zone. L'usage de ces courbes est développé plus loin dans le cadre du dimensionnement par le « Fire Safety Engineering ».

Il convient de garder un esprit critique vis-à-vis des valeurs de charges calorifiques annoncées dans la littérature : d'autres ordres de grandeur que ceux donnés par l'annexe informative de l'EC1 feu (voir §5.2.1) sont présentés dans le document [25] (1983) (voir tableau ci-après). Pour les bâtiments administratifs (USA, Allemagne, France, Pays-Bas) les charges d'incendie sont de 50 kg de bois/m² et, dans 95 % des cas, inférieures à 90 kg/m².

Types de bâtiment	Densité de charge calorifique moyenne (kg de bois/m²)	Densité de charge calorifique maximale (kg de bois/m²)
logements	15	35
écoles	15	50
hôpitaux	20	50

Certaines différences notoires forcent la prudence. Nous suggérons qu'en Belgique une analyse plus précise conforte les chiffres les plus récents. Les catégories bureaux, entre autres, devraient être plus détaillées.

Les conditions d'un échauffement pendant une demi-heure suivant la courbe standard peuvent généralement être obtenues dans de nombreux locaux. L'exigence d'une ½ heure correspond très grossièrement à une charge d'incendie d'environ 40 kg de bois par mètre carré. Elle permet d'assurer la stabilité des bâtiments à usage d'habitation, où l'on rencontre des charges comprises entre 15 et 60 kg/m². Un dépassement de la moyenne de la charge d'incendie ou bien des conditions de ventilation défavorables généreront un risque élevé d'effondrement de la structure du bâtiment.

Pour des bâtiments à usage d'habitation, l'exigence d'1 heure offre un risque faible d'effondrement de la structure. .

L'exigence de 2 heures se justifie pour les compartiments à charges d'incendie élevées. Ces charges se rencontrent dans les bibliothèques, les entrepôts d'archives. Cette exigence se justifie également pour les bâtiments élevés où l'intervention des services d'incendie doit se faire par l'intérieur du bâtiment. Les conséquences d'un effondrement sont également très graves pour le voisinage.

En choisissant des facteurs de ventilation qui requièrent le moins de combustible possible, on peut calculer que des durées de feu ISO de 30, 60, 90 et 120 minutes sont atteintes pour des charges d'incendie de 40, 80, 120, et 160 kg bois/m².

7. Les matériaux

7.1. Les phénomènes physiques et chimiques dans le matériau béton

Bien que les normes fournissent des règles simples et aussi de plus complexes à utiliser, il est important de comprendre les propriétés du matériau béton soumis à un feu.

Un mot sur les résultats de tests [55]

Pour les tests d'exploration du matériau béton, spécialement pour caractériser les propriétés mécaniques, des vitesses d'échauffement de l'ordre de 2 °C par minute sont trop faibles. Elles ne simulent pas les conditions d'incendie. Elles sont néanmoins utilisées par les scientifiques et recommandées par le comité RILEM pour, autant que possible, dissocier le matériau des effets structuraux résultant de l'échauffement d'un échantillon réduit (par exemple 6 cm de diamètre et 18 cm de haut).

Plus encore que dans d'autres domaines, les résultats obtenus relatifs au comportement du béton exposé au feu sont fortement dépendant d'un grand nombre de paramètres :

- Le cycle thermique imposé joue un rôle important : chauffage, plateau élevé de température, résistances à chaud, refroidissement, résistances résiduelles après refroidissement à température ambiante, résistances "post cooling" un certain laps de temps après le refroidissement, seconde chauffe, etc. ;
- La variation du niveau de chargement durant la montée en température influence notablement les caractéristiques mécaniques ;
- Les conditions de confinement ("sealed" = pas d'échange d'humidité avec l'extérieur ou au contraire "unsealed") des échantillons influencent les distributions de pression de vapeurs d'eau.

Les phénomènes physiques et chimiques

En cas d'incendie, une très forte augmentation [27] 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 des retraits, des 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 (voir figure ci-après). Si les pores capillaires sont trop fins, la pression de vapeur qui augmente peut générer dans le béton des contraintes de traction à ce point importantes 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 »).

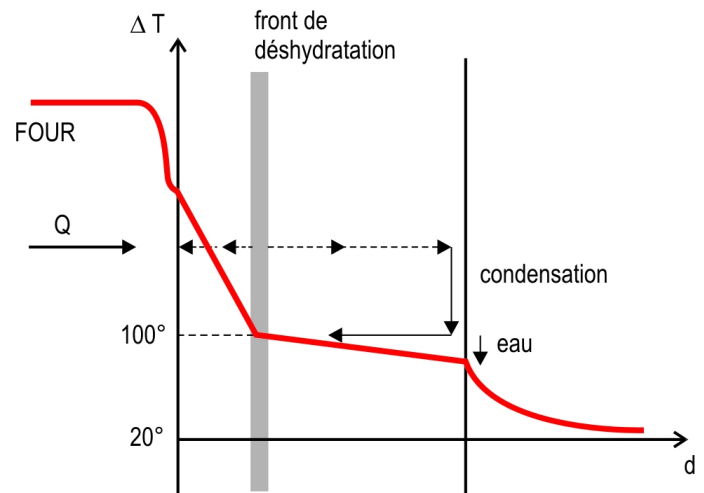


Figure : Température dans une paroi en béton exposée au feu [5]

Pour le béton, la perte de résistance résulte surtout de la formation de fissures internes et de dégradation/désintégration de la pâte de ciment. En effet la pâte se contracte alors que les granulats se dilatent. 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 tableau ci-après).

Le bulletin n°37 [69] du dossier ciment publié par FEBELCEM présente en deux pages au §5 les phénomènes physiques et chimiques rencontrés pour le béton soumis au feu. Les résistances résiduelles des bétons et des aciers y sont également présentées.

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.

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 changements [55] 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 de la Tamise, "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 !

L’éclatement explosif du béton (« spalling ») pourrait se manifester 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’entraver, 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 pour les poutres une épaisseur d’âme minimale selon la durée de résistance recherchée (voir tableau au §8.1.2.4). Cette imposition vise à éviter la rupture brutale de l’âme de la poutre.

Comportement physique des éléments en béton : Pour une colonne exposée au feu [5] 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.

Ce comportement est pris en compte dans la vérification des éléments structurels par les Eurocodes.

Réactions du béton à une attaque thermique	
Température dans le béton (°C)	Réaction du béton
< 100	Cette température est en règle générale inoffensive pour le béton. Simple dilatation.
> 100	Le béton perd son eau libre. L'eau non chimiquement liée s'évapore des pores capillaires.
100 à 800	Le béton perd son eau chimiquement liée de CSH
> 300	La pâte se contracte tandis que les granulats se dilatent. Un échauffement de longue durée à cette température réduit considérablement la résistance à la traction. La décomposition du béton s'amorce.
400 à 600	L'hydroxyde de calcium (Ca(OH) ₂) se décompose en oxyde de calcium (CaO) et eau (H ₂ O). La vapeur d'eau peut engendrer un phénomène d'écaillage local.
575	Transformation spontanée du quartz α en quartz β qui va de pair avec une augmentation du volume du béton.
>700	La transformation du calcaire (CaCO ₃) en oxyde de calcaire (CaO) ou "chaux vive" et dioxyde de carbone (CO ₂) s'amorce.
1 150 à 1 200	Le béton commence à fondre. La pâte de ciment d'abord, les granulats ensuite.
1 300 à 1 400	Liaison de la chaux avec SiO ₂ et Al ₂ O ₃ . Le béton se présente sous forme de masse fondue.

7.2. Les caractéristiques mécaniques et thermiques du béton et de l'acier

Pour effectuer la vérification des éléments en béton, il nous faut connaître le comportement thermique et mécanique du béton et de l'acier. Ces propriétés, présentées ci-dessous, ont été extraites de l'Eurocode 2 partie 1-2, la NBN EN 1992-1-2: 2005 [107]. Cette norme ne sera pas d'application en Belgique avant 2007, lorsque son ANB sera rédigée. En attendant, c'est la NBN ENV 1992-1-2 [113], complétée par son DAN qui est d'application stricto sensu. En réalité, les résultats de l'EN sont déjà exploités pour les bétons haute résistance, au cas par cas (pour la période de transition voir §3.1.2 relatif aux Eurocodes).

Dans les méthodes de calcul simplifiées, seules les propriétés de résistance sont utilisées.

Dans les méthodes de calcul avancées, les propriétés thermiques et de déformation sont aussi utilisées. C'est la raison pour laquelle il y a lieu de préciser la relation contrainte-déformation.

7.2.1. Le béton normal

La résistance du béton normal (jusque C50/60)

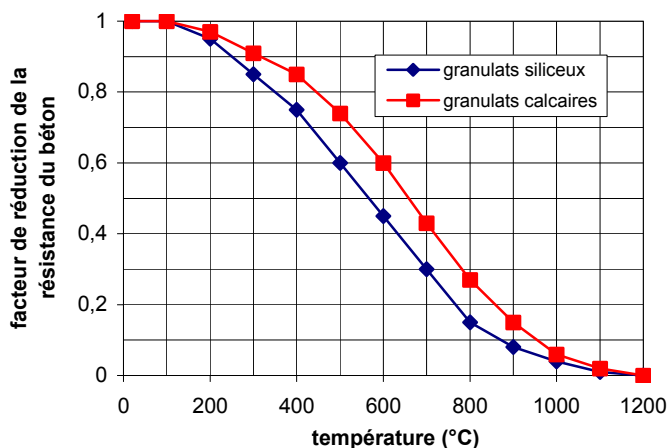


Figure : Evolution de la résistance du béton en fonction de la température θ et du type de granulats selon la NBN EN 1992-1-2:2005

L'EC2 feu précise clairement :

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.

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. Le projet d'ANB belge rend normatif la valeur $k=3$ qui est la valeur recommandée au niveau européen.

On peut supposer que lorsque les éléments sont conçus pour application intérieure (classe d'environnement EI selon la NBN B 15-001 [117]), 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.

La déformation du béton

La relation contrainte-déformation montrée dans la figure ci-après est définie par trois paramètres :

- la résistance à la compression, $f_{c,\theta}$;
- la déformation $\epsilon_{c1,\theta}$ correspondant à $f_{c,\theta}$;
- la déformation $\epsilon_{cu1,\theta}$ définissant la borne de la partie descendante de la courbe.

avec,

θ la température considérée.

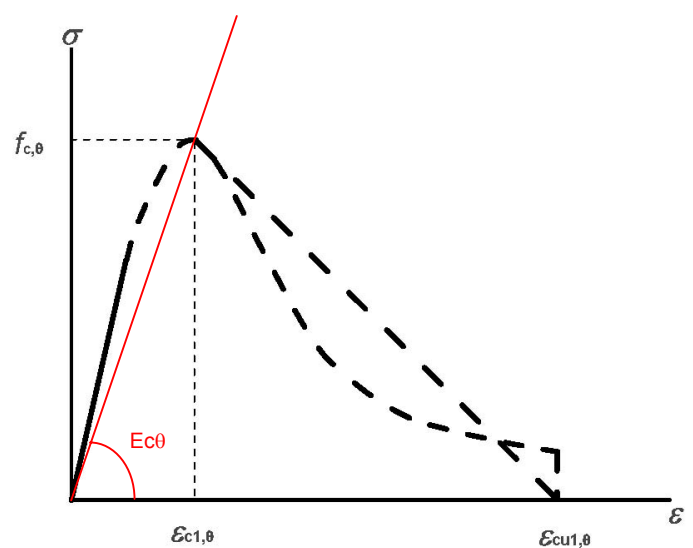


Figure : Modèle mathématique de la relation contrainte-déformation du béton en compression aux températures élevées. Pour des questions de stabilité numérique, il convient d'adopter une partie descendante. Les modèles linéaires ou non linéaires sont admis. [107]

Une dilatation empêchée ne provoquera la rupture ni du béton ni de l'acier. En effet, l'allongement du béton comportant des granulats siliceux, résultant d'une dilatation libre, est inférieur à $\epsilon_{c1,\theta}$. De même la dilatation des barres d'acier résultant d'une dilatation libre est inférieure à $\epsilon_{sy,\theta}$, comme le montre la figure ci-après. ϵ_{sy} est défini au §7.2.5.

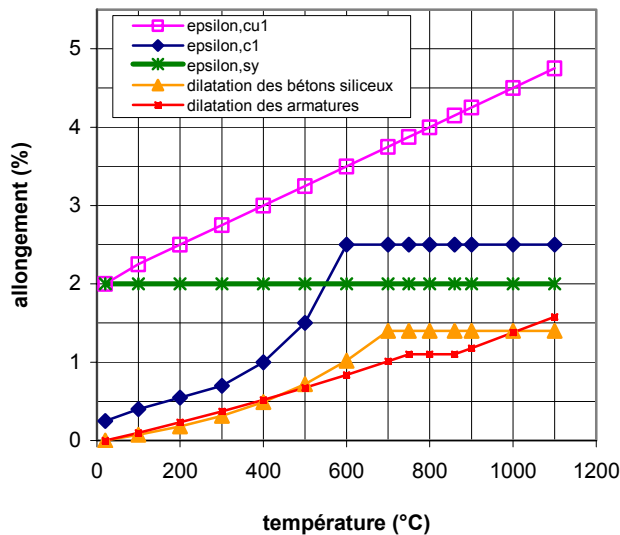


Figure : Evolution des allongements de l'acier et du béton en fonction de la température (source FEBELCEM)

La plastification du béton est le phénomène fondamental 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.

La dilatation thermique du béton

La déformation thermique $\varepsilon_c(\theta)$ du béton en fonction de la température est illustrée à la figure suivante.

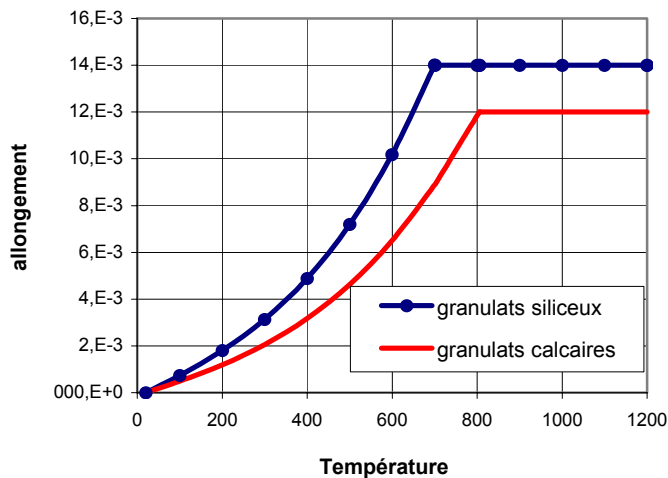


Figure : Dilatation du béton en fonction de la température [107]

La chaleur spécifique du béton

La variation de la chaleur spécifique $c_p(\theta)$ du béton en fonction de la température et de la teneur en eau est illustrée à la figure suivante.

Le pic observé entre 100 et 200 °C correspond à la chaleur nécessaire pour évaporer l'eau contenue dans le béton.

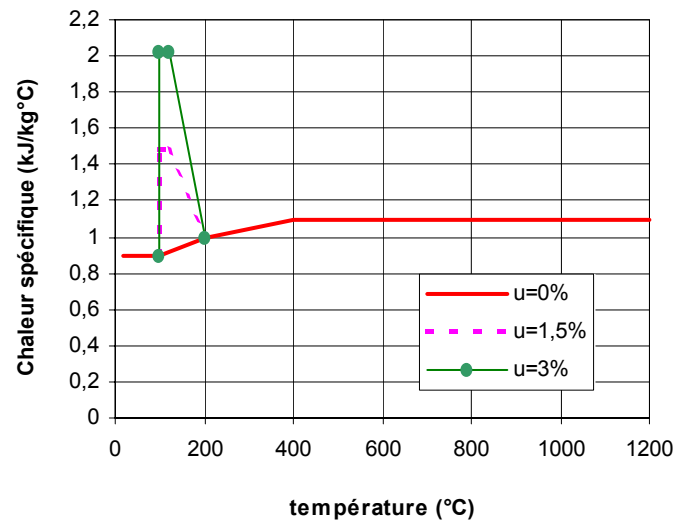


Figure : Chaleur spécifique du béton, $c_p(\theta)$, en fonction de la température pour 3 teneurs en eau, u , différentes : 0 %, 1,5 % et 3 % du poids de béton [107]

La conductivité thermique du béton

La variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique λ_c du béton, en fonction de la température, est illustrée à la figure suivante.

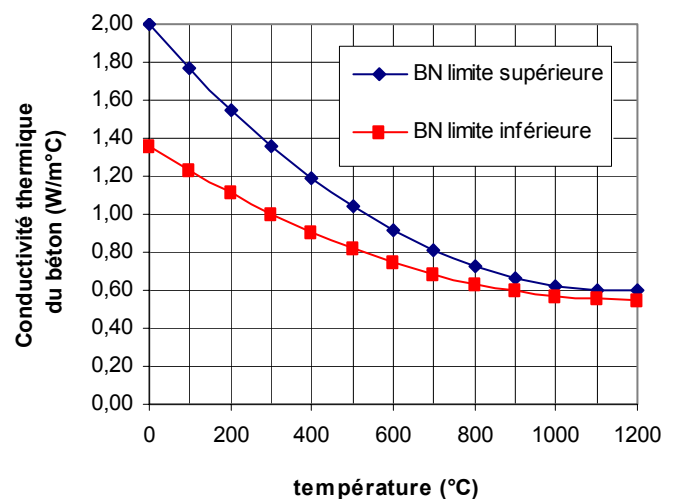


Figure : Variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique pour les bétons normaux (BN) en fonction de la température [107]

La valeur de la conductivité thermique sera fournie par l'Annexe Nationale. Cette valeur se situera dans l'intervalle défini par les limites inférieure et supérieure.

La limite inférieure de la conductivité thermique a été obtenue à partir de comparaisons avec des températures mesurées dans des essais au feu de différents types de structures en béton. La limite inférieure donne des températures plus réalistes pour les structures en béton que la limite supérieure qui a été obtenue à partir d'essais sur des structures composites en acier/béton.

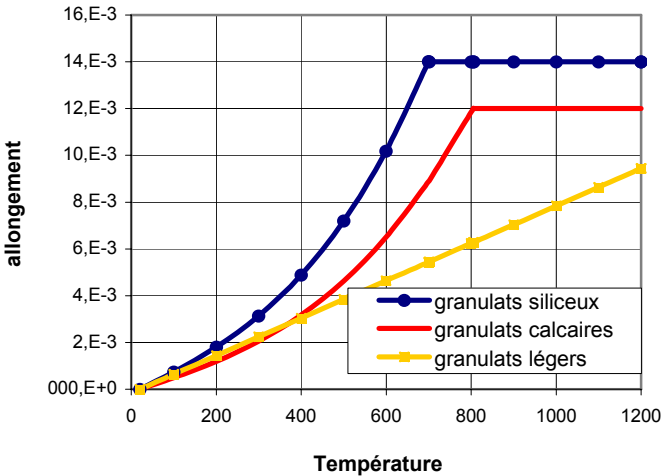
Les courbes de conductivité thermique tirées de l'ENV 1992-1-2 font apparaître à 20 °C une conductivité thermique des bétons de calcaire inférieure d'environ 20 % à celle des bétons de silice.

7.2.2. Les bétons légers.

Les propriétés des bétons de granulats légers ne sont pas indiquées dans la NBN EN 1992-1-2. A défaut, elles sont extraites de la NBN ENV 1992-1-2 [113].

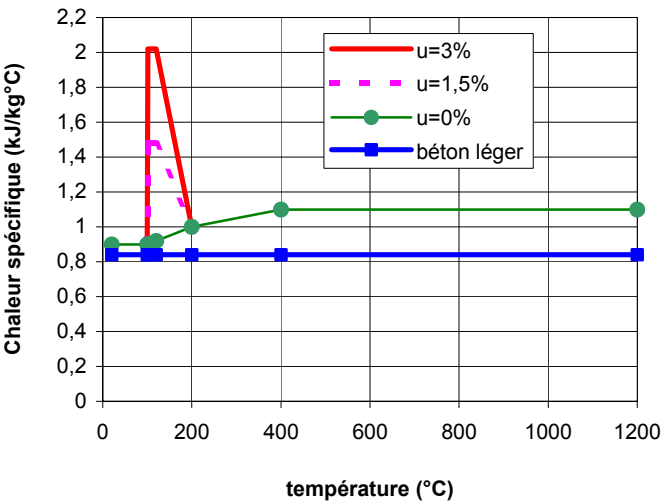
La dilatation thermique du béton léger

La déformation thermique $\epsilon_c(\theta)$ du béton en fonction de la température est illustrée à la figure suivante :



La chaleur spécifique du béton léger

La variation de la chaleur spécifique $c_p(\theta)$ du béton léger en fonction de la température et de la teneur en eau est illustrée dans la figure suivante :



Chaleur spécifique du béton, $c_p(\theta)$, en fonction de la température pour béton normal [107] et béton léger [113]

La conductivité thermique du béton léger

La variation de la conductivité thermique λ_c du béton léger en fonction de la température est illustrée par la figure suivante :

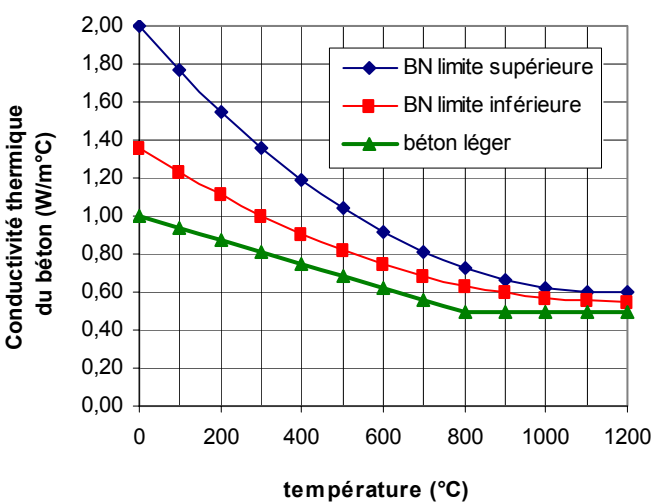


Figure : Conductivité thermique en fonction de la température pour les bétons normaux (BN) [107] et les bétons légers [113]

7.2.3. Les bétons haute résistance.

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 ».

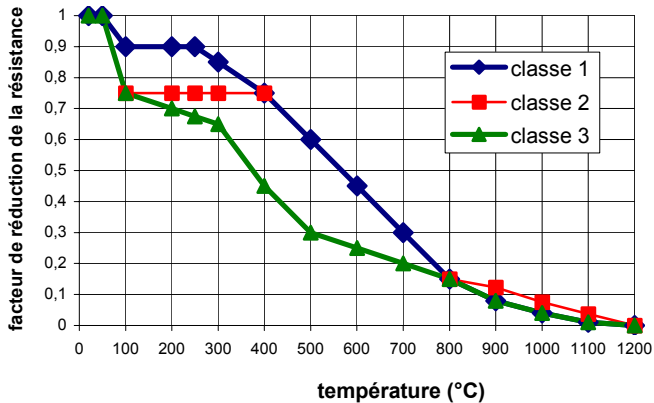


Figure : Diminution de la résistance à la compression des bétons haute résistance selon l'EC2 feu [107]. (les classes sont fonction de la résistance)

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.

Il convient de vérifier que le béton n'est pas trop bon, c'est à dire que sa **résistance réelle** n'est pas trop élevée par rapport au résultat recherché. En effet, le gain en résistance ne compenserait pas la réduction de résistance liée à la perméabilité plus faible du béton. Lorsque la résistance caractéristique réelle du béton est susceptible d'être d'une classe supérieure à celle spécifiée dans les calculs, il convient, dans les calculs, d'utiliser la réduction relative de la résistance au feu dans la classe supérieure.

Les **caractéristiques thermiques** données pour le béton normal peuvent également être appliquées pour le béton à haute résistance.

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

Pour les classes de béton C55/67 à C80/95, les règles données ci-dessus pour le béton normal relative à l'éclatement 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 C, avec $C80/95 < C \leq C90/105$ s'appliquent.

Pour les classes de béton $80/95 < C \leq 90/105$, 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 50×50 mm. Il convient que l'enrobage nominal de l'armature principale soit supérieur ou égal à 40 mm.

NOTE : 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/m^3 de fibres de polypropylène monofilamentaires.

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

7.2.4. Les bétons autoplaçants

Ces bétons ne nécessitent pas de vibration pour la mise en place. Pour plus de détails concernant la technologie de ces bétons, nous renvoyons le lecteur au bulletin ciment n°36 [59] qui traite spécifiquement de ce sujet.

La petite quantité de résultats expérimentaux montrent que la diminution de la résistance à la compression et le comportement à l'éclatement ne présentent pas de différences significatives par rapport aux bétons vibrés de composition semblable. Les tests réalisés en France ont permis leur utilisation.

7.2.5. L'acier

La résistance de l'acier pour béton armé

Le facteur de réduction de la résistance caractéristique de l'acier de béton armé en fonction de la température θ est illustré à la

figure suivante. Ce facteur varie selon le type d'acier (laminé à chaud ou à froid) et en fonction de l'allongement des aciers :

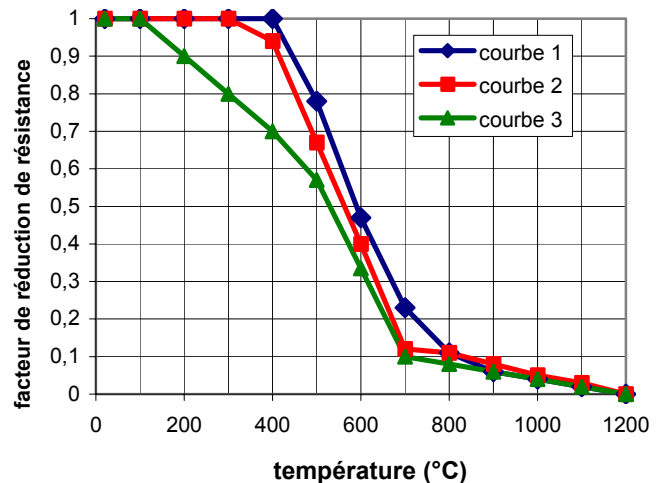


Figure : facteur $k_s(\theta)$ de réduction de la résistance caractéristique (f_{yk}) des armatures tendues ou comprimées (classe N = classe recommandée) [107]

Légende :

Courbe 1 : armatures tendues (acier laminé à chaud) pour des déformations $\geq 2\%$;

Courbe 2 : armatures tendues (acier formé à froid) pour des déformations $\geq 2\%$;

Courbe 3 : armatures comprimées ou armatures tendues pour des déformations $< 2\%$.

La différence entre les courbes est liée au fait que les résultats expérimentaux montrent que le palier de plasticité des aciers disparaît à chaud, et que donc le facteur $k_s(\theta)$ dépend de l'allongement à la rupture.

La courbe 1 est la même que dans la NBN ENV 1993-1-2 [112] pour le calcul des profilés dans les charpentes en acier.

Pourquoi limiter les déformations pour les armatures en compression (courbe 3) ?

Dans les colonnes ou dans les zones d'appui des poutres continues, les armatures peuvent se situer dans des zones aux températures élevées où le béton peut accepter de plus grandes déformations, au-delà de la limite de déformation élastique de 0,2 % pour l'acier. En limitant les déformations, l'usage de la courbe 3 prévient du danger de flambement prématuré des armatures entre les étriers, garantissant ainsi la compatibilité des déformations du béton et de l'acier.

La résistance de l'acier de précontrainte

La diminution de résistance est beaucoup plus rapide pour les aciers de précontrainte. Ceci explique l'accroissement de l'enrobage dans les méthodes de valeurs tabulées par rapport aux aciers ordinaires :

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

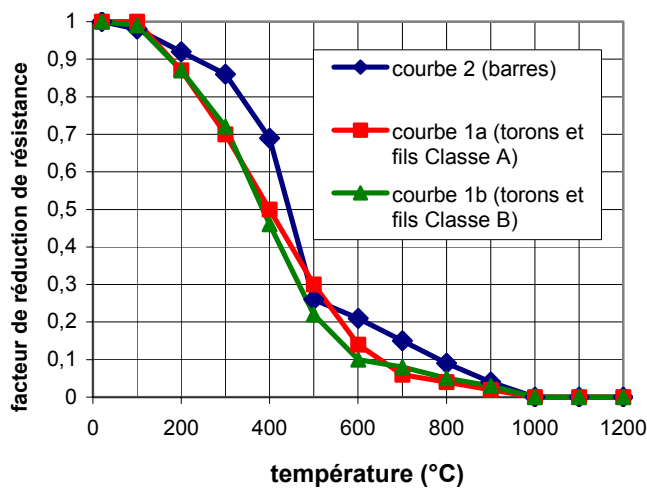


Figure : Facteur $k_p(\theta)$ de réduction de la résistance caractéristique ($\beta \times f_{pk}$) de l'acier de précontrainte [107]

Légende :
Courbe 1a : acier de précontrainte formé à froid (torons et fils) Classe A ;
Courbe 1b : acier de précontrainte formé à froid (torons et fils) Classe B ;
Courbe 2 : acier de précontrainte trempé et revenu (barres).

Ces classes correspondent à des classes de sécurité. Chaque pays peut déterminer son choix de sécurité : le niveau de sécurité est bien une compétence nationale.

La déformation de l'acier

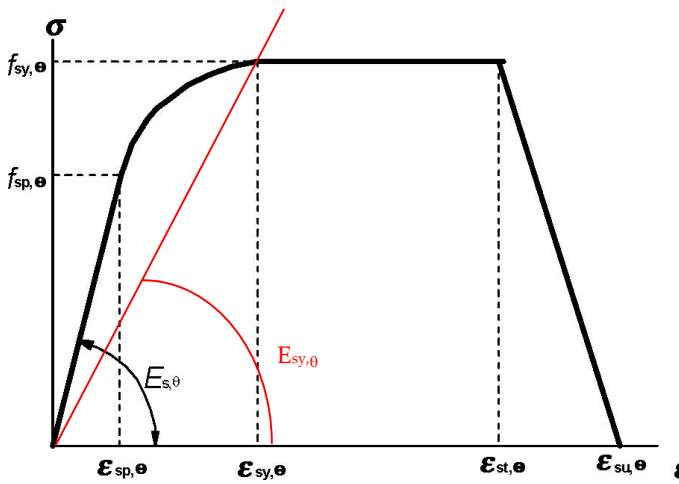


Figure : La relation contrainte-déformation est définie par trois paramètres : [107]
- la pente de la zone élastique linéaire $E_{s,\theta}$;
- la limite de proportionnalité $f_{s,\theta}$;
- la contrainte maximale $f_{sy,\theta}$.
 $\epsilon_{sy,\theta} = 2\%$, $\epsilon_{st,\theta} = 5\%$ et $\epsilon_{su,\theta} = 10\%$

La formulation de la relation contrainte-déformation peut également être appliquée pour l'acier de béton armé en compression.

La dilatation thermique de l'acier

La variation de la dilatation thermique $\epsilon_s(\theta)$ en fonction de la température est illustrée à la figure suivante :

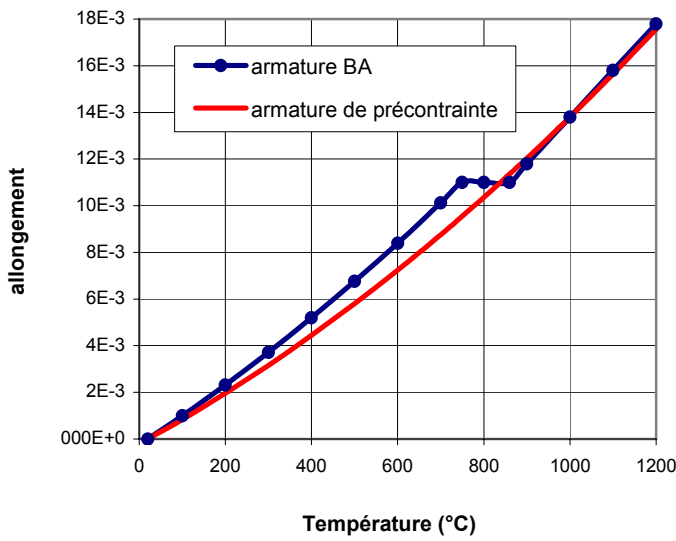


Figure : Courbe 1 : acier de béton armé, Courbe 2 : acier de précontrainte [107]

La chaleur spécifique de l'acier

Les propriétés thermiques de l'acier ne sont pas définies dans l'Eurocode 2. Elles ne sont en général pas nécessaires, sauf quand le pourcentage d'acier est important. On peut se référer aux valeurs présentées dans l'Eurocode 3 [112].

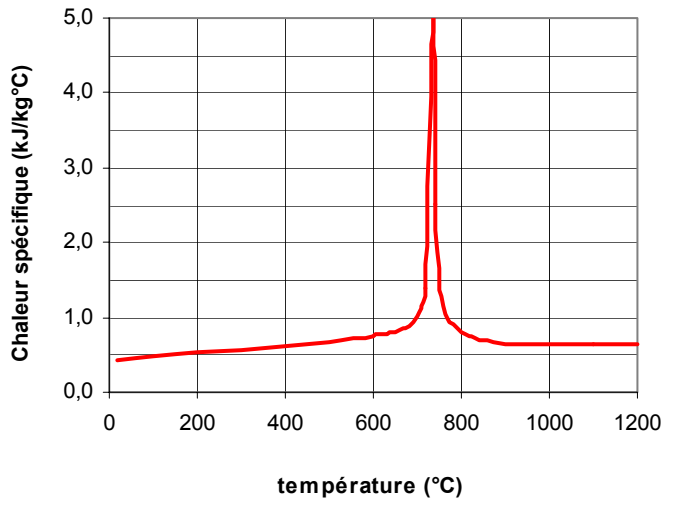


Figure : Chaleur spécifique de l'acier au carbone, en fonction de la température [112]

La conductivité thermique de l'acier

La variation de la conductivité thermique λ_s de l'acier en fonction de la température est illustrée à la figure suivante :

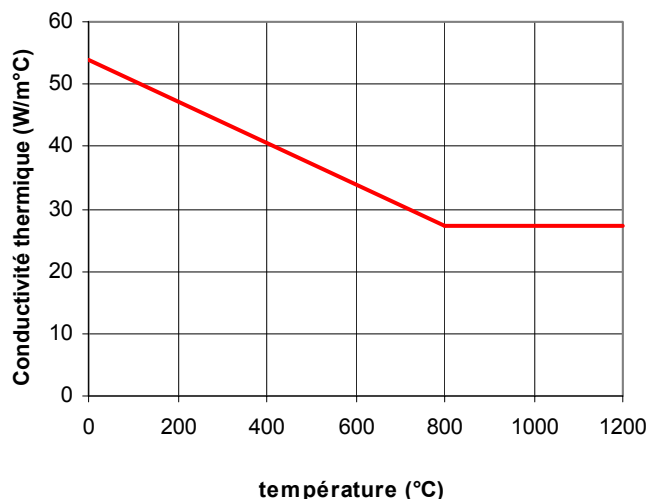
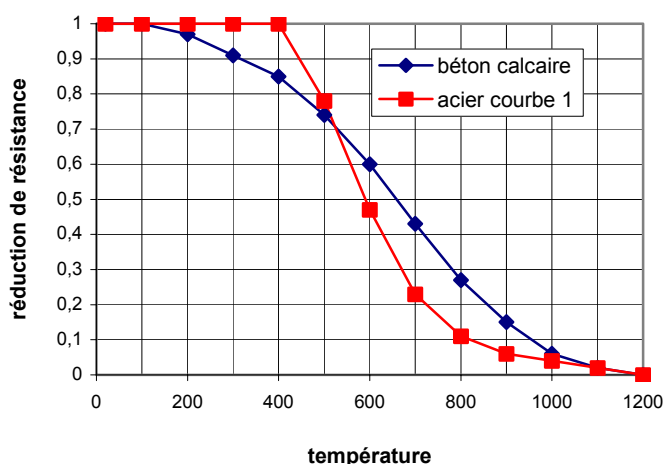


Figure : Conductivité thermique de l'acier au carbone en fonction de la température [112]

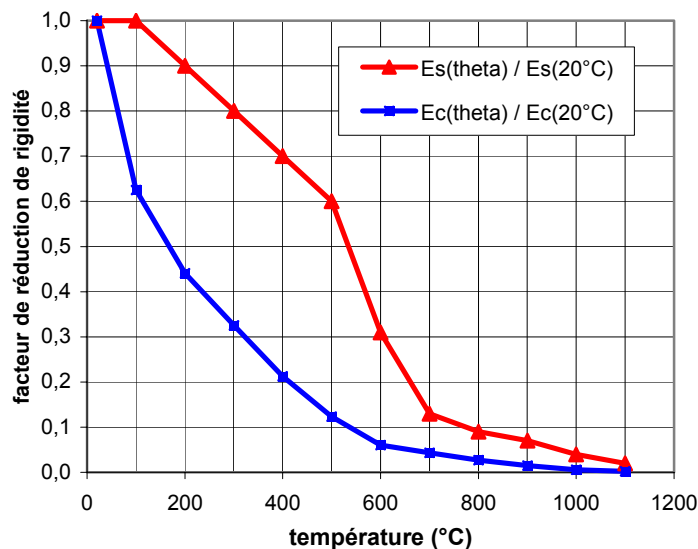
7.2.6. Comparaison des caractéristiques mécaniques des matériaux acier et béton

Les chutes de résistance du béton et de l'acier sont portées ci-dessous sur un même graphique. Pour l'acier, c'est la courbe 1 (relative à une déformation de l'acier supérieure à 2 %) qui est portée sur le graphique.



(source FEBELCEM)

Les chutes de rigidité du béton et de l'acier sont portées ci-après sur un même graphique :



$E_{s,\theta} / E_s(20^\circ\text{C})$ voir §7.2.5

$E_{c,\theta} / E_c(20^\circ\text{C})$ voir §7.2.1

(source FEBELCEM)

Le graphique ci-dessus 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. Le bridage d'un élément de construction est l'action d'entraver, de bloquer les déformations de cet élément.

Cette chute importante de rigidité du béton à température élevée influence relativement peu la rigidité des éléments comprimés en béton de 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 combinée avec une faible massivité des pièces influence gravement le comportement au flambage des pièces en acier.

8. Calcul de la protection et du risque

8.1. La vérification de la résistance au feu : calcul

8.1.1. Trois méthodes, trois niveaux

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 [37] ou directement la NBN EN 1992-1-2 [107]

La partie feu des Eurocodes présente trois types, trois niveaux de modèles pour le calcul de la résistance au feu des structures [37]. Au niveau Fédéral, un texte a déjà été rédigé concernant l'acceptation par les autorités compétentes des notes de calcul selon ces différentes méthodes. Ce texte fera l'objet d'un arrêté royal [52]. 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.

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.

Pour le béton, ce 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.

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. 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 tableau ci-après reprend les coefficients de sécurité sur les matériaux béton et acier :

	A froid	A chaud
Béton	1,76(*)	1
Acier armatures	1,15	1
Structures acier	1,1(**)	1

Coefficients de sécurité sur les matériaux

(*) 1,76 = 1,5 / 0,85

(**) selon l'ENV 1993-1-1 [116]

Un calcul serré des structures métalliques par un recours intensif au FSE conduit à une sécurité limite sans aucune réserve. Au contraire, les structures bétons présentent souvent et sans aucune dépense additionnelle, une large réserve de sécurité qui va au-delà des exigences minimales imposées.

Ce type de calcul demande une bonne connaissance du FSE. Elle est accessible à des bureaux d'études dont les notes de calcul devraient être certifiées.

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.

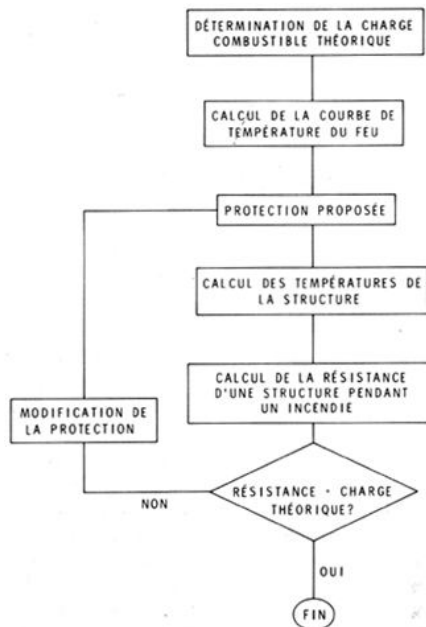


Figure : Méthode de calcul de la résistance théorique au feu [57]

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.

8.1.2. Méthode des valeurs tabulées (niveau 1)

Les valeurs tabulées de l'EC2 feu sont données pour les colonnes, les poutres, les planchers et les murs porteurs ou non porteurs.

Cette méthode est basée sur l'hypothèse de granulats siliceux, l'hypothèse la plus conservatrice.

8.1.2.1. Domaine d'application

- L'EC2 feu est applicable aux bétons de densité normale jusqu'à des C90/105 et aux bétons légers jusqu'à des LC55/60.
- Les tableaux couvrent des durées d'exposition au feu normalisé de la courbe ISO jusqu'à 240 minutes ;
- Les valeurs données dans les tableaux s'appliquent aux bétons avec une masse volumique comprise entre 2000 et 2600 kg/m³ et avec granulats siliceux ;
- 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 §7.2.1). 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.

8.1.2.2. 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.

Plusieurs combinaisons dimension minimale / distance à l'axe sont proposées. A une section de dimension plus grande pourra correspondre une distance à l'axe plus faible et vice-versa. En effet, dans une section plus massive, la chaleur pourra être transférée davantage vers le noyau de la section au lieu de s'accumuler dans la zone périphérique où sont situées les armatures.

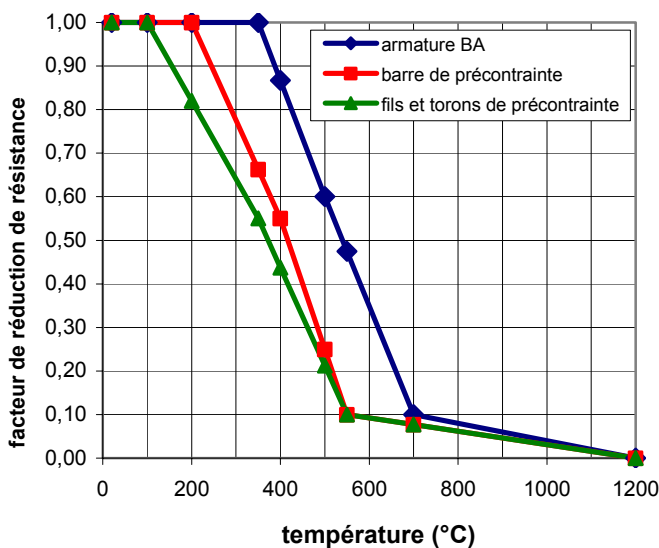
Cette distance « a » est une valeur nominale. L'enrobage nominal associé vaut donc $(a - \Phi/2 - \text{le diamètre de l'étrier éventuel})$. Rappelons que l'enrobage qui est mentionné sur les plans est l'enrobage nominal. Il correspond à la hauteur des écarteurs. Il est fixé égal à l'enrobage minimum + la tolérance de pose. Elle est classiquement de 10 mm pour les bétons coulés en place et 5 mm pour les bétons coulés en usine de préfabrication) desquels il est déduit 5 mm pour les bétons à résistance supérieure et les dalles. (voir NBN EN 1992-1-1 [100]) L'enrobage minimum est lié aux classes d'environnement (voir NBN B 15-001 [117] ou encore le livre de « Technologie du béton » publié par le GBB [70]).

Pour chaque type d'éléments structuraux, la norme détaille les conditions d'application des tableaux.

8.1.2.3. Enrobage à l'axe

- Dans le cas de **plusieurs lits d'aciers** (notamment dans les poutres), « a » désigne ici « am » = la distance entre le centre de gravité des aciers et le parement le plus proche. 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.

Le facteur de réduction de la résistance caractéristique des aciers de béton armé et de précontrainte en fonction de la température critique θ_{cr} à utiliser avec les tableaux est illustré par les courbes de références de la figure ci-après. Elles sont légèrement différentes de celles présentées au §7.2.5 (car elles ont été déduites de tests réalisés selon des procédures différentes).



(source [107])

- Quelle est l'origine de ces valeurs de températures critiques ?

Pour un taux de chargement à chaud de 0,7 (ceci a été développé précédemment dans les actions mécaniques au §6.1) et à toute autre chose égale, les aciers travailleront seulement à 70 % de leur contrainte admissible à froid.

A chaud, les aciers peuvent travailler à une contrainte 1,15 fois plus importante qu'à froid. Ceci résulte de coefficients de sécurité de l'acier : 1,15 à froid et 1,00 à chaud.

Pour que les aciers supportent la charge, la fraction de résistance résiduelle nécessaire à chaud est donnée par le taux de

chargement à chaud divisé par le coefficient de sécurité de l'acier à froid, soit :

$$k_{s, \text{nécessaire}} = \eta_i / (\gamma_s / \gamma_{s,i}) = 0,7 / (1,15 / 1,0) = 0,609.$$

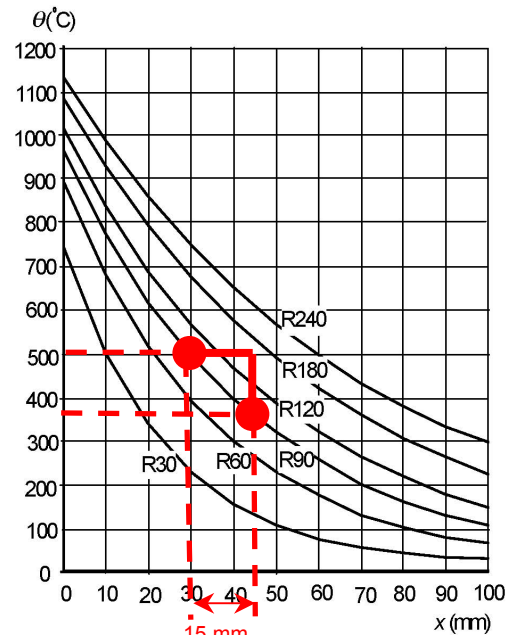
Cette valeur correspond à une température de 500 °C, selon la courbe pour les armatures de BA présentée ci-dessus.

Cette même valeur correspond à une température de 400 °C, selon la courbe "2" pour les barres de précontrainte. Selon la courbe "3" pour les torons et fil de précontrainte, cette même valeur correspond à une température de 350 °C.

- Dans le cas des **aciers de précontrainte**, les mêmes tableaux peuvent être utilisés en majorant la distance « a » de
 - 10 mm pour les barres de précontrainte et
 - 15 mm pour les torons et fil de précontrainte.

Comment expliquer ces deux majorations de distance ?

Le graphique ci-dessous, 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.



Légende : x est la distance à partir de la surface exposée

Figure : Distribution des températures dans les dalles (hauteur $h = 200$ mm) pour R 60 à R 240 (source [107])

La température d'un point situé à 30 mm de la surface après 90 minutes d'exposition de l'élément est de 500 °C. A ce même moment, la température d'un point situé 15 mm plus profond, soit à 45 mm, est de 350 °C.

Ainsi, pour obtenir les distances nominales à l'axe « a » pour les torons de précontrainte, il suffit bien de majorer de 15 mm les distances données pour des armatures de BA.

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_i , l'EC prévoit une procédure simple, sur la base de températures critiques. Pour les éléments tendus et les éléments fléchis sur appuis simples, elle permet de réduire l'enrobage donné dans les tableaux. En développant les équations proposées dans l'EC, la distance « a » de l'armature au parement du béton obtenue par les tableaux peut être diminuée par soustraction de la valeur Δa définie comme suit :

1. Pour le béton armé :

$$\Delta a = 24 \cdot (1 - \zeta) \text{ (mm)} \leq 20 \text{ mm}$$

2. Pour le béton précontraint avec des :

- barres

$$\Delta a = 18 \cdot (1 - \zeta) \text{ (mm)} \leq 15 \text{ mm},$$

- fils et torons (adhérents)

$$\Delta a = 24 \cdot (1 - \zeta) \text{ (mm)} \leq 20 \text{ mm}$$

- où

$$\zeta = (A_{s,req} / A_{s,prov}) \cdot (\eta_i / 0,7), \text{ avec}$$

$A_{s,req}$ = la section d'acier nécessaire pour l'état limite ultime selon la NBN EN 1991-1-1, et

$A_{s,prov}$ = la section d'acier réellement mise en place.

Les limites de 15 et 20 mm correspondent au cas où k_s et $k_p = 0,1$ et $\zeta = 1/6$.

Exemple d'application :

1^{ère} partie

Soit un plancher en béton armé (C25/30) d'une épaisseur de 20 cm sur appuis simples destiné à un immeuble bureau situé en Belgique. Quelle est la hauteur pratique des écarteurs pour les armatures pour obtenir une résistance au feu de 2 heures ? L'armature principale inférieure est composée de barres d'acier de 12 mm de diamètre :

La hauteur des écarteurs est l'enrobage nominal des armatures. Il n'est autre que celui qui doit être indiqué sur les plans.

L'enrobage nominal des armatures est déduit immédiatement de la figure précédente : à l'ordonnée de 500 °C correspond sur la courbe R 120 l'abscisse $x = a = 35$ mm. L'enrobage nominal est vaut $c_{nom} = a - \text{diam}/2 = 35 - 12/2 = 29 \text{ mm}$.

Vérifions la compatibilité avec les exigences de durabilité. L'enrobage minimum est celui qui est imposé pour la classe d'environnement intérieur EI.

L'enrobage nominal des armatures est obtenu en ajoutant une tolérance d'exécution de 10 mm et vaut dès lors :

$$c_{nom} = 15 + 10 = 25 \text{ mm}$$

La NBN B 15-002:1999 [115] et la NBN EN 1992-1-1:2005 [100] autorisent à déduire 5 mm dans le cas de dalle :

$$c = 29 \text{ mm} > c_{nom} = 25 - 5 = 20 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK pour } 29 \text{ mm}$$

2^{ème} partie

Sachant que la section d'acier prévue dépasse, pour des raisons de standardisation, de 18 % la section d'acier strictement nécessaire, quel est l'enrobage nominal minimum acceptable ?

Calculons la valeur de ζ .

La norme NBN EN 1991-1-1-ANB:2005 [114] précise les charges d'exploitation applicables en Belgique pour les bureaux au tableau 6.2 ANB soit :

$$Q = 3,0 \text{ KN/m}^2.$$

La charge permanente est de :

$$G = 24 \cdot 0,2 = 4,8 \text{ KN/m}^2$$

La norme NBN EN 1990-ANB:2005 [110] précise le coefficient ψ_2 applicable en Belgique pour la catégorie B des bureaux au tableau A1.1 ANB : soit 0,3

Le taux de chargement vaut donc :

$$\eta_i = (G + \psi_2 Q) / (1,35G + 1,5Q)$$

$$\eta_i = (4,8 + 0,3 \cdot 3,0) / (1,35 \cdot 4,8 + 1,5 \cdot 3,0) = 0,52$$

Dès lors :

$$\zeta = (A_{s,req} / A_{s,prov}) \cdot (\eta_i / 0,7) =$$

$$\zeta = (1 / 1,18) \cdot (0,52 / 0,7) = 0,63$$

Ainsi :

$$\text{La diminution } \Delta a = 24 \cdot (1 - 0,63) = 9 \text{ mm} \leq 20 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow c_{nom} \text{ acceptable} = 29 - 9 = 20 \text{ mm} \geq 20 \text{ mm} \Rightarrow \text{OK}$$

8.1.2.4. Les poutres isostatiques

Le tableau ci-après de l'EC2 feu fournit les dimensions et distances de l'axe des armatures au parement minimales pour les poutres en béton armé et précontraint sur appuis simples sans moment sur appuis.

Spécifiquement pour les poutres en I, lorsque la largeur "b" de leur talon est supérieure à 1,4 fois l'épaisseur réelle de l'âme et que ce talon n'est pas suffisamment massif, il convient de majorer les distances à l'axe « a » données dans le tableau ci-après selon la formule donnée dans l'EC2 feu [107].

Résistance au feu normalisée	Dimensions minimales (mm)						
	Combinaisons possibles de a et de b_{min} , a étant la distance moyenne des axes des armatures au parement et b_{min} étant la largeur de la poutre				Epaisseur d'âme 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

$a_{sd} = a + 10\text{mm}$ (voir note ci-dessous)

Il convient de prendre en compte, pour les poutres précontraintes, l'augmentation de la distance d'axe des aciers au parement conformément au §8.1.2.3.

a_{sd} est la distance de l'axe des aciers à la paroi latérale de la poutre dans le cas des armatures d'angle (ou 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.

* L'enrobage exigé par la NBN EN 1992-1-1 est normalement déterminant.

Tableau : Dimensions et distances de l'axe des armatures au parement minimales pour les poutres en béton armé et précontraint sur appuis simples sans moment sur appuis [107])

8.1.2.5. Poutres continues

L'EC2 feu 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. Ces derniers apparaissent en travée, suite aux gradients thermiques dans les sections :

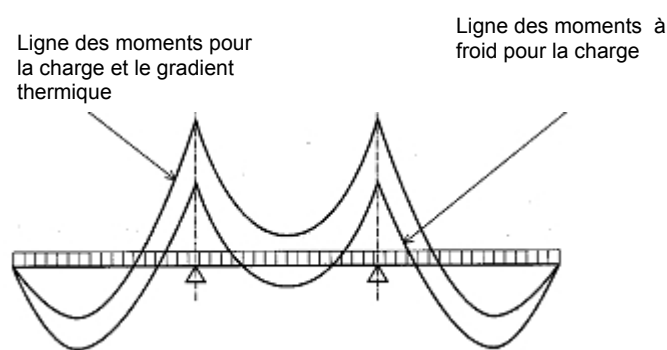


Figure : Relèvement du diagramme des moments pour les structures continues [68]

8.1.2.6. Dalles

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 (voir diagramme §8.1.2.3);
- 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.

8.1.2.7. 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 ;
- la distance de l'axe des barres au parement et enfin,
- le nombre de barres longitudinales (4 ou 8).

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. Une note relative aux structures non contreventées figurera dans l'annexe nationale belge.

La méthode A

La méthode A a été mise au point par l'Université de Liège et existait précédemment dans le DAN de la prénorme. A présent, elle a été introduite dans la norme européenne. Un ensemble de tests sur 80 colonnes, effectué par 4 laboratoires différents de par le monde, a permis le calibrage d'une formule prédisant la durée de résistance au feu en fonction des différents paramètres mentionnés ci-dessus.

Le champ d'application de la méthode A limite notamment son usage

- à des colonnes de maximum 450 mm de côté (=b) ou de diamètre (dans le cas de colonne carrée ou circulaire)
- à une excentricité e/b du premier ordre de 0,4 et
- à une longueur de flambage de 6 m en situation d'incendie.

Dans la norme européenne, cette formule a ensuite été traduite sous forme d'un tableau où la longueur d'élancement de la colonne a été fixée à 3 mètres.

Pour obtenir d'autres couples de valeur b_{min}/a , on peut recourir à une interpolation ou, avec plus de précision, en utilisant directement la formule.

L'annexe nationale belge fournit des tableaux étendus qui permettent à l'utilisateur une lecture directe des solutions sans recourir à une interpolation.

Les valeurs des tableaux de la norme européenne et de notre ANB ne coïncident pas car elles ont été calculées avec des valeurs différentes du paramètre α_{cc} (respectivement = 1,00 et 0,85)

La méthode B

Elle repose sur les résultats d'une modélisation mathématique. Les deux méthodes A et B ont été comparées intensivement et présentent une bonne corrélation avec les tests effectués sur les 80 colonnes.

Cette méthode dispose d'un champ d'application moins limité, surtout s'il est fait usage de l'annexe informative C de l'EC2 feu.

- élancement des colonnes jusqu'à 80 et
- excentricité " e/b " du premier ordre jusque 0,5.

La difficulté d'interpolation dans les tables peut être contournée par un simple programme.

8.1.2.8. 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).

8.2. Le Fire Safety Engineering

Il n'existe aucune définition absolue, mais néanmoins la définition suivante semble acceptable (Purkiss, 1996) :

Le " Fire Safety Engineering " peut être défini comme l'application de principes scientifiques et d'ingénierie aux effets du feu : on quantifie les risques et les dangers encourus, tant en vue de réduire les pertes en vies humaines et les dommages aux biens, qu'en vue de fournir une solution optimale à l'application de mesures de prévention et de protection.

La démarche du « Fire Safety Engineering » peut conduire à utiliser " les feux naturels " pour décrire l'évolution des températures dans les compartiments et vérifier la tenue au feu de la structure. Les feux naturels englobent les courbes paramétriques et les modèles de zone développés plus haut.

Cette démarche est introduite dans les annexes informatives de la norme Eurocode 1 partie 1-2 [106]. Actuellement, elle n'est pas utilisable en Belgique sans dérogation à la réglementation. Le document d'application nationale (ANB) comprendra une note très importante à ce sujet :

« La courbe de température à appliquer doit être autorisée par les autorités publiques compétentes soit d'office dans la

réglementation, soit, pour chaque cas d'application, sur base d'une étude justificative. "

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.

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 lorsque le taux de chargement est de 0,7. La température critique est atteinte dans les profilés courants dans les 10 à 15 minutes ou plus selon la massivité des éléments et leur taux de chargement. 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 l'annexe nationale belge, une ouverture vers des courbes différentes est donnée pour le cas des grands compartiments comprenant des charges combustibles réduites où manifestement l'embrasement généralisé ne peut se produire. Dans ce cas précis et uniquement si les autorités compétentes l'autorisent, la courbe ISO est délaissée au profit des feux localisés détaillés dans l'annexe C .

L'ANB rend les annexes C et D et G normatives (voir §3.1.2 p 23). Les annexes A, B E et F restent informatives. Ces annexes sont neuves par rapport à la prénorme NBN ENV 1991-2-2 [118] et sont le résultat des derniers développements du FSE.

L'annexe A développe les courbes paramétriques.

L'annexe D développe les modèles de feu avancés (une et deux zones).

L'annexe E, la plus soumise à critiques, traite des densités de charge calorifique, des vitesses de propagation du feu à introduire dans les modèles définis dans les autres annexes. Elle comprend, au niveau de l'ANB, un certain nombre d'amendements qui sont le résultat d'un dialogue constructif au sein du groupe ad-hoc chargé de sa rédaction.

L'annexe F développe la méthode du temps équivalent d'exposition au feu. Elle ne permet pas de tenir compte du débit calorifique maximal.

Dans les annexes, la densité de charge calorifique considérée dans le calcul n'est pas la valeur moyenne européenne rencontrée dans le type de bâtiment étudié. Elle ne correspond pas non plus au fractile de 80 %, c'est-à-dire une valeur pour laquelle 80 % des bâtiments contiennent une charge de combustible plus faible. Cette valeur sert néanmoins de valeur de référence conventionnelle.

Le FSE donne des probabilités d'effondrement en situation d'incendie, mais il n'existe aucun critère clair d'acceptabilité.

Des consultants en FSE ont utilisé l'interprétation suivante :

$$p_{f,fi} \cdot p_{fi} < p_t$$

avec,

$p_{f,fi}$ = probabilité d'effondrement en cas d'un feu sévère ;

p_{fi} = probabilité de développement d'un feu sévère ;

p_t = probabilité cible pour la rupture d'un élément structural lors du calcul aux états limites ultime comme explicité dans la NBN EN 1990 'Bases de calcul' [109].

La charge de calcul est évaluée ainsi de façon à ce que le risque d'incendie sévère multiplié par la probabilité d'effondrement en cas de feu sévère soit égal au risque qui est communément accepté lors d'un calcul pour une structure à température normale, soit une probabilité de ruine de la structure de 1/1 000 000 par an soit 5.10^{-5} pour une durée de vie de 50 ans d'un bâtiment.

Il s'agit d'une interprétation « personnelle » (au sens « private ») : ceci apparaît d'une façon tout à fait implicite dans l'annexe informative E de la NBN EN 1991-1-2 . La détermination du niveau de sécurité relève de la responsabilité du législateur 'feu', du SPF Intérieur en l'occurrence en Belgique.

L'inconvénient de l'interprétation reprise ci dessus réside dans le fait que la probabilité d'effondrement en cas d'incendie dépend de la probabilité de développement d'un feu sévère qui dépend elle-même de l'usage du bâtiment.

Ceci amène, pour une durée de vie de 50 ans, à une occurrence d'écroulement de 5 bâtiments sur 100 000. Pour donner une idée, en prenant une probabilité :

- d'occurrence d'un feu de $1/100\,000 = 10^{-5}$ par an et par m^2 ;
- d'extinction du feu par les occupants de 6/10 ;
- du contrôle du feu par les services incendie de 9/10 ;

la probabilité d'occurrence d'un feu sévère est de

$$p_1 = 10^{-5} \cdot (1-0,6) \cdot (1-0,9) = 4.10^{-7} \text{ par an et par } m^2$$

(voir Figure : exemple d'arbre événementiel §8.3.2.3 p64)

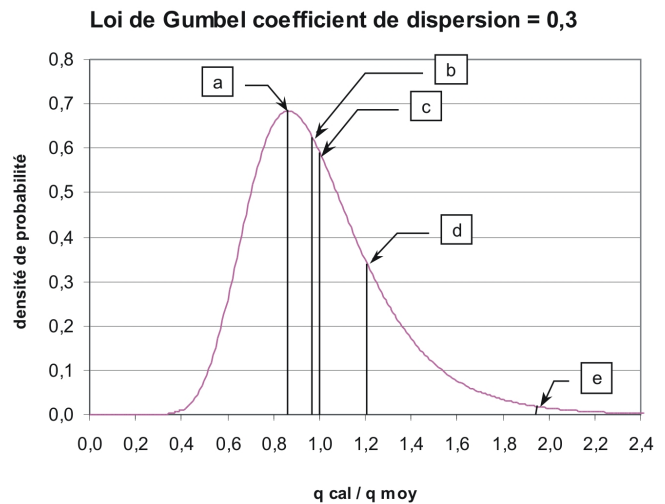
Ceci signifie que si un feu se déclare dans un compartiment de 200 m^2 , la densité de charge calorifique considérée sera

déterminée de façon à ce que la probabilité de ruine sur 50 ans soit de

$$5.10^{-5} / (4.10^{-7} \cdot 200.50) = 1,25 \text{ \%.}$$

Ceci revient à accepter la ruine d'1,25 bâtiment sur 100 en cas d'incendie sévère (=non contrôlé, avec flashover par exemple).

Il a été montré que les densités de charges d'incendie suivent une loi de Gumbel type I. Cette loi est utilisée dans quelques domaines (en particulier la finance et le crédit) car elle permet de représenter des statistiques asymétriques, ce qui semble être le cas des densités de charges incendie : il y a nécessairement un minimum de combustible mobile dans un logement mais par contre, il n'y a pas de maximum. En conséquence, la moyenne (c) est décalée par rapport à la médiane (b = fractile à 50 %) et par rapport à la densité de charge la plus probable (a) (voir figure ci-après) :



Loi de densité de probabilité en fonction de la densité de charge calorifique du compartiment considéré, rapportée à la densité de charge calorifique moyenne pour les bâtiments de ce type.

a = valeur ayant la plus forte chance d'être réalisée (0,87. q_{moy});

b = médiane fractile à 50 % (0,95. q_{moy});

c = moyenne (q_{moy});

d = fractile à 80 % (1,22. q_{moy});

e = fractile à 99 % (1,93. q_{moy}).

La surface comprise sous la courbe et à gauche des lignes verticales représente la probabilité que la densité de charge calorifique soit inférieure à un fractile donné.

Le coefficient de dispersion représente le rapport de l'écart type sur la moyenne.

La densité de charge calorifique de calcul qui conduit, sous feu sévère, à une probabilité de ruine d'1 bâtiment sur 100 est celle qui est dépassée dans 1 % du temps de vie du bâtiment.

Dans notre cas, la charge de combustible résultant de cette démarche correspondrait, sur base d'une distribution statistique de Gumbel, au fractile cible

$$(100 \% - 1 \%) = 99 \% = 1,58 \text{ . fractile } 80 \%$$

ou encore :

$$1,93 \cdot \text{moyenne},$$

soit, dans une habitation, un équivalent de
$$1,93 \cdot 45 = 87 \text{ kg de bois/m}^2.$$

En prenant un coefficient de combustion $m=0,8$, la densité de charge calorifique de calcul s'élève alors dans notre exemple à

$$0,8 \cdot 87 \cdot 17,5 = 1218 \text{ MJ/m}^2.$$

In fine, le calcul de la charge au feu $q_{f,d}$ peut-être réalisé selon deux niveaux de complexité :

- la méthode générale : comme dans l'exemple ci-dessus, en raisonnant en termes de probabilité, pour déduire un coefficient global qui affecte le fractile à 80 %
- La méthode simplifiée : pour chaque paramètre (surface du compartiment, type d'occupation, effet des sprinklers,...), utiliser un coefficient partiel. Leur produit donne alors, de façon conservative, un coefficient global qui affecte le fractile à 80 %.

En développant la méthode simplifiée, on peut démontrer que pour obtenir le fractile cible, il faut multiplier la charge correspondant au fractile à 80 % par un coefficient dépendant de la surface de plancher du compartiment (δ_{q1}) et du type d'occupation du bâtiment (δ_{q2}). Ces coefficients sont repris dans le tableau ci-après :

Surface de plancher du compartiment	Coef. δ_{q1}	Exemples de types d'occupation	Coef. δ_{q2}
25	1,10	Galerie d'art, musée, piscine	0,78
250	1,50	Bureaux, résidence, hôtel, papetière	1,00
2 500	1,90	Usine de machines et de moteurs	1,22
5 000	2,00	Laboratoire de chimie	1,44
10 000	2,13	Fabrique d'artifices ou de peintures	1,66

Coefficients δ_{q1} et δ_{q2} (tableau E.1 extrait de la NBN EN 1991-1-2)

Le rapport de la recherche NFSC [42] précise que, pour chaque type de bâtiment ou d'activité, une étude particulière devrait être réalisée pour connaître la probabilité p_1 de développement d'un feu sévère. Par exemple, en termes de probabilité dans le cas de bâtiments destinés aux activités de l'industrie des feux d'artifice, le risque est multiplié par un facteur 1000. En terme de coefficients agissant sur les charges calorifiques, ce facteur 1000 est traduit par un facteur d'activation de 1,66. L'évaluation grossière de ce facteur d'activation, lié au manque de données statistiques suffisantes, doit inciter à la plus grande prudence.

Dans le cadre de protection du patrimoine, la valeur inestimable de certaines pièces ou collections abritées dans certaines galeries d'art et musées peut conduire à considérer une classe de conséquences plus élevée. Un passage d'une classe CC2 à une classe de conséquence CC3 divise par 10 le pourcentage

acceptable de ruine. Un coefficient complémentaire de 1,22 est alors applicable sur la densité de charge calorifique.

Dans l'ANB, un amendement semble pertinent pour une meilleure appréhension du risque lié à l'usage d'un bâtiment : c'est la prise en compte du bâtiment entier dans le cas de plusieurs compartiments superposés et non pas d'un seul de ses compartiments. Si la ruine du compartiment considéré peut entraîner la ruine d'autres compartiments, une approche sécuritaire de l'évaluation δ_{q1} peut être basée sur l'addition des surfaces de ces compartiments. Il faut noter que cet amendement, en dépit de son apparence, ne prend pas en compte les conséquences financières de l'effondrement d'un bâtiment plus ou moins important. Il y a moyen d'ajuster le facteur de sécurité incendie pour minimiser le coût total, représenté par le coût de la sécurité incendie et la valeur pondérée à la fois du bâtiment, de son contenu et des pertes indirectes. Cette lacune dans l'approche Eurocodes est explicitée plus en détail dans le paragraphe consacré aux méthodes quantitatives pour l'évaluation du risque. Une modulation timide et grossière de la probabilité cible de défaillance est possible, par le biais des classes de conséquences présentées dans l'Eurocode " Bases de calcul des structures " [109]

La prise en compte poussée des protections actives

Nous avons montré comment prendre en compte l'intervention des occupants et des pompiers, la surface du compartiment, son type d'occupation et la classe de conséquences. Des concepteurs poussent plus loin la démarche du FSE : pour la prise en compte des mesures actives comme l'usage de détecteurs et transmissions automatiques, de sprinklers, d'approvisionnements indépendants en eau, de délais extrêmement courts d'intervention des services de secours, ils s'autorisent à présent à diminuer les charges calorifiques, toujours dans la même approche semi-probabiliste décrite ci-dessus.

Ces développements du « Fire Safety engineering » sont utilisés pour compenser un manque de résistance inhérent au feu de certaines structures.

Ces outils sont relativement neufs [50] et **seules des personnes très qualifiées et averties doivent les manipuler.**

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

Pour des murs coupe-feu, il est prudent d'exiger la stabilité au feu pour toute la durée de l'incendie sans tenir compte des protections actives et de l'intervention humaine. Cette exigence est satisfaite par des murs coupe-feu REI 120, REI 240 ou REI 360 en fonction des conditions d'incendie.

En juin 2005, le professeur Jose Torero (Université d'Edinbourg), l'un des experts mondiaux leader dans le « Fire Engineering » (FE) répondait ainsi au qualificatif de « black art » qui est parfois collé à l'art du FE [50] :

« L'industrie doit utiliser le FE prudemment. Le FE s'appuie sur une science mais qui n'a pas encore été digérée à un point tel que nous disposions d'outils conviviaux, robustes et fiables qui puissent être utilisés par tous. A ce stade, il reste une affaire de spécialistes. L'industrie devrait chercher des spécialistes avec des références adéquates et une solide formation. De nombreuses personnes sans qualification appropriée exercent le FE ; ce sont celles-là qui introduisent la « sorcellerie » comme substitut d'une connaissance réelle. L'industrie devrait être très prudente et s'entourer des professionnels compétents lorsqu'un projet requiert le recours au FE »

La probabilité [42] d'occurrence d'un feu sévère (par an) susceptible de mettre en danger la stabilité structurelle peut être exprimée comme :

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot A_{fi}$$

avec,

p_1 = probabilité de feu sévère incluant les possibilités d'extinction par les occupants et les services publics de secours (par m² et par an).

p_2 = facteur de réduction supplémentaire selon les types de pompiers et sur le temps entre l'alarme et l'intervention de pompiers.

p_3 = facteur de réduction considérant la détection de feu automatique (par la fumée ou la chaleur) et / ou la transmission automatique de l'annonce.

p_4 = facteur de réduction tenant compte de la présence d'un système d'extinction.

A_{fi} = superficie du compartiment.

Ainsi, l'usage de système de sprinklers à efficacité de 98 % (95 %) permet de multiplier les charges calorifiques par un coefficient partiel δ_{m1} de 0,61 (0,70).

Il faut insister sur le fait que tous ces facteurs sont seulement applicables dans la mesure où une approche semi-probabiliste est acceptée. Ainsi, si la densité de charge calorifique est constante (cas de la partie de charge permanente qui est connue), il y a lieu de prendre cette charge sans l'affecter des facteurs de majoration ou de minoration. Il s'agit pour cette partie de la charge totale d'une approche « déterministe ».

Si le type d'approche semi-probabiliste peut se justifier aux yeux de compagnies d'assurances qui répartissent leurs pertes et bénéfices sur un grand nombre de sinistres pour un parc de bâtiments donné, il est beaucoup plus difficile à faire accepter par un propriétaire ou un exploitant. Par exemple, sur le plan de la différenciation de la fiabilité des mesures actives, un recours plus important à des structures en acier augmenterait vraisemblablement la sinistralité des bâtiments. Ces changements constructifs seraient sans difficulté absorbés par les assureurs, par une hausse de prime, tant que la norme se

contente de moyenniser les statistiques. Une différenciation performancielle devrait être introduite.

Dans cette approche, les succès des mesures actives sont supposés indépendants. C'est ce qui permet d'effectuer le produit des probabilités (voir aussi l'exemple d'arbre événementiel dans le §8.3.2.3 relatif à la description des méthodes quantitatives).

L'hypothèse de l'indépendance du succès d'extinction de l'incendie par les corps de pompiers et du succès d'un système de sprinklers est discutable. Le résultat de l'action des services d'incendie dépend du fonctionnement des sprinklers.

En réalité, l'arbre événementiel présenté au §8.3.2.3 n'est pas tout à fait correct. Ceci est d'ailleurs reconnu explicitement dans la définition des facteurs p_3 et p_4 . Ils ne sont pas des probabilités de défaillance des mesures actives associées mais des facteurs de réduction de défaillance des pompiers dans leur lutte contre l'incendie.

Ceci est tout à fait clair dans le cas des détecteurs qui ne vont jamais éteindre un incendie. Des fiabilités de fonctionnement de 72 % à 84 % (c-à-d des taux de défaillances de 28 % à 16 %) pour les détecteurs de fumées sont rapportées dans l'étude reprise en [53] dans la bibliographie. **Dès lors, il n'apparaît pas possible d'obtenir des facteurs**

$$p_3 = 0,25 \cdot 0,25 \cdot 0,25 = 1,56 \%$$

comme mentionné dans l'EC1 feu : p_3 doit être supérieur au minimum à 16% !

Une des difficultés de l'introduction du FSE provient de la discutabilité des hypothèses adoptées dans une démarche qui ne converge pas vers une unanimité. Les probabilités d'occurrence d'un feu, le comportement des occupants et des visiteurs, le succès des opérations de pompiers (taille des équipes, connaissance des lieux) : autant de paramètres qui sont fonctions du comportement humain, de réglementations propres à chaque pays, tant au niveau de la conception que des contrôles du fonctionnement des installations, des répartitions des charges combustibles.

Il convient de faire remarquer que selon le rapport NFSC [44], un taux moyen de succès des services incendie de 9/10 correspond à l'intervention d'une équipe de secours de professionnels dans un délai compris entre 10 et 20 minutes après transmission de l'annonce. Ce même taux moyen de réussite serait atteint lors de l'intervention dans un délai inférieur à 10 minutes pour une équipe de secours composée de volontaires.

La notion de délai d'intervention effective peut couvrir des réalités très différentes, surtout lors d'un risque élevé : s'agit-il de l'arrivée sur place des services de secours, de la mise en action de la première lance ou de « n » lances lors d'un déploiement progressif ?

L'allongement des délais d'intervention diminuerait bien sûr le taux de réussite.

Le calibrage des paramètres de la loi de distribution statistique de la densité de charge calorifique pose certaines difficultés,

notamment avec des coefficients de dispersion plus élevés que 0,3. C'est pourquoi notre ANB se limite à l'adoption d'une seule dispersion.

Dans le cas d'un incendie résultant d'un court-circuit ou d'un acte de malveillance, le bâtiment particulier fort éloigné d'une caserne de pompiers ou non occupé pendant la nuit (hall industriel, bureau) est calculé, d'après les hypothèses du FSE, avec une intervention des occupants et des pompiers qui n'est pas effective. Bien souvent, l'action de ces derniers devra se limiter à la non-propagation de l'incendie aux bâtiments voisins. Ainsi, implicitement, le niveau de sécurité fixé n'est pas identique, pour les biens et pour les activités, à celui obtenu pour les personnes. En réalité, les actes de malveillance touchent près de 30 % des bâtiments soumis à incendie.

Les charges calorifiques [49], considérées actuellement par le FSE lorsqu'il modélise des feux " naturels ", sont des **charges moyennées sur le compartiment**. Leur répartition uniforme se rencontre rarement dans les bâtiments. Dès lors, une concentration locale de matières combustibles pourra provoquer l'effondrement d'un élément portant, suite à son action thermique localisée. Il entraînera ainsi la ruine du compartiment.

Ainsi les techniques et les hypothèses du FSE, qui prennent en compte les mesures actives, doivent encore faire leurs preuves et répondre encore à un certain nombre d'objections, avant de pouvoir constituer une base suffisamment solide pour être reprises dans la partie normative de l'EC1 feu et, à fortiori, dans une réglementation. De nombreux pays européens, tels la France et l'Allemagne, pour ne citer que de grands pays limitrophes, n'ont pas retenu cette approche dans leur annexe nationale de la norme EC1 feu.

En sus, une vérification de la structure pourrait être réalisée à l'aide de courbes paramétriques ou de modèles de zone :

- jusqu'à la combustion complète du combustible ou
- jusqu'à un temps t correspondant à une durée fixée, par exemple celle fixée dans notre réglementation actuelle faisant référence à un feu ISO. N'est pas examiné le comportement de la structure passé ce délai : peu importe que l'ouvrage s'écroule.

La deuxième solution présente bien sûr une sécurité plus faible que la première solution. Elle constituerait un rabotage de la sécurité incendie dont on se gardera. Le projet d'ANB de la NBN EN 1991-1-2 n'a pas retenu cette solution, fort heureusement, en ne définissant pas de limite de temps. Par ailleurs, il faut noter que, si cette deuxième solution a été ouverte dans l'EC1 feu, dans presque toutes les publications relatives aux feux naturels, les structures sont étudiées pour le cycle complet d'incendie, y compris la phase de refroidissement.

Si l'on considère [49] que, pour un bâtiment industriel, le coût de la structure ne représente que 10 à 30 % du coût total du bâtiment, sans parler de la valeur du contenu, on peut se poser la question de l'utilité de telles méthodes.

La méthode générale (approche probabiliste)

Il faut retenir que la méthode générale qui sous-tend l'annexe E (approche probabiliste) conduit à un résultat beaucoup plus choquant :

Que l'on considère un usage de bureau, de logement ou de lieu de production avec un "risque d'activation" inférieur ou égal à 1,00 (ceci est expliqué plus loin) : si les efficacités avancées dans l'annexe E de l'intervention :

- des pompiers (défaillance = 0,1) ;
- des occupants (défaillance = 0,4) ;
- du système de sprinklers (facteur multiplicatif de défaillance des pompiers et des occupants = 0,02) ;
- des détecteurs de fumée (facteur multiplicatif de défaillance des pompiers et des occupants = 0,0625) et
- de la transmission automatique aux services publics de secours (facteur multiplicatif de défaillance des pompiers et des occupants = 0,25)

sont correctes (**voir le commentaire de la page précédente relatif aux détecteurs**), alors la probabilité de défaillance de l'ensemble de ces mesures est

$$0,1 \cdot 0,4 \cdot 0,02 \cdot 0,0625 \cdot 0,25 = 1,25 \cdot 10^{-5}$$

soit un cas sur 80 000. La probabilité d'accéder à un feu sévère et donc à la ruine d'un bâtiment de 8 000 m² équipé de l'ensemble de ces mesures est de

$$p_{\text{occ.}} p_{\text{défaillance}} = (10^{-5} \cdot 50 \cdot 8\,000) \cdot 1,25 \cdot 10^{-5} = 5 \cdot 10^{-5} \leq 5 \cdot 10^{-5}.$$

Cette probabilité de ruine étant strictement inférieure à la probabilité cible, la structure ne devrait alors présenter aucune résistance intrinsèque au feu pour toute superficie inférieure à 8 000 m², si les autorités compétentes acceptent une démarche autre que la démarche ISO.

Si la transmission automatique n'est pas incluse, alors le taux de défaillance tombe à 1 cas sur 20 000, et la structure ne doit présenter aucune résistance intrinsèque au feu pour toute superficie inférieure à 2 000 m².

C'est seulement si la probabilité de ruine du bâtiment est supérieure à la probabilité cible qu'une vérification de structure avec une densité de charge calorifique réduite devrait être effectuée.

Pour un bâtiment de 2 000 m², l'application de la méthode générale conduit à ne demander, en cas d'incendie sévère, aucune résistance au feu à la structure.

Par contre, l'application de la méthode des coefficients partiels conduit à demander une survie de la structure en cas d'incendie sévère dans 61 % des cas. Ce sont les cas où la densité de charge calorifique est inférieure à $q(61\%)$. En effet,

$$1,90 \cdot 0,61 \cdot 0,73 \cdot q(80\%) = 0,74 \cdot q(80\%) = 1,03 \cdot q_{\text{moy}} = q(61\%)$$

Ainsi, autant la méthode conservative des coefficients partiels de l'annexe E de l'Eurocode peut donner dans notre exemple des résultats qui semblent raisonnables (résistance minimale

correspondant au fractile à 61 %), autant l'application de la méthode générale donne lieu à une perception opposée (pas d'exigence minimale).

La méthode générale n'a pas été présentée dans l'Eurocode car elle fait appel à des notions de probabilité et de fiabilité que les rédacteurs ont jugées trop complexes pour les utilisateurs "basiques". Les résultats "rassurants" obtenus par l'application de la méthode des coefficients de l'annexe E occultent les résultats "moins rassurants" qui pourraient être obtenus par des experts du FSE.

Il est évident qu'en cas d'incendie nocturne (70 % en dehors des heures ouvrables pour les entrepôts : courts-circuits, actions criminelles, vandalisme), l'efficacité des détecteurs de fumées va chuter drastiquement ; l'efficacité des pompiers se verra également réduite et la probabilité de survenance d'un feu généralisé dépassera les 1/20 000. La méthode est clairement insécuritaire. Elle doit encore convaincre. C'est ainsi que le rapport de l'US National Institute for Standards & Technology (NIST) - juin 2005 - met le bémol pour ce type d'approche.

Le rapport du NIST (11 septembre : death of fire engineering ?) [54]

Ce rapport final officiel et colossal sur les effondrements du World Trade Center est composé de 43 sections (10 000 pages). C'est le résultat d'une investigation du NIST. Elle aura duré 3 ans et coûté près de 15 millions d'Euros.



World Trade Center (source www.nceplus.co.uk)

Le groupe des experts chargés de cette investigation a produit 30 recommandations pour améliorer la sécurité des bâtiments élevés. Les 5 recommandations les plus pertinentes dans le cadre de notre publication concernent :

- la conception pour éviter l'effondrement progressif ;
- **la vérification pour qu'un feu non contrôlé puisse se dérouler sans causer l'effondrement structural local ou global ;**
- l'amélioration des performances et de la redondance des systèmes de protection active contre l'incendie ;

- le renforcement de la réglementation relative aux sprinklers et aux voies d'évacuation dans les bâtiments existants ;
- l'éloignement maximum des escaliers de secours ; le renforcement des cages d'escalier et l'adoption d'une signalisation cohérente.

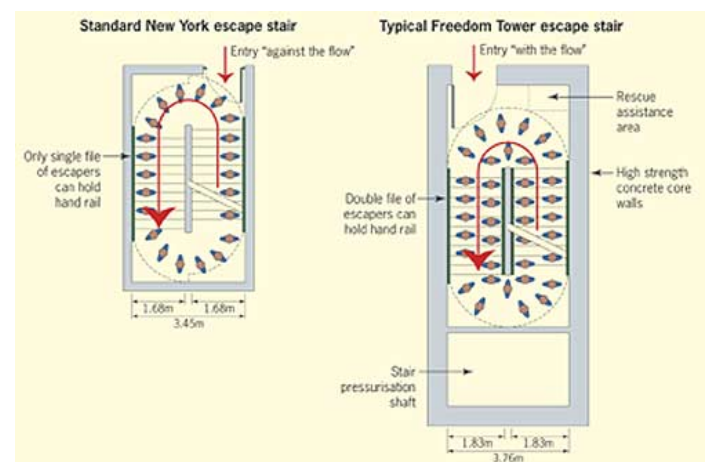
Les autres recommandations peuvent être lues sur le site <http://www.nceplus.co.uk/> et vont notamment, **tant que la recherche n'est pas terminée, vers une non-utilisation de conceptions de sécurité incendie basées sur une approche performancielle.**

Il nous semble important de rappeler que les normes sont la base des aspects techniques d'une réglementation [3]. C'est seulement lorsque les normes, après avoir fait leurs preuves, ont acquis un certain degré de maturité qu'elles peuvent être intégrées dans des réglementations. Il serait inopportun de "brûler" les étapes. Ce parcours peut représenter une vingtaine d'années.

Les mots clés de ces recommandations sont : développement, analyse de la réglementation, méthodes, tests, recherche, conditions en service, outils de conception, système de communication, entraînement, inspection, certification, enregistrement, collaboration entre architectes et experts feu.

La nouvelle " Freedom Tower " disposera d'un noyau central en béton haute résistance C80/95 avec des murs d'une épaisseur de 900 mm et se targuera d'être le gratte-ciel à vocation de bureaux le plus sûr au monde avec :

- ses deux colonnes d'eau montant dans le noyau et reliées au sommet pour permettre le maintien de l'alimentation en cas de rupture d'une des colonnes ;
- une densité plus importante des sprinklers : 1/15m²(OH) au lieu de 1/22m² (LH) (voir §4.2.2), avec maintien du débit pendant 60 min au lieu de 30 min, et



des cages d'escaliers nettement plus spacieuses et plus robustes (source : www.nceplus.co.uk).

Pour améliorer sa compétitivité [13], la filière acier a cherché à affiner le dimensionnement, presque toujours dans le sens d'une diminution de la charge au feu (fonction de la quantité de matière inflammable contenue dans l'immeuble). Ceci conduit à limiter la sécurité au strict nécessaire, compte tenu d'une série d'hypothèses. Pour prendre en compte une charge au feu adaptée à chaque configuration particulière de bâtiments, d'autres courbes de température ont été développées : elles prennent principalement en compte la charge au feu et les ouvertures, par exemple les fenêtres. Ces feux sont le plus souvent moins sévères que le feu de la courbe ISO. L'application de ces courbes nécessite une grande vigilance. En effet, la charge au feu varie fortement d'un bâtiment et d'un pays à l'autre. De plus, dans le cas d'un changement d'affectation durant la vie d'un bâtiment, les charges au feu ou les ouvertures peuvent varier par rapport à la conception initiale. Dans ce cas, le choix d'autres courbes que la courbe ISO pourra imposer une révision majeure de la structure.

8.3. Le risque incendie

8.3.1. Réglementations prescriptive et performancielle

Traditionnellement dans les réglementations [36], l'élaboration de la sécurité incendie a largement reposé sur des règles prescriptives. Ceci est particulièrement vrai pour la sécurité des personnes dans le cas d'incendie.

La meilleure compréhension du phénomène de l'incendie, des demandes de flexibilité accrue dans la conception des bâtiments, des recherches coût/efficacité et l'implémentation de nouvelles technologies a mené à produire des réglementations de type performanciel plutôt que prescriptif. Cela dans plusieurs pays au cours des 20 dernières années, comme par exemple en 1994 la Suède. Une réglementation performancielle définit les objectifs de conception mais sans détailler la manière d'atteindre ces objectifs.

Pour les bâtiments classiques, les méthodes tabulées ou simplifiées sont les plus efficaces. Pour les bâtiments plus exceptionnels, des incompatibilités apparaissent régulièrement entre la protection incendie et d'autres aspects architecturaux, constructifs ou relatifs aux activités commerciales du bâtiment. Dans ces situations, le recours à des méthodes basées sur des méthodes d'analyse de risques constitue une solution.

8.3.2. Méthodes d'évaluation du risque incendie

Les risques en « Fire Safety Engineering » (FSE) [36] peuvent être définis comme une combinaison de fréquence ou de probabilité d'occurrence en regard des conséquences d'un événement spécifié. Il est donc important [8], [15], [16], [17] de pouvoir évaluer les probabilités et les conséquences.

Autant la description du détail des différentes méthodes sort du cadre de ce document, autant il nous a semblé important de donner une vue d'ensemble des méthodes utilisées dans le FSE.

L'acceptabilité [35] du risque peut-être évaluée par comparaison avec des limites supérieures prédéfinies. On considère le rapport coût/bénéfice ou l'efficacité des dépenses. Les méthodes d'évaluation courantes du risque reposent sur le principe dit de ALARP (« As Low As Reasonably Practicable »).

Au niveau du risque pour les personnes lors d'incendies dans les pays industrialisés, les statistiques font apparaître un nombre annuel de décès compris entre 0,4 et 2 par 100 000 habitants. Le public [35] serait plus réticent à accepter un petit nombre de grands accidents qu'un même risque distribué sur un plus grand nombre d'accidents de moindre ampleur. Dans de nombreuses études et méthodes d'appréciation de risques, la perception et donc l'acceptation du risque diminue avec le carré du nombre de victimes potentielles [16] : ainsi, pour 3 victimes, l'acceptabilité est 10 fois inférieure à celle pour 1 victime. De même, pour 10 victimes, l'acceptabilité est 100 fois plus petite que celle pour 1 victime. Ceci peut aider à comprendre une des raisons qui poussent le législateur à imposer des résistances au feu plus importantes pour les bâtiments élevés que pour des bâtiments bas.

Plusieurs méthodes de travail ont été développées, basées sur des calculs. Elles constituent une aide précieuse dans l'appréciation du risque d'incendie en fonction d'un grand nombre de paramètres. Ces méthodes d'analyse de risques peuvent être classées selon trois types : les méthodes qualitatives, semi quantitatives et quantitatives. Elles n'ont cependant pas la prétention de pouvoir remplacer le raisonnement et le jugement des personnes habilitées à définir les mesures de protection.

8.3.2.1. Les méthodes qualitatives

Les **méthodes qualitatives** sont souvent utilisées de manière informelle, quand un compromis est envisagé et que les effets sur la stratégie de sécurité incendie sont limités. L'expérience et le feeling du concepteur sont souvent suffisants pour effectuer de légères adaptations des solutions existantes reconnues ou pour classer quantitativement les performances des différentes mesures de sécurité. Le critère de performance utilisé dans la vérification est relatif et s'exprime en termes de " aussi sûr que " ou " pas pire que ".

8.3.2.2. Les méthodes semi-quantitatives

Les **méthodes semi-quantitatives** constituent un outil simple dans beaucoup de situations où la sécurité incendie doit être évaluée et que le temps ou l'argent font défaut pour réaliser une analyse quantitative détaillée des risques. Dans la gestion des risques industriels, des **listes à points avec pondération** [20] ainsi que des **méthodes à indices** ont été largement utilisées pour classer et donner des priorités aux différentes mesures préventives de sécurité.

Méthodes de listes à points

En Suède par exemple, des méthodes basées sur des listes à points ont été développées pour les hôpitaux. Elles servent d'outil pour les services d'inspection incendie. Néanmoins, ce type de méthode n'a pas encore été utilisé dans la phase de conception de la sécurité incendie car à ce jour est seulement admise implicitement la recherche d'un compromis entre les différents objectifs de sécurité de la réglementation. Par ailleurs n'apparaît pas clairement la manière de traiter les aspects non couverts par la réglementation, par exemple les aspects organisationnels et de formation. Ils affectent néanmoins la sécurité incendie dans un bâtiment.

Méthodes à indices

Durant des années, différentes approches ont été utilisées pour développer des classements : ainsi le système GRETENER et les méthodes NFPA.

Les procédures NFPA sont applicables pour différents types de bâtiments construits dans la tradition des bâtiments aux Etats-Unis.

En Suède, une procédure de classement a été développée pour des hôpitaux. Elle suit des méthodes utilisées en Grande-Bretagne. Elle attribue une pondération selon les préférences des décideurs, combinées avec des catégories de paramètres qui permettent l'évaluation du risque. La méthode SAW (" Simple Additive Weighting ") est la méthode la plus utilisée.

Le système GRETENER est basé sur les statistiques de compagnies d'assurance suisses. Initialement, il était utilisé pour des applications industrielles.

- 1970 : méthode de M. GRETENER (ANPI suisse) : elle permet seulement une évaluation du risque pour les biens. Elle est fort répandue en Suisse et en Autriche.
- 1978 : méthode ERIC (Evaluation du Risque d'Incendie par le Calcul) en France : cette méthode ne vise plus seulement la protection des biens, mais également celle des personnes.
- 1981 : E. DE SMET (ANPI belge) présente une version élaborée de la méthode GRETENER, avec le nom de méthode FREME : Fire Risk Evaluation Method for Engineering.
- 10 ans plus tard E. DE SMET met au point une nouvelle version de la méthode FREME, sous le nom de FRAME (Fire Risk Assessment Method for Engineering), faisant apparaître un troisième aspect du risque incendie : la perte d'exploitation, autrement dit le risque pour les activités se déroulant dans le bâtiment concerné. Son enseignement est prodigué en Belgique dans le cours supérieur de l'ANPI ainsi qu'aux ingénieurs architectes de l'Université de Gand. La méthode a déjà été acceptée par des autorités belges (services d'incendie, inspection technique) pour des applications où les prescriptions légales ne pouvaient s'appliquer comme telles. Une demande officielle de reconnaissance de la méthode a été introduite au Ministère de l'Intérieur en 2001. Pour un

même projet et selon l'expert qui introduit les données, les résultats peuvent varier considérablement.

La méthode FRAME repose sur trois concepts principaux :

1. Dans un bâtiment bien protégé, il existe un équilibre entre danger et protection. Le risque se définit donc par l'indice égal au quotient Danger / Protection. Une valeur inférieure à 1 reflète une bonne protection du bâtiment ; une valeur supérieure à 1 indique une mauvaise protection ;
2. Le danger se définit par l'indice égal au quotient de deux valeurs : " le risque potentiel P " et " le risque acceptable A " ;
3. La protection est calculable en partant de valeurs spécifiques pour les techniques de protection : l'extinction par l'eau, l'évacuation, la résistance au feu, les moyens manuels et automatiques d'intervention.

Trois calculs peuvent être développés : un premier calcul pour le bâtiment et son contenu, un deuxième pour les personnes qui l'occupent et un troisième pour l'activité économique développée dans le bâtiment. Dans ces trois calculs, les facteurs d'influence n'interviennent pas de la même manière puisque le risque potentiel et le risque acceptable ne sont pas les mêmes s'il s'agit de personnes, de biens ou d'activités économiques.

8.3.2.3. Les méthodes quantitatives

Les calculs de la sécurité incendie sont basés sur des seuils de niveau de risques que la solution ne peut dépasser. Les méthodes véritablement quantitatives d'analyse de risque comprennent explicitement l'effet combiné de la fréquence et des conséquences des accidents possibles. La méthode décrite dans l'annexe E de l'Eurocode 1, prenant en compte les mesures actives de protection incendie, n'associe pas explicitement à leur probabilité les conséquences des accidents.

De même, l'Eurocode " Bases de calcul " [109] ne donne qu'une classification grossière, en termes de classes de conséquences par type de construction : conséquence élevée, moyenne ou faible relativement aux pertes de vies humaines, ou conséquences économiques, sociales ou environnementales en cas de défaillance structurale.

La majorité des ouvrages se calculent en classes CC2 correspondant à une situation où les conséquences d'une défaillance de la structure seraient « moyennes ». Les classes CC1 et CC3 correspondent respectivement à des conséquences faibles et élevées (salles de concert, tribunes).

A chaque classe de conséquences est associé un indice de fiabilité β . Certains pays nordiques affectent un indice de fiabilité minimum différent pour chaque type d'éléments d'une construction. L'indice de fiabilité d'une colonne devra être supérieur à celui d'une poutre secondaire : il y a là un souci plus aigu de prise en compte des conséquences de défaillance structurale.

Les méthodes peuvent varier d'une simple analyse quantitative de la performance d'un élément (la résistance au feu d'un

élément, le temps de réponse d'un type déterminé de détecteur incendie,...) à une analyse quantitative complète du risque, comprenant divers scénarii de chaînes d'événements et prise en compte explicite d'incertitudes.

Des arbres événementiels sont souvent utilisés pour prendre en compte le comportement humain et la fiabilité des systèmes de protection incendie installés. A chaque événement est associée une probabilité. Cette démarche a été utilisée dans la méthode décrite dans l'annexe E de l'Eurocode 1.

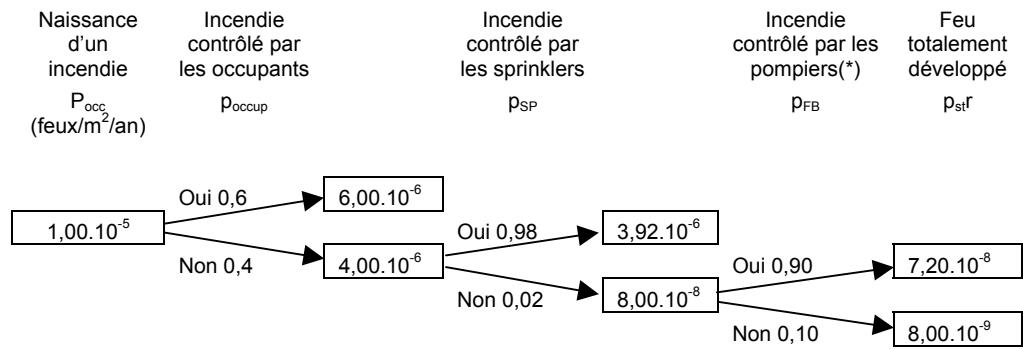


Figure : exemple d'arbre événementiel

Les méthodes quantitatives d'analyse (QRA) standards ne fournissent pas une mesure de l'incertitude du résultat obtenu alors que cette mesure est de première importance pour permettre une prise de décision rationnelle. La probabilité de défaillance dépend de l'incertitude des données, des modèles, des hypothèses émises et même des conséquences de défaillance. Une première solution consiste à traiter les incertitudes par simplification, au moyen d'hypothèses conservatives sur les valeurs caractéristiques des données ou par l'addition de coefficients de sécurité.

La méthode quantitative étendue combine l'analyse traditionnelle des incertitudes et la méthode quantitative standard. En faisant varier les paramètres de charges au feu, conditions de ventilation, temps de réponse (= simulation Monte-Carlo), les profils de risques peuvent être présentés en termes de profils moyens, complétés par des intervalles de confiance. Ceux-ci traduisent en termes plus explicites la variation du risque, la variation de la probabilité de certaines conséquences.

8.4. Le cas des bâtiments industriels

8.4.1. Classification des activités exercées et des risques incendie pour les bâtiments industriels

La norme européenne EN 12845 [108] reprend dans ses annexes les classes de risque définies par le Comité Européen des Assurances. Ce comité donne dans le document CEA 4001 : 2003 [65] une classification des activités exercées et des risques incendie pour les bâtiments industriels. Les systèmes

automatiques de sprinklers équipant ces bâtiments sont déterminés à partir de cette classification. Ils sont classés en risque à faible potentiel calorifique (LH= « low hazard »), risques ordinaires (OH1 à OH4) ou risques très élevés (HH). Les risques très élevés font l'objet d'une distinction entre les bâtiments où s'exerce une activité de production (HH/P1 à HH/P4) et les bâtiments de stockage (HH/S1 à HH/S4).

Dans le cas des bâtiments de stockage, le chiffre affectant la dénomination du risque représente la catégorie des marchandises stockées (défini comme un produit et son

emballage). Elle est fonction du taux de dégagement de chaleur (kW) des marchandises. Il n'est autre que le produit de la chaleur de combustion (kJ/kg) des marchandises et de sa vitesse de combustion (kg/s). La chaleur de combustion dépend de la matière stockée et sa vitesse de combustion est fonction de la matière et de son mode de stockage.

Pour effectuer la catégorisation des produits, cette méthode considère tout d'abord la matière mise en cause pour préciser un facteur matière qui est ensuite modifié, si nécessaire, selon la configuration de stockage.

Les configurations de stockage par empilage, en palettes ou sur rayonnage font l'objet d'une classification pour laquelle des limitations et des exigences sont posées. Les hauteurs de stockage, la largeur des allées, la dimension des blocs de stockage sont traitées.

Il est fondamental que l'architecte et le maître d'ouvrage, de même que les autorités compétentes, prennent acte de cette classification.

Concrètement, un même produit [49] peut appartenir à des catégories différentes selon son mode de stockage : des rouleaux de papier bitumineux ou des cartons brûlent plus facilement stockés verticalement qu'horizontalement.

Quel architecte, quel maître d'œuvre est conscient du danger et des conséquences de cette classification? La tentation est grande de choisir, par souci d'économie, la classe qui correspond à une résistance au feu la plus faible. Mais quel exploitant se souviendra qu'il devait stocker ses rouleaux de papier bitumineux horizontalement? Ou que son bâtiment était conçu pour des emballages en cartons légers? Méconnaissance qui peut avoir de lourdes conséquences sur le plan légal et pénal, en cas de blessures ou de décès et qui risque d'entraîner des discussions sans fin avec les compagnies d'assurance!

En effet, toute modification du stockage (matière ou configuration) peut modifier le risque : le système de protection par sprinklers doit alors être adapté, car on risque de ne plus satisfaire aux exigences des assurances et de la réglementation.

De même, dans le cas d'un dimensionnement initial de la structure recourant aux feux naturels, la résistance de la structure doit être vérifiée sous les nouvelles charges thermiques.

On parle de plus en plus de constructions durables. Des bâtiments durables permettent, tout en gardant la structure, de modifier les compartiments, de changer d'activité ou d'installer une nouvelle façade.

La réserve de résistance au feu des structures en béton offre une plus grande souplesse dans les modifications de stockage et dans les changements d'affectation des bâtiments. La durée de vie des structures béton, sans entretien, est importante.

Il existe d'excellents matériaux pour réaliser des murs coupe feu, mais que constate-t-on en pratique?

Souvent, la stabilité de ces murs coupe-feu, qui doivent résister à des incendies de 2 à 4 heures, est assurée par une structure qui offre une résistance d'à peine 15 minutes. Si le mur ne s'effondre pas dans la chute de la structure ou est endommagé par l'effondrement de la structure avoisinante, celui-ci se trouvera souvent dans une position à ce point instable qu'il représente un danger réel pour les services de secours.

Les murs coupe-feu sont nécessaires mais ils doivent être correctement conçus.



Honda – Alost [58] : (source ERGON) Le cap des 50 mètres est franchi. Le compartimentage est réalisé par les poutres, sans ajours.

Afin de rendre le travail plus flexible et de réaliser un hall de stockage le plus multifonctionnel possible, la largeur de 50 m a été franchie, sans colonne intermédiaire, dans ce hall de 150 m de long et d'une hauteur libre de 10 m.

8.4.2. Les incendies d'entrepôts

René Dosne synthétisait en 2001 [48] une étude sur les incendies d'entrepôts.

Cette étude sur les feux d'entrepôts est articulée uniquement à partir de cas vécus par René Dosne, durant ses 43 ans de collaboration opérationnelle aux côtés des Sapeurs-Pompiers parisiens. Ces cas sont illustrés pour la revue ALLO 18 (...) de ces sapeurs-pompiers.

Cette étude était également étayée par 24 ans de collaboration à la revue "FACE AU RISQUE" du C.N.P.P. au travers de la réalisation de la rubrique "feu instructif", totalisant 180 sinistres dont un grand nombre de feux d'entrepôts (...)

«Après avoir vécu, maintes fois, la dramatique lutte contre un sinistre violent semblant dépasser les possibilités des secours, mesuré l'incroyable violence du feu et son développement inexorable se jouant des moyens de secours, après avoir décelé les signes annonciateurs de l'embrasement généralisé d'un entrepôt que les pompiers quittaient au dernier moment avant qu'il ne disparaisse dans les flammes, il est apparu que les solutions étaient à intégrer au moment de l'élaboration du bâtiment.

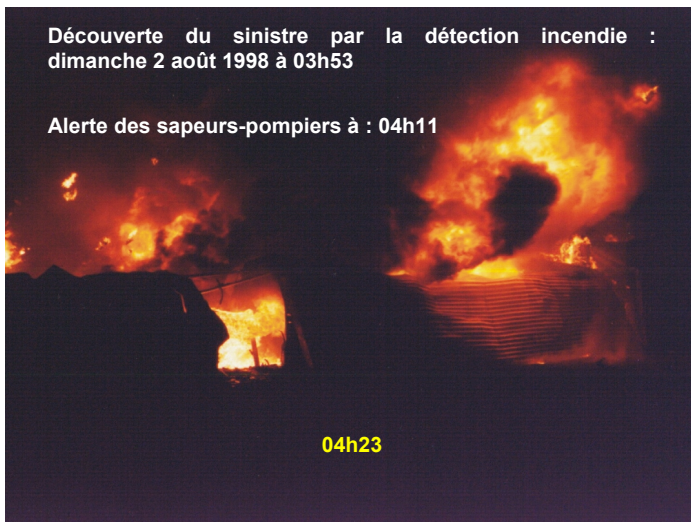
Combien de sapeurs-pompiers, observant l'avancée d'un feu dans un édifice, n'ont imaginé en pensée un bon mur de maçonnerie se dressant soudain, pour leur laisser le temps d'établir leurs lances! (...) »



Feu d'un entrepôt sur la Loire (source CIMBETON)



Les risques d'effondrement sont permanents et les risques de pollution sont réels (source CIMBETON)



Incendie chez Grenoble Logistique Distribution

Les feux de bâtiments industriels : d'une manière générale, ces feux provoquent les interventions nécessitant la mise en œuvre de moyens de lutte les plus importants (source CIMBETON)

La légèreté de certaines constructions, le potentiel calorifique énorme qu'elles abritent, les dimensions imposantes, la non application ou la mauvaise application de la réglementation en vigueur, l'insuffisance des moyens de lutte face à la violence de ces sinistres entraîne des destructions coûteuses : 750 000 euros en moyenne par sinistre en France, ajoutés au milliard d'euros de perte d'exploitation (...)

Trop souvent, par souci économique, ces constructions, sont légères et ruinées dans la première demi-heure, ne permettant pas aux secours d'intervenir efficacement à l'intérieur.

Parfois, alors que l'incendie pourrait encore être attaqué efficacement et peut-être maîtrisé, les sapeurs-pompiers doivent se résoudre, devant le risque d'effondrement de certaines structures, à manœuvrer leurs lances à distance, à partir des accès. Leur efficacité s'en trouve gravement amoindrie.

L'absence de stabilité minimale est le premier constat. Souvent, de la découverte du feu à la mise en œuvre de la 1^{ère} lance, 20 à 30 minutes s'écoulent. La structure, si elle est en acier non protégé, fléchit déjà tout en transmettant ses contraintes aux murs périphériques. Les porte-lances ne peuvent plus pénétrer dans la cellule concernée. Une heure de tenue au feu serait raisonnable (...)

Les rotations de marchandises dans les entrepôts sont rapides. On les estime à 30 jours maximum. Il est impossible pour les sapeurs-pompiers de savoir si les mesures de sécurité applicables à l'entrepôt correspondent aux marchandises qu'il renferme... et qu'il ne renfermera plus demain (...)

Cfr. l'exemple de feu du garde-meubles à Nanterre, où l'exploitant stockait "en plus" des bombes aérosols et 10 000 l de fuel ! Ce sont des rouleaux de flammes dignes d'un feu de dépôt d'hydrocarbures, à 15 m au-dessus des toits, qui trahirent la présence de fûts au milieu des armoires Louis XV...

Causes :

Les incendies (70 %) surviennent essentiellement hors des heures ouvrables, la nuit ou le week-end. 26 % sont d'origine criminelle, pourcentage auquel il faut ajouter une partie des causes indéterminées.

La nuit et hors activité, l'incendie est découvert lorsqu'il apparaît à l'extérieur. A l'arrivée des secours, la situation est alors trop dégradée pour tenter une action efficace avant l'embrasement généralisé et l'effondrement.

On estime, selon les zones, de 20 min à 50 min le délai de mise en action des premières lances.

L'entrepôt doit être en mesure, par sa conception, de participer à sa sauvegarde tout en facilitant l'intervention des secours.

Toitures et éléments annexes :

Un entrepôt moderne est une boîte ouverte sur une face, garnie d'une rangée de portes, coiffée d'un ou de deux étages de bureaux.

La structure est en béton ou en acier, les façades en bardage ou en plaques de béton préfabriquées. La toiture est presque toujours semblable : bac acier couvert d'un revêtement isolant et étanche, souvent bitumeux.

En cas d'incendie, (...) les hautes températures atteintes sous toiture vont liquéfier le revêtement bitumeux par conduction des bacs acier. Leur déformation va permettre leur écoulement dans l'entrepôt et, parfois, l'allumage de foyers secondaires.

Si l'on peut dire que cet apport combustible est de peu d'importance au regard de l'énorme potentiel calorifique stocké, en revanche, son rôle propagateur est réel au-delà des limites de la cellule en feu (...)

Les revêtements bitumeux de toiture, lorsqu'ils ne sont pas interrompus par le dépassement d'un mur coupe-feu pourraient peut-être se voir "quadrillés" de bandes incombustibles d'une largeur à définir (...)

La réalité du danger présenté par les revêtements bitumeux, tels qu'ils existent actuellement, s'illustre par les sinistres destructeurs qui avaient pour origine des travaux par points chauds sur toiture et qui, malgré leur survenue au-dessus de l'entrepôt, ont conduit, à leur destruction complète après être "tombés" dans le bâtiment.

"Il n'est pas d'exemple d'incendie que l'on n'ait pas éteint !", disent les pompiers. Temps d'extinction et surface parcourue font toute la différence. Déterminer la surface maximale de cellule dont l'incendie reste maîtrisable est un exercice difficile.

On admet qu'au-delà de quelques centaines de m² en feu, la cellule est perdue, évidemment si elle est remplie. L'arrêt du feu est particulièrement délicat si l'on ne s'appuie pas sur un ouvrage résistant (mur) ou une large bande sans marchandises.

Un incendie sera plus facilement maîtrisable dans une cellule de 10 000 m² aux stockages bas, espacés, pourvue d'une efficace surface de désenfumage, plutôt qu'une cellule de 2000 m² emplie jusqu'au plafond (...)

Pour qu'un sinistre reste maîtrisable par les services de secours, il faut que sa surface permette, à partir des façades, le recouvrement des jets de lances. (35/40 m de portée utile). Les plus grandes longueurs ne devraient donc pas dépasser 80 m, et des accès exister au moins par deux faces opposées.

Les surfaces d'exutoires devraient être beaucoup plus importantes qu'elles ne le sont aujourd'hui, au regard de l'extrême pouvoir fumigène des produits actuels. Le problème des fumées ne se pose pas longtemps pour les entrepôts à ossature métallique et toiture de bacs acier ou fibrociment : elles sont rapidement emportées, laissant le feu créer l'exutoire qui lui convient. En revanche, c'est plus délicat pour les entrepôts à toiture constituée d'éléments en béton.

Cette dernière toiture, si ses exutoires sont insuffisants, retiendra fumées et gaz chauds sans céder. Ces feux d'espaces clos génèrent un effet de four qui rendent bientôt toute entrée impossible, et peuvent conduire au flash-over.

Le compartimentage :

Le mur coupe-feu doit dépasser en toiture afin d'interrompre la continuité combustible de la couverture, source non négligeable de "débordements" sur les cellules contiguës...

Même s'il est traditionnellement indépendant de la structure porteuse, le mur coupe-feu peut être altéré par la proximité d'une structure métallique qui, en se déformant, va entraîner sa ruine partielle ou complète.

Lors de plusieurs sinistres, on a observé que la fermeture d'une porte coupe-feu avait été empêchée par la position trop basse du fusible commandant sa fermeture. Le mur avait été déformé auparavant, ou des décombres étaient tombés, bloquant son coulissement. Le fusible ou détecteur doit être situé au plus haut sous toiture pour déclencher sans retard la fermeture de la porte.

Le contenu :

(...) Le mode de stockage palettisé, filmé, placé sur des rayonnages métalliques : de véritables bûchers bien aérés où le feu se développe avec facilité.

Les hauteurs de stockage doivent être limitées sous plafond, afin de retarder la survenue du flash-over, très souvent observé au cours du développement du feu.

Les rayonnages doivent être disposés perpendiculairement à la façade et ainsi disposer de plus d'accès ou ouvertures, pour favoriser la pénétration du jet des lances. En effet, dans les entrepôts de grandes dimensions, on constate souvent qu'une importante surface centrale reste à l'abri du jet des lances limité, pour la plupart d'entre elles, à 40 m de portée utile.

Les délais entre la découverte du feu et l'intervention des pompiers sont difficilement compressibles. D'autres facteurs peuvent allonger les délais, tels la distance du centre de secours au feu et les conditions de circulation (trafic, météo...).

A l'arrivée des pompiers, la situation est souvent déjà très dégradée et les risques d'effondrement empêchent leur entrée.(...)

L'action des pompiers :

Incendie déjà trop violent, accès fermés, (rideaux de fer à forcer), ruine de la structure empêchant la pénétration efficace des secours, dimensions des entrepôts ne permettant pas aux lances de couvrir la surface en feu, insuffisance d'accès sur les 4 faces : les sapeurs-pompiers sont contraints de rester en limite du bâtiment, et d'arroser sans efficacité par-dessus des façades sans ouvertures.

Ces sinistres réclament en moyenne des débits d'eau de 400 à 600 m³/h,, débits supérieurs aux possibilités du réseau local.

Trop de zones industrielles ne possèdent pas de réseau d'incendie adapté aux risques qu'elles génèrent. Leurs poteaux d'incendie, mal ou parfois non (!) alimentés, sont appelés "poteaux pot de fleurs" par les pompiers. Le phénomène n'est pas rare...

Entrepôts frigorifiques et bâtiments isolés par panneaux sandwichs :

Chaque année, plusieurs établissements qui utilisent largement les panneaux à âme de polyuréthane brûlent. Qu'ils soient M4 ou M1 (voir p19), le mode d'assemblage de ces panneaux leur confère un effet de mèche difficile à enrayer en cas de sinistre, car le feu court dans les murs

Il suffit d'interrompre cette continuité combustible, soit en insérant une lame incombustible entre les assemblages, soit en intégrant, dans une continuité de panneaux, quelques panneaux isolés à la laine minérale ou à la mousse de verre, incombustible. Ces plages coupe-feu permettraient aux secours d'appuyer leur dispositif sur une base solide.

Entrepôts et pollution::

Depuis Sandoz à Bâle, à Nantes, Rhône Poulenc à Péage de Roussillon, les secours ont été confrontés à un choix : arroser un feu virulent générateur de fumées toxiques et polluer par les eaux d'extinction ou limiter l'arrosage pour ne pas faire déborder les aires de rétention et prolonger l'enfumage (...)

Résistance au feu des structures, des toitures, des couvertures, compartimentage, extinction automatique, désenfumage... ces moyens ne doivent pas être considérés isolément, mais intégrés dans un projet cohérent. Que vaut une couverture incombustible si la ruine rapide de la charpente l'entraîne dans le feu ? Que vaut une installation d'extinction automatique si les stockages sont anarchiques, trop denses, trop hauts, neutralisant partiellement son action ? Que valent des exutoires dimensionnés pour des marchandises n'ayant rien de commun avec celles stockées aujourd'hui ? ...

Pour qu'un incendie ait une chance de rester au stade d'incident, il faut notamment, outre une conception dans les règles au niveau du compartimentage et du désenfumage, une organisation des stockages intelligemment conçue en termes de hauteur sous plafond, de largeur des allées, de création d'îlots de quelques centaines de m² cernés d'allées plus larges, lorsqu'il s'agit de cellules de grande superficie. Certes, on perd un peu de volume! (...) "

*Texte de René Dosne, copyright libre de droits pour toutes publications
éditées par les Membres de CEMBUREAU/ BIBM / ERMCO y
compris sites Internet*

Les panneaux sandwichs à peau métallique

Les panneaux béton ne génèrent pas de pollution lors des incendies. Par contre, la combustion incomplète [67] de la mousse de polyuréthane des panneaux sandwich génère des fumées nocives et irritantes compliquant ainsi l'évacuation et les opérations d'extinction.

Les bonnes propriétés d'isolation des panneaux sandwichs sont responsables d'une montée en température rapide dans les locaux et donc de l'apparition accélérée du flashover.

Jointure des panneaux

Le montage des panneaux sandwich est très important et doit être effectué avec le plus grand soin. La mousse ne peut en aucune façon être mise à nu, sinon elle risque d'entrer en contact avec des étincelles, des flammes, des braises en suspension dans l'air... L'utilisation d'un cadre spécial autour des ouvertures de portes et de fenêtres permet de remédier à ce risque.

Mais un bâtiment vit : des ouvertures sont pratiquées dans les panneaux sandwich, des cloisons sont ajoutées et enlevées, mettant à nu l'âme synthétique des panneaux.

Plusieurs incendies catastrophiques survenus dans les bâtiments utilisant des panneaux sandwich à âme synthétique ont entraîné une prise de conscience progressive auprès des constructeurs, des maîtres d'œuvre, des architectes et des chefs d'entreprise.

L'utilisation de panneaux sandwichs entre autres dans l'industrie agro-alimentaire, n'apporte pas, dans ce type de bâtiments, de solution adéquate et efficace au problème de la sécurité incendie. Trop d'inconnues subsistent encore !

Importance des essais à grande échelle

La comparaison entre les euroclasses feu et les méthode d'essais à grande échelle montre que la classification selon les euroclasses est nettement trop optimiste par rapport à celle opérée suivant les essais à grande échelle.

C'est une des raisons pour lesquelles les compagnies d'assurances, notamment, exigent de plus en plus le recours à des essais à grande échelle pour assurer la sécurité dans les bâtiments.

Sont reprises ci-dessous quelques pistes de réflexion qui devraient interpeller les différents intervenants :

La position des assureurs [56]

Afin d'évaluer les risques encourus et calculer le montant de la prime d'assurance, l'assureur se base sur différents critères, au nombre de 7 :

1. le risque d'activation d'incendie plus ou moins important généré par l'activité de l'entreprise ;
2. l'isolement par rapport aux tiers ;
3. la nature des constructions, prise en compte dans une méthode de classification des bâtiments qui étudie chaque partie de la construction en fonction de la stabilité et de la combustibilité des éléments de

construction. Cette méthode attribue un code construction, en fonction de la nature des matériaux. Il permet d'entrer dans un tableau fournissant les majorations ou rabais " constructions " applicables au bâtiment. Les variations vont de -25 % à +50 %.

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 **30 % en faveur du béton**

4. le mode de chauffage des bâtiments ;
5. la qualité des installations électriques ;
6. la prévention des sinistres : surveillance, interdiction de fumer, gestion des déchets, liquides, gaz, maintenance des installations techniques, lutte contre la malveillance ;
7. les protections incendie : formation du personnel, sprinklers, extincteurs, désenfumage, approvisionnements en eau... et **compartimentage**.

« 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. »

Les règles APSAD en France (Assemblée Plénière des Sociétés d'Assurances Dommage), relatives aux murs séparatifs coupe-feu (CF 2 h ou 4 h), explicitent les dépassements à respecter en toiture et sur les côtés du bâtiment.

Il en est de même pour les ouvertures dans les murs coupe-feu munies de portes coupe-feu ainsi que les ouvertures de passage des câbles électriques, canalisations, conduits, convoyeurs et bandes transporteuses.

La lutte contre l'incendie.

L'efficacité des secours dépend initialement de la rapidité de l'annonce aux services incendies.

Dans le cas du feu d'entrepôt, de nombreuses difficultés viennent se greffer :

Difficulté de pénétration, ampleur du feu à l'arrivée des secours, risques d'effondrement des structures limitant l'efficacité des lances, gros débits hydrauliques nécessaires.

La lutte contre un feu d'entrepôt ne se joue pas au niveau des secours extérieurs, quels que soient leurs moyens, leur rapidité de mise en oeuvre avec de bonnes ressources en eau. C'est au niveau de la conception du bâtiment que le risque incendie doit être pris en compte. Toutefois, trop d'entrepôts rencontrés ne sont que des "parapluies" sans autre ambition que de protéger les marchandises des intempéries et du vol.

En effet, on observe en milieu urbain, où les secours sont rapidement sur place avec des moyens nombreux et puissants, les mêmes destructions qu'en zone rurale. Un plus grand nombre de lances sont mises en action et plus rapidement, mais on ne peut s'opposer au développement du feu dans la cellule d'origine, dès lors que l'on ne dispose pas d'écran "en dur" pour appuyer le dispositif des lances.

Les façades

Le rayonnement thermique intense d'un incendie force à prévoir une certaine distance entre l'entrepôt étudié et les bâtiments voisins, pour éviter les dégâts collatéraux à ces bâtiments et en outre, bien sûr, conserver des zones d'accès pour les services incendie.

Eu égard au prix des terrains ou plus simplement aux contraintes d'implantation du bâtiment, il peut s'avérer intéressant de limiter cette distance :

- Par l'usage d'un talus construit à partir des terres de déblais pour l'édification du bâtiment ;
- Par l'usage de façades en béton coupe-feu.

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.



Propagation par façades (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 avec isolation polyuréthane en train de prendre feu. (source CIMBETON).

En France, pour réaliser les études de danger, des limites de rayonnement thermique ont été fixées à 3, 5, 8, 16 et 30 kW/m² par le Ministère de l'Environnement. Un flux thermique de :

- 3 kW/m² produira des brûlures significatives pour une personne non protégée, exposée pendant 1 min. ;
- 5 kW/m² est le seuil de destruction significative de vitres ;
- 8 kW/m² est le seuil des effets dominos correspondant au seuil des dégâts graves sur les structures.

En général [5], cette intensité doit être limitée à une valeur de l'ordre de 10 à 15 kW/m².

Les effets dominos en France sont fixés :

- pour les effets thermiques : à 8 kW/m² correspondant au début des risques de propagation, et
- pour les effets de pression (explosion) : à 140 mbar correspondant au début des risques pour les structures.

En France, les entrepôts contenant des charges au feu de plus de 500 T ou de volume de bâtiment supérieur à 50 000 m³ p.e. 5000 m² x 10 m (=h) sont soumis à la directive SEVESO selon laquelle une étude de danger doit être effectuée.

Ces études de danger ont montré que l'usage de façades coupe feu pour ces entrepôts permet de diminuer de 40 % en moyenne la distance de recul.

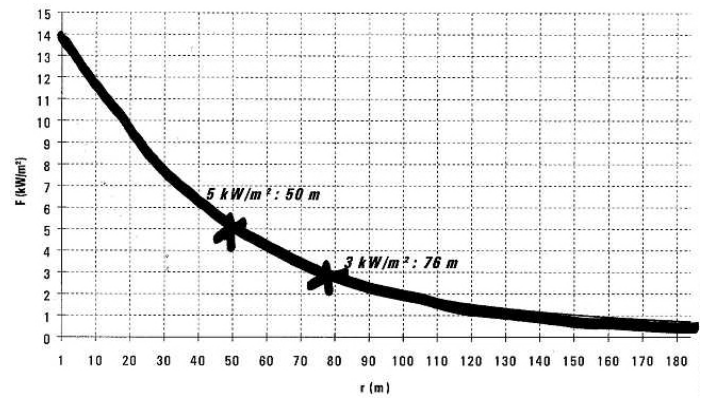


Figure : cellule de 5000 m² – Flux thermique *sans* mur coupe-feu (source CIMBETON).

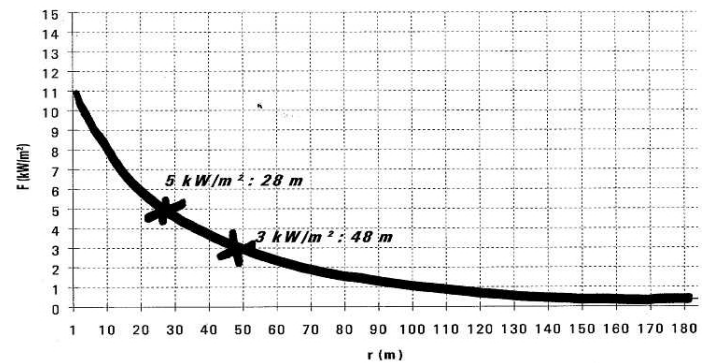


Figure : cellule de 5000 m² – Flux thermique *avec* mur coupe-feu (source CIMBETON).



Façades coupe feu (source : CIMBETON)



Les panneaux de façades en béton (source : CIMBETON)



Panneaux de façade en béton écran thermique CF 2h (source : CIMBETON)

Accessibilité

Comme de nombreux incendies d'entrepôts surviennent hors des heures ouvrables (majorité des cas), l'entrée dans les lieux pose de gros problèmes aux pompiers. La lutte anti-intrusion préoccupant souvent les exploitants plus que la lutte contre l'incendie, les secours doivent recourir aux engins de forçage utilisés pour la découpe des véhicules ! Des dizaines de minutes que le feu met à profit pour s'enfoncer dans les stockages...

Ainsi les pompiers ne peuvent que tourner autour du bâtiment en constatant les signes d'un embrasement imminent, sans rien pouvoir entreprendre d'efficace.

Ceci montre qu'il n'est pas réaliste de retenir pour ce type de bâtiment une probabilité moyenne de 90 % de succès des services de secours.

Les bouches d'incendie

Les poteaux s'avèrent parfois trop proches des façades, soumises au rayonnement du feu et aux risques d'effondrements. Les engins-pompes, raccordés en principe par un tuyau de 10 m, sont soumis au rayonnement. Certains doivent être arrosés pour poursuivre leur mission, d'autres doivent être débranchés, avec

toutes les conséquences d'interruption d'alimentation des lances...

L'étude des dangers doit mettre en évidence les risques :

- d'incendie et d'explosion ;
- de pollution (sol, eau et air)

et doit proposer des solutions pour limiter les risques :

- éviter la propagation de l'incendie :
 - cloisonnement (murs CF 2h dépassant en toiture - auto stable) ;
 - règle de stockage (aérosols, séparation des produits) ;
 - Murs CF 2h minimum ;
- éviter la pollution :
 - mise en place de rétention des eaux résiduelles d'incendie ;
 - surface des exutoires de fumées (bien dimensionnées).

Ce constat permet de se rendre compte que la sécurité incendie peut se voir fortement influencée par une multitude de paramètres qu'il y a lieu de prendre en compte dès la conception et avant la mise en exploitation.

8.5. Le cas des tunnels

Les températures [46] qui s'installent dans les tunnels lors des incendies peuvent être supérieures à 1000 °C. Dans le cas du tunnel du Mont-Blanc, le 24 mars 1999, le camion italien situé à 300 mètres du front des flammes s'est enflammé spontanément sous l'effet du rayonnement thermique (+20 kW/m²). Ce sont les pneumatiques, les pièces en caoutchouc et les éléments en matières plastiques qui étaient concernés.

Pour fixer les idées, le tableau ci-dessous donne les températures d'inflammation spontanée de quelques solides et de liquides. Pour atteindre cette température de surface du matériau, les gaz doivent être portés, en régime transitoire, à une température plus élevée :

Solides ou liquides	Température d'inflammation spontanée (°C)
Bois dur	295
Huiles pour moteur	350 à 500
Papier	230
Polyéthylène	350
Polystyrène	490
Gas-oil	330

Il existe des tables qui fournissent les seuils thermiques admissibles pour les pompiers et pour les usagers, en termes de plages de température, de rayonnement thermique, de délais d'intervention, d'effets sur l'homme suite aux températures de l'air inspiré.

Indiquons que les tenues de dernière génération sont étudiées pour protéger les sapeurs pompiers contre les effets thermiques d'un flash-over.



Trouée dans un mur Coupe-Feu (source CIMBETON)

Les tunnels et les chaussées en béton

Le laboratoire de l'Université de Cergy Pontoise [47], en France, a réalisé des tests feu comparatifs sur le comportement à haute température d'échantillons d'asphalte. Les types d'asphalte retenus sont ceux utilisés couramment pour les chaussées. Les tests ont été réalisés selon la courbe ISO présentant une sollicitation thermique moindre que la courbe d'hydrocarbure à utiliser normalement dans les tunnels. Les résultats de ces tests ont montré que :

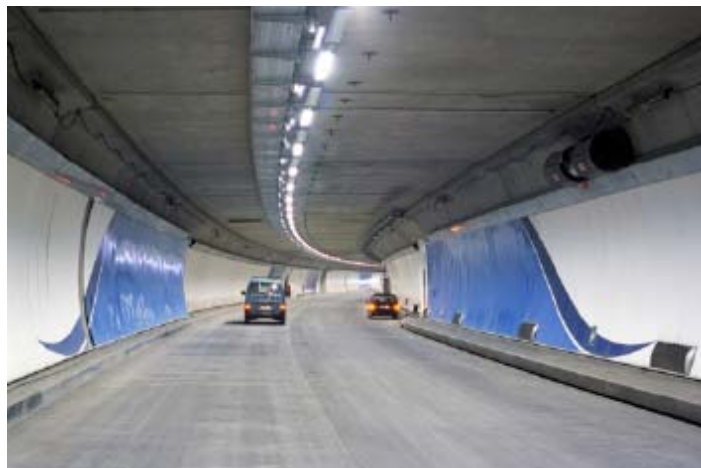
- l'asphalte s'enflamme pour des valeurs entre 428 °C et 530 °C après seulement 8 minutes d'échauffement ;
- les premières vapeurs émises sont perçues 5 minutes après le début de l'échauffement. Les gaz émis sont toxiques et certains d'entre eux sont asphyxiants (CO₂) et cancérigènes ;
- l'asphalte perd ses caractéristiques mécaniques et ne peut plus remplir sa fonction principale. Seuls les granulats restent, mais sans être liés par l'asphalte.

Le béton, quant à lui, ne brûle pas, ne se ramollit pas et ne produit pas de fumées opaques ni toxiques lors d'un incendie. Ce comportement facilite l'intervention des services d'incendie. La contribution de charge calorifique d'autres types de revêtements peut monter jusqu'à 25 % des charges calorifiques totales. La charge calorifique moindre réduira la durée de l'incendie et, par conséquent, les dégâts aux structures et les coûts financiers directs et indirects associés.

Cet avantage du béton se combine avec la maintenance limitée des chaussées béton. La bonne tenue de la chaussée durant l'incendie permettra des fermetures plus courtes du tunnel et une réduction des travaux routiers. Les fermetures avec itinéraires de déviation provoquent des nuisances en termes de pollution. Les travaux routiers, quant à eux, avec maintien du trafic, exposent à des accidents les ouvriers occupés sur le chantier.

Dans les tunnels routiers, le béton sera donc utilisé de manière optimale comme surface de roulement.

Une publication commune BIBM, CEMBUREAU et ERMCO développe ce sujet. Elle est intitulée : " Improving Fire Safety in Tunnels : The concrete pavement solution ". Les versions française et anglaise sont consultables et téléchargeables sur le site de FEBELCEM (www.febelcem.be dans l'onglet « publications ») ou de CEMBUREAU (www.cembureau.be dans l'onglet « concrete »)



© photo-daylight.com, copyright libre de droits pour toutes publications éditées par les Membres de CEMBUREAU/ BIBM / ERMCO y compris sites Internet

Tunnel de Cointe (liaison E25-E40) à Liège, en Belgique : utilisation d'une chaussée en béton pour une meilleure sécurité dans le tunnel.

C. Exemples de comportement au feu des structures en béton lors d'incendies

1.« Feux instructifs »



(source : photos communiquées par J. C. López Agüí)

1.1. Que s'est-il passé à Madrid ?

[50] (source : Pal Chana, British Cement Association).

Les faits saillants :

- Le WINDSOR, gratte-ciel emblématique de 29 étages à Madrid est resté debout malgré le feu qui s'est propagé à de nombreux étages et qui aura duré 26 heures.
- La seule partie de l'édifice qui se soit effondrée est celle des colonnes en acier de la zone périphérique. Elles supportaient les planchers des étages supérieurs.
- Le rapport intermédiaire du NIST (US National Institute for Standards & technology) sur le désastre du World Trade Center recommande la présence de " points solides " dans la conception de la structure du bâtiment. Les points forts du bâtiment WINDSOR à Madrid étaient ces deux dalles " techniques " en béton et le système de noyau central en béton qui a permis au bâtiment de survivre à un incendie d'une rare intensité.

- Ce cas est un exemple de l'excellente performance des structures en béton conçues en utilisant les méthodes traditionnelles et sujettes à un incendie intense. Il fait également apparaître les risques liés à la défaillance des protections actives ou à l'absence de celles-ci dans les structures en acier.

" Achievé en 1978, le building WINDSOR totalisait 32 étages, 29 en superstructure et 3 en sous-sol. Les locataires étaient les comptables Deloitte et la firme espagnole Garrigues mais le bâtiment était en cours de rénovation, de sorte qu'il était vide lorsque le feu s'est déclaré aux alentours de 23 heures, le jour de la Saint Valentin 2005.

Un noyau en béton et une structure en béton supportaient les 20 premiers étages. Au-dessus, une structure centrale de colonnes en béton supportait les planchers en béton avec des colonnes périphériques en acier.

Deux " dalles techniques " en béton conféraient au bâtiment plus de résistance : une dalle située juste au-dessus du rez-de-chaussée et l'autre au niveau du 20^{ième} étage.

La tour était construite avec un béton de résistance normale, avant l'apparition des normes récentes de tests au feu et sans aucun système de sprinklers. La tour était en cours de rénovation qui comprenait, ô ironie du sort, l'installation de mesures de prévention actives et passives.

Le feu a démarré au 21^{ème} étage et s'est rapidement propagé tant vers le haut que le bas. Les services incendie ont dû se limiter à une action de confinement de l'incendie. L'incendie s'est achevée après 26 heures de lutte, laissant un bâtiment complètement brûlé au-dessus du 5^{ème} étage. La façade en acier-verre a été complètement détruite, dégageant le périmètre des colonnes en béton. Les colonnes en acier situées au-dessus du 20^{ème} étage ont souffert d'un effondrement complet. Elles reposaient partiellement sur la dalle technique supérieure.

Le fait marquant est que le bâtiment est resté debout. "

L'effondrement des façades et de la zone périphérique des niveaux supérieurs à base de structures métalliques n'a pas

provoqué la rupture de la dalle de béton. C'est la chute des éléments incandescents qui a communiqué le feu aux étages inférieurs, par les fenêtres de ces mêmes étages.

Les dommages couverts par l'assurance incendie sont estimés à 122 millions d'euros.

La lutte contre le feu pour des incendies d'une telle ampleur ne peut que se limiter à la protection des bâtiments voisins. Le feu s'est propagé par l'ouverture entre les planchers et les façades. Notre réglementation belge impose aux auteurs de projets des dispositions spéciales afin d'éviter ce mode de propagation de l'incendie. Les structures en béton ont résisté...



(source : photos communiquées par J. C. López Agüí)

1.2. Le viaduc des 3 Fontaines



Dessous du tablier du pont après l'incendie (source : ANPI).

Le viaduc des 3 Fontaines [27], construit en 1981, est situé sur l'autoroute E411 à l'entrée de Bruxelles.

Durant la nuit du 6 au 7 décembre 2003, le pont a parfaitement résisté à l'incendie du grand chalet situé juste sous les poutres maîtresses de 22,5 mètres de long.

Il a subi l'agression d'un large feu localisé. Le foyer était constitué d'un chalet en bois de 195 m² et d'un réservoir de minimum 750 l de mazout. Le faîte du toit, étanchéisé à l'aide de feuilles bitumineuses, était situé à 8,3 m au-dessus du sol.

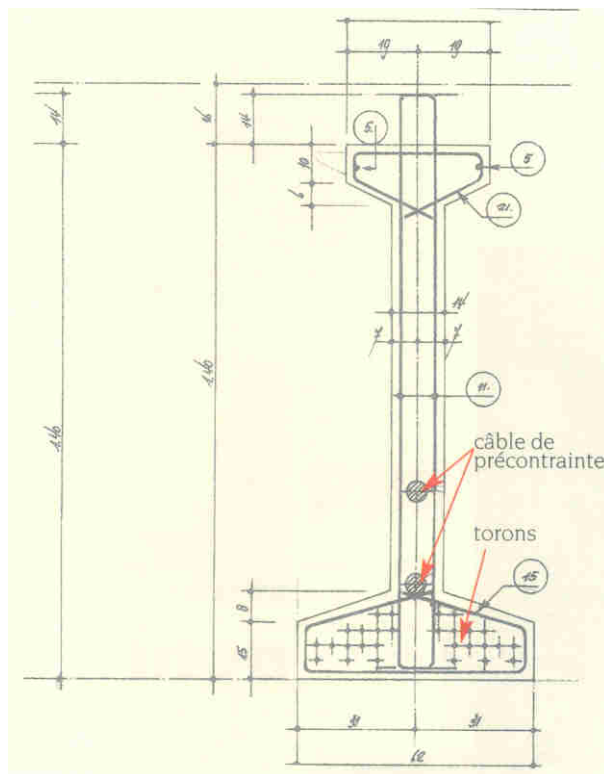
Ce dernier point est fondamental. En effet dans un feu localisé, lorsque les flammes ne touchent pas le plafond, la température des gaz au-dessus de la flamme ne dépasse pas les 520 °C. Ici, comme la hauteur entre le viaduc et le toit du chalet était réduite, les poutres et le tablier sont entrés directement en contact avec les flammes. En appliquant le modèle de feu proposé à l'annexe C de l'Eurocode 1 partie 1-2, une température de 750 °C aurait été atteinte à la surface du matériau.

Après inspection visuelle, la Région de Bruxelles capitale décide de remplacer intégralement la travée endommagée située au-dessus du chalet détruit et en profite pour procéder à de gros entretiens des autres travées. Il n'est pas procédé aux essais habituels ni à un simple essai de charge. Les poutres ont alors été découpées et déposées à proximité du viaduc (voir photo ci contre).

Les poutres présentent à plusieurs endroits des éclatements de béton au droit des semelles et des âmes (éclatement d'arêtes). A certains endroits, des torons précontraints sont visibles ainsi que des armatures. En face inférieure de la dalle, des éclatements de

béton (détachement de morceaux) sont aussi visibles, avec des armatures mises à nu.

Les poutres pourvues de torons de précontrainte et de câbles de post-contrainte (voir croquis ci-dessous) ont pu souffrir d'une dégradation des zones d'ancrage des torons ainsi que d'une relaxation éventuelle de ces derniers.



Croquis du ferraillage des poutres maîtresses (source : ANPI).



Ecaillage du béton des poutres maîtresses (source : FEBELCEM).

2. Conception de bâtiments



Tours North-Galaxy à Bruxelles (Source : ERGON).

ERGON [31] a proposé une variante en béton armé pour la réalisation, en 2003, des 2 tours North-Galaxy de 30 étages, situées à côté du Centre Rogier à Bruxelles. Cette variante s'est avérée non seulement plus économique que la solution initiale en structure acier enrobée de béton mais aussi beaucoup plus rapide. Elle répondait en outre aux conditions techniques prévues dans le projet initial, concernant la dimension des éléments, l'espace disponible pour les techniques et la résistance au feu. [58]

A la base du succès de la réalisation en béton préfabriqué, on retrouve l'utilisation de béton haute résistance et la mise en œuvre d'un nouvel élément TT.

La rapidité d'exécution a aussi été un facteur déterminant : le montage des éléments préfabriqués était réglé comme du papier à musique, avec un rythme de deux étages tous les huit jours ouvrables. Aucune tour en Belgique ne peut se targuer d'un montage aussi rapide.

La stabilité des deux tours est assurée par un noyau rigide coulé en place à l'aide de coffrage grimpants.

La pré-étude complète s'est singulièrement complexifiée par des exigences strictes complémentaires du maître d'ouvrage, relatives au risque d'écroulement en chaîne ("progressive collapse") et imposées suite aux événements du 11 septembre 2001.

La résistance au feu des colonnes en BHR a été justifiée par calcul par l'Université de Liège à l'aide de son programme SAFIR classé dans les méthodes avancées.

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 1-2 [107]. Voir §7.2.3 relatif aux caractéristiques du béton haute résistance.

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.

Ces avantages ont tous été confirmés sur le terrain dans de nombreuses réalisations telles que :

- la tour Vazon au Luxembourg (19 étages) ;
- extension de la tour Madou à Bruxelles (15 étages) ;
- extension de la tour Botanique à Bruxelles (18 étages) ;
- projet North Galaxy à Bruxelles (30 étages).

3. Tests au feu de bâtiments

Les essais au feu sur les éléments structuraux individuels sont utiles pour améliorer les connaissances relatives aux effets d'un incendie sur ces éléments de construction. On effectue rarement un essai au feu réaliste sur un bâtiment complet ou sur une partie importante qui réunit tous ces éléments et permet d'étudier leur interaction.

3.1. Gand 1974

Un feu volontaire [30] a été conduit à Gand le 13 juin 1974 sur un bâtiment de type industriel. Le bâtiment présentait une superficie de 12 x 8 m et une hauteur libre de 6 m.



(Source : FEBE).

Tous les éléments étaient préfabriqués. Les poutres de toiture avaient une portée de 18 m. La toiture se composait de divers types de béton : béton lourd, léger et cellulaire. Deux murs

étaient réalisés en maçonnerie de blocs et les deux autres composés de panneaux de façade en béton cellulaire et béton léger.

La charge au feu de 125 kg de bois par m², entièrement consumée, a produit un feu intense pendant une heure. Le bâtiment a particulièrement bien supporté l'incendie.

Les trois poutres principales précontraintes ont remarquablement résisté à ce feu important. Elles ont été réparées et soumises à un test ultérieur de chargement. Ces poutres présentaient une résistance supérieure aux trois poutres qui n'avaient pas été exposées au feu. Ces essais avaient été commandés par les Autorités belges.

Le film téléchargeable "Concrete is Fire Safe" [29] à partir du site de la Fédération de l'industrie du béton, la FEBE, (www.febe.be > febefast > publications > Video) permet de suivre ce test en "différé".

3.2. Cardington 2001



(source BCA)

Le Building Research Establishment (BRE) a effectué, à Cardington (UK) le 26 septembre 2001, un test au feu d'un compartiment situé au rez-de-chaussée d'un bâtiment de six étages en béton armé. Cet essai fait partie du "European Concrete Building Project" et a été financé notamment par la British Cement Association [28], FEBELCEM (Fédération de l'industrie cimentière belge) et CEMBUREAU (Fédération de l'industrie cimentière européenne).

Ce bâtiment en béton comportait 7 étages, chacun d'entre eux de 22,5 m x 30 m. Chaque étage comportait 12 (3 x 4) travées (7,7 m x 7,7 m).

Ce test a démontré, malgré la mise à nu de ses armatures inférieures, la bonne tenue de la dalle champignon, le bon comportement de sa colonne centrale en béton haute performance, équipée de fibres de polypropylène.



(source : BCA).

D. La restauration des structures béton

Enseignements tirés d'incendies [14], [22]

La " Concrete Society " (UK) a investigué un nombre important de structures différentes endommagées par des incendies en Grande-Bretagne. 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

Nous reprenons, presque littéralement, le texte du MAG 169 de l'ANPI : [27]

Une construction en béton exposée à des températures élevées peut être endommagée. Dans certains cas, les dégâts peuvent être réparés. Dans d'autres cas, ils sont irréversibles et la construction doit être démolie.

1. Méthodes d'inspection

Après un incendie, la première chose à faire est de procéder à une évaluation de l'intégrité structurale de la construction en béton. Cette évaluation déterminera si on peut encore pénétrer dans le bâtiment en toute sécurité. Ensuite, il faut évaluer l'ampleur des dégâts et voir si le bâtiment peut encore être réparé.

1.1. Constataction visuelle

Lors d'une première inspection, l'écaillage, l'éclatement du béton, la formation de fissures importantes et la déformation de

la construction sont relativement faciles à détecter. Un simple coup d'œil suffit.

Le béton est fabriqué à base de granulats calcaires ou siliceux : soumis à échauffement, sa couleur change. Le changement de couleur est imputable à la présence de certains composants ferrugineux. De ce fait il varie selon le type de béton. Cette modification de couleur est permanente : il est donc possible, sur base de la couleur du béton, d'évaluer approximativement la température maximale atteinte pendant l'incendie. Les différentes couleurs du béton sont les suivantes :

- rose ou rouge pour des températures comprises entre 300 et 600 °C ;
- gris blanchâtre pour des températures comprises entre 600 et 900 °C ;
- terne ou jaune clair (couleur peau de chamois) pour des températures excédant 900 °C.

Ceci implique qu'il est également possible d'évaluer la résistance du béton après incendie. Dans la pratique, on peut affirmer qu'un béton présentant une coloration rose est suspect. Une température de 300 °C correspond en effet, grosso modo, à celle d'un béton qui a perdu une partie permanente de sa résistance. Une coloration gris blanchâtre indiquera, elle, un béton fragile et poreux.

Par ailleurs, une déformation permanente de la construction indique une surchauffe de l'armature.

1.2. Méthodes d'essais

On dispose des méthodes suivantes :

- examen de la résistance à la compression, par exemple avec un scléromètre ;
- réalisation de mesures acoustiques, en vue de détecter la formation de fissures internes ;
- forage et extraction de carottes pour effectuer à la fois des essais de compression et un examen tant pétrographique que microscopique.

2. Possibilités de réparation

Après un incendie, il est parfois nécessaire de procéder à d'importants travaux de réparation. Pour la réparation d'une construction en béton, il est pratiquement impossible de fournir des solutions standards. Il faut examiner la situation cas par cas et opter pour la meilleure solution. A cet égard, les facteurs suivants doivent néanmoins être pris en considération :

- la résistance de la construction après incendie ;
- les déformations permanentes ;
- la durabilité après incendie et réparations ;
- l'aspect esthétique.

Le choix de la solution est largement dicté par des considérations d'ordre économique : quelle est la solution économiquement la plus avantageuse ? Remplacer ou réparer les éléments endommagés ? En règle générale, pour une construction en béton qui, suite à un incendie, présente une déformation, la solution la plus logique consiste à remplacer les éléments de construction ou à démolir le bâtiment.

Lorsque l'armature n'a pas été soumise à une chaleur trop élevée, le décapage du béton endommagé jusqu'au béton sain sera largement suffisant. Dans la pratique, une bonne solution consiste à réparer le béton endommagé à l'aide de béton projeté, pour autant que ce travail soit effectué par des hommes de métier. En collant sur la surface endommagée du béton des plats métalliques ou des bandes de fibres de carbone, il est parfois possible de renforcer une armature affaiblie localement. Ce travail doit également être exécuté par des spécialistes. Dans le cas de dégâts à l'esthétique du bâtiment, la solution la plus évidente consiste à appliquer un revêtement.

En chauffant, le béton [13] risque d'éclater : ce n'est pas le cas de l'acier...

« Dans un bâtiment clos, le taux d'humidité (voir §7.2.1) dans le béton est classiquement inférieur au seuil à partir duquel apparaît l'éclatement. D'autre part, les bétons à hautes performances (60 à 100 MPA) se comporteront correctement moyennant une attention particulière à leur composition, à l'incorporation de fibres de polypropylène ou d'un ferrailage de peau type grillage. Le tunnel sous la Manche, ouvrage bridé par excellence (béton de 100 Mpa sans précaution particulière) a quand même été soumis à un feu d'une durée de près de 9 heures et à une température maximale de près de 1100 °C. On ne parle pas de la même chose quand on parle d'une résistance de ¼ h pour l'acier qui est porté à environ 600 degrés. »

Béton projeté

Le béton projeté est souvent utilisé pour des réparations, des rénovations ou pour une construction de type particulier. Dans le cadre du thème " La sécurité incendie et les structures en béton ", le béton projeté est plus particulièrement utilisé pour la réparation d'éléments de structure où l'armature a été mise à nu. Dans le cas du béton projeté, le mortier est projeté sous pression. On distingue deux techniques de projection : par voie sèche et par voie humide.

La projection par voie sèche

Le mortier sec est dirigé vers une conduite haute pression. Celle-ci transporte le mélange sec vers la tête de projection où l'injection d'eau le transforme en béton qui est ensuite projeté sur la surface à réparer. Il s'agit d'une technique relativement compliquée qui nécessite un appareillage lourd. Elle est uniquement appliquée pour des éléments volumineux.

La projection par voie humide

Avant projection, le mélange de ciment et de sable, éventuellement de granulats, est introduit dans un malaxeur où il est mélangé avec de l'eau. Ce mélange est ensuite projeté sur la surface à traiter, à l'aide d'une pompe à piston plongeur, et mis en œuvre. Cette technique est particulièrement appropriée pour de petits éléments et pour des éléments dans lesquels de minces couches doivent être projetées. C'est une technique simple qui nécessite un appareillage plus léger.

E. Annexe

Annexe 1 - Discussion sur les systèmes de sprinklers

Aux Etats-Unis, dans les immeubles multifamiliaux (y compris les hôtels, motels, crèches, maisons pour personnes âgées), une compartimentation offrant une résistance d'une ou deux heures tant entre toutes les unités de logement qu'entre les espaces publics et les unités de logement devrait être redondante [41] avec des systèmes de détection automatique de fumées et des sprinklers.

La notion de redondance s'oppose à la notion de substitution. Il faut le comprendre comme une combinaison de deux moyens complémentaires pour accéder à un niveau de protection incendie élevé.

Il serait instructif d'analyser si, en Belgique, se dégagent les mêmes tendances qu'aux Etats-Unis où des incendies touchent proportionnellement 2,6 fois plus souvent les immeubles à appartements multiples que les logements destinés à une ou deux familles. Ce rapport est de 1,6 si les statistiques de décès sont analysées. Ce rapport est de 3,6 pour les blessés. Les dégâts moyens par appartement sont près de deux fois plus élevés que pour les logements unifamiliaux.

Quelles sont les causes d'un taux de défaillance aussi élevé (16 %) des sprinklers ?

La « National Fire Sprinkler Association » (NFSA) insiste sur la nécessité de soumettre les sprinklers à une inspection adéquate, conformément à la norme en vigueur « Inspection, Testing and Maintenance of Water-Base Fire Protection Systems ». Elle recommande de vérifier sur une base hebdomadaire les vannes de contrôle d'alimentation, pour s'assurer qu'elles sont dans une position ouverte. Même avec cette inspection, si la vanne est fermée, l'alimentation des sprinklers peut être coupée toute une semaine. La NFSA recommande qu'un expert en la matière réalise une inspection en profondeur de l'ensemble du système de sprinklers.

La NFSA insiste : « Les systèmes de sprinklers sont conçus pour les conditions qui existent ou qui sont attendues dans un bâtiment où le système de sprinklers est installé. Après toute modification apportée au bâtiment ou à l'usage du bâtiment, une analyse doit être réalisée pour déterminer si le système de sprinkler reste adéquat. Pareillement, même si le bâtiment et son usage restent inchangés, des modifications dans l'alimentation ou dans l'équipement du système de sprinklers nécessitent une re-évaluation du système. »

Un approvisionnement adéquat en eau d'après le bâtiment est critique pour le bon fonctionnement des systèmes automatiques de sprinklers. En effet, la réduction de l'approvisionnement ou son interruption peut diminuer son efficacité. Le développement de l'urbanisation peut réduire les quantités et les pressions d'eau

dans le système de distribution d'eau desservant les bâtiments. Des interruptions dans la distribution d'eau peuvent survenir dans un certain nombre d'autres cas, comme par exemple les opérations de maintenance des conduites d'eau à l'intérieur ou l'extérieur du bâtiment, y compris la maintenance du système de sprinklers. Interviennent aussi les risques naturels comme les tremblements de terre, les tempêtes, voire les coupures par des pyromanes ainsi que des feux simultanés dans plusieurs bâtiments (attentats, explosions de conduites de gaz...).

L'intervention humaine peut également dégrader l'opérationnalité des sprinklers. Les recommandations de NFSA sont

- Ne jamais peindre les sprinklers ;
- Ne rien pendre à quelque partie que ce soit du système sprinklers ;
- Ne rien stocker à proximité des sprinklers (le sommet du stockage ou du mobilier devrait être à une distance supérieure à 45 cm sous les sprinklers) ;
- Toujours avertir immédiatement d'un dommage au système de sprinklers ;
- Toujours veiller à s'assurer que les vannes de contrôle sont en position ouverte.

Le public [41] est-il généralement conscient que le niveau de sécurité dans les bâtiments peut ne pas être celui qu'il perçoit ?

Vraisemblablement, non. Tout ce qu'il peut voir est le nombre de têtes de sprinklers, que ceux-ci fonctionnent ou non. Une recherche menée par une tierce partie indépendante pour l'« Alliance for Fire Safety » a montré que généralement le public ne se sent pas en sécurité quand il est mis au fait d'un taux de défaillance de 16 % des sprinklers. En présence de sprinklers, presque toutes les réglementations permettent des réductions significatives dans les autres systèmes de protection contre l'incendie. Ces concessions comprennent la réduction des temps de résistance au feu des compartiments, l'augmentation des tailles des compartiments et l'augmentation des distances vers les sorties de secours, cela dans le cadre d'un feu ISO. (voir §2.3)

Mais les systèmes de sprinklers peuvent être défaillants suite à une interruption dans l'alimentation, une maintenance inappropriée, un incendie criminel, des vices de fabrication des têtes de sprinklers, des obstacles physiques au niveau ou à proximité des têtes de sprinklers, des peintures ou des suspensions aux têtes des sprinklers. La compartimentation est dès lors nécessaire pour limiter la propagation du feu lors de leur défaillance.

Le National Institute of Standards and Technology (NIST) a émis ses conclusions le 03-03-2005, suite à un grave incendie en 2003, au sujet des conceptions incendie des bâtiments équilibrant les mesures de protection active et passive. Le rapport recommande :

- d'éliminer, pour les bâtiments pourvus d'installations de sprinklers, les concessions accordées sur les facteurs qui influencent le temps d'évacuation des bâtiments ;
- Les « Model Codes » et les réglementations devraient exiger la redondance des systèmes de protection passive et active contre l'incendie pour assurer une performance adéquate de la structure lorsqu'un ou plusieurs systèmes de protection sont compromis par des actions intempestives de la part du propriétaire ou des occupants (notamment la mise à l'arrêt des sprinklers lors de maintenance).

La prise en compte des sprinklers par une réduction de la densité de charge calorifique est expliquée dans le cadre du Fire Safety Engineering (voir §8.2) .

Nous revenons en profondeur sur les valeurs de fiabilité des sprinklers et illustrons de façon tangible et explicite la problématique de la quantification des mesures actives. La méfiance et la réticence vis-à-vis du FSE, prenant mathématiquement en compte la présence de mesures actives, provient notamment d'une grande variabilité de la fiabilité et d'une mauvaise compréhension des mesures actives. C'est le cas entre autres des sprinklers, cela selon les sources et les pays. La prise en compte d'une valeur moyenne élevée sacrifie de façon inacceptable de nombreux bâtiments et en pénalise d'autres : Ainsi en complément aux premières valeurs tirées du rapport de 2001 de la NFPA pour les USA :

- Selon le concept de sécurité incendie basé sur le feu naturel (NFSC pour Natural Fire Safety Concept) [42] qui a contribué à la rédaction de l'annexe E de l'Eurocode 1, partie 1-2, il faudrait miser sur une fiabilité de 98 % pour des installations conformes « aux règlements ».
- En Australie, les statistiques portant sur les sprinklers donnent des valeurs de fiabilité de 99,5 % (!). Elles peuvent s'expliquer par
 - Une annonce automatique aux services de secours en cas d'ouverture des sprinklers. Il faut noter que ceci n'améliore pas la fiabilité des sprinklers mais augmente la probabilité de succès des services d'incendie ;
 - Tous les plans des systèmes de sprinklers sont vérifiés par des organismes d'évaluation ;
 - Les systèmes de sprinklers installés sont testés par rapport aux spécifications imposées par les organismes d'évaluation ;

- Les systèmes de sprinklers sont **vérifiés hebdomadairement** (vanne de contrôle, alimentation en eau, alarme), vérification confirmée par un rapport écrit ;
- Un balayage électronique est installé dans les bâtiments élevés.

- En Suisse, toutes les vannes d'alarme sont connectées aux services de secours. La fermeture de la vanne principale transmettra une annonce aux services de secours, empêchant le syndrome de la vanne fermée et la fermeture de la vanne en cas d'incendie criminel.
- Selon la BS7974 [111], les valeurs recommandées sont de 75 à 95 % (valeurs mentionnées également dans le rapport du Warrington Fire Research [43]) ;
- Selon le rapport du WG4 de l'étude NFSC [44], en France, des valeurs de 95 % s'appliqueraient. La moitié des déficiences sont liées à des erreurs humaines ;
- Les statistiques du Comité Européen des Assurances conformes au règlement CEA 4001 indiquent tous cas confondus un contrôle de la surface d'action dans 94 % des cas. Le règlement CEA 4001 est l'équivalent de la norme NBN EN 12845 [108] relative au calcul, installation et maintenance des systèmes d'extinction automatiques du type sprinkler. L'équivalent du CEA aux USA est le NFPA. Précédemment en Belgique, tous les sinistres étaient déclarés grâce à un système sans franchise. A présent, suite à l'augmentation des franchises, les assurances ne disposent plus comme auparavant de statistiques fiables selon le point de vue qui nous intéresse. Certaines grandes chaînes de magasins de distribution ont des franchises qui atteignent 1,2 millions d'euros.
- Selon les résultats de la NFPA portant sur des statistiques entre 1925 et 1996, toutes classes de risques confondues, 96 % des incendies sont éteints. Une seule tête a été activée dans 28 % des cas, deux têtes dans 18 % des cas, trois dans 10 % des cas, quatre dans 8 % des cas.

Qu'en penser ?

Dans un document [45] commandé par l'« Alliance for Fire Safety », M. Koffel synthétise une vingtaine d'études sur le sujet :

- De nombreuses études portent sur des périodes datant de plus de 15 ans, à l'opposé de la récente étude de la NFPA qui porte sur une période d'observation de 10 ans ;
- Les pourcentages d'extinction des incendies par les sprinklers donnés par la NFPA tombent à des valeurs variant de 8 à 33 %. En réalité, le contrôle de la taille du feu par le système de sprinklers (action couronnée de succès) est généralement suffisant pour finaliser l'extinction de l'incendie par les services de secours.
- Les statistiques de la NFPA ne reprennent pas les incendies de faible intensité qui n'ont pas déclenché au moins une tête de sprinkler, ni les incendies non rapportés aux Services de secours. Ainsi la valeur de 87 %

de succès donnée par M. Ramachandran (New-York) monterait à 94 % dans l'hypothèse d'1/3 des incendies non déclarés.

A défaut de preuve de cette hypothèse, une fiabilité opérationnelle de 84 % a été retenue par le NFPA. Ce rapport semble indiquer que la fiabilité des systèmes automatiques de sprinklers annoncée à environ 96 % est surestimée.

Il faut souligner qu'en cas d'incendie même si la fiabilité des systèmes est de 84 %, ces sprinklers réduisent drastiquement les pertes en vies humaines et la destruction de biens.

L'annexe nationale belge de l'Eurocode 1 partie 1-2 introduit plusieurs valeurs de fiabilité pour l'extinction automatique selon le type de bâtiments.

Nous avons interrogé M. Briers de l'ANPI, convenor du WG5 au niveau européen, relatif aux normes sprinklers. Il nous explique les pratiques belges :

- Qu'entend-t-on par alimentation de base en eau des systèmes de sprinklers ?

La NBN EN 12845 [108] mentionne que la fourniture d'eau doit être effective pour une durée spécifiée (voir §8.4.1 risque industriel : pour LH 30min, OH 60 min, et au-delà 90 min). Les intercommunales de distribution d'eau ne garantissent jamais des courbes de débit-pression : une mesure est réalisée à l'élaboration du système. L'alimentation est jugée satisfaisante en Belgique si la courbe résultant d'une ponction de 3000 l/min pour l'approvisionnement des pompiers laisse un approvisionnement correct pour le fonctionnement du système. Une courbe est établie sur base de tests sur la conduite d'eau de ville lors de l'élaboration du système sprinklers. De plus, une mesure est effectuée à chaque inspection semestrielle. En cas de résultats insuffisants (liés au distributeur ou à l'établissement de nouvelles entreprises importantes dans le voisinage), il convient de renforcer l'alimentation, p.e. à l'aide de pompes de surpression. Les réseaux maillés sont plus fiables que les réseaux sans boucle.

- Quelles sont les exigences en matière d'alimentation en eau des systèmes de sprinklers ?

Pour des risques légers et ordinaires de type OH1 et OH2, les assureurs demandent une source d'alimentation ordinaire (=alimentation de base). Pour des risques supérieurs ou égaux à OH3 (OH3, OH4, fabrications dangereuses et stockage) , les assureurs pourront demander une source d'alimentation de haute fidélité, c'est-à-dire soit un approvisionnement en eau indépendant complémentaire à l'alimentation de base ou la présence d'un réseau public maillé capable de fournir 100 % du débit de chaque côté.

- Comment est vérifiée la capacité de l'alimentation en eau ?

A l'installation, une courbe débit-pression est établie. Lors de l'inspection par l'ANPI, tous les 6 mois, il est procédé à un essai dit de bout de ligne. Le sprinkler dont la situation est la plus défavorable dans le réseau hydraulique est actionné. Il est vérifié que le poste de contrôle sur la conduite principale déclenche bien l'alarme.

A l'occasion de l'établissement de nouvelles entreprises dans un zoning industriel par exemple, la courbe débit-pression peut s'avérer insuffisante. Dès lors, à l'occasion de l'inspection semestrielle, l'ANPI informe les entreprises déjà pourvues d'un système de sprinklers. Il leur est alors recommandé de s'équiper d'une source d'alimentation indépendante complémentaire.

L'ANPI conseille aux entreprises de tester régulièrement leur moyen d'alimentation, une fois tous les 3 ans, en retraçant une courbe débit-pression. Ce n'est pas imposé dans la NBN EN 12845 et c'est assez simple en présence d'une pompe équipée d'emblée de ce type de mesures.

Il est à noter que 90 % des installations sprinklers sont des installations « humides », où toutes les conduites contiennent de l'eau en permanence. Les 10 autres pourcents sont les installations « sèches », où l'eau ne circule que si un signal est transmis à une électrovanne suite à l'ouverture d'une tête.

- Comment intervient la Commune ?

Les pompiers prescrivent une installation conforme à la norme et demandent le rapport de réception de l'ANPI attestant la conformité à la NBN EN 12845. Par la suite, les pompiers ne viennent plus vérifier sur les lieux.

- Existe-t-il un système de dérogation ?

L'ANPI n'accorde aucune dérogation. Elle est accordée éventuellement par une Commission de dérogations, notamment composée d'assureurs.

- Comment s'assurer de la non-fermeture de la vanne de contrôle ?

Classiquement, cette vanne est sous scellés ou bloquée en position ouverte à l'aide d'un cadenas. Si l'ANPI constate le bris du scellé, une enquête est menée. Les autorités en la matière, entendez ici les pompiers ou l'assureur, peuvent exiger selon les risques que la surveillance de cette vanne soit effectuée par un dispatching, un poste de garde ou encore une centrale de surveillance à distance. La rotation éventuelle de la pompe est détectée et la détection d'une circulation d'eau envoie l'annonce directement au poste de surveillance. Une annexe informative de la NBN EN 12845 est dédiée au monitoring des installations.

- La norme NBN EN 12845 est-elle d'application ?

Oui, il s'agit en fait d'une norme produit harmonisée qui comprend dès lors une annexe Z. La problématique des « kits » a provoqué de longues discussions.

- Qu'en est-il de la fiabilité des systèmes sprinklers ?

Il y a à boire et à manger...

Pour l'Europe, si l'on considère les succès de sprinklers par classe de risques, les statistiques donnent :

- pour le risque bureau (risque léger) : 97,4 % de succès ;
- pour le risque commerce (risque ordinaire) : 97,2 % de succès ;
- pour le risque industrie de bois (risque élevé) : 90,8 % de succès.

Les statistiques de la CEA portant sur une période de 1985 à 1996 pour les bâtiments industriels (OH1 à HP4 et HS4) donnent tous cas confondus un contrôle de la surface d'action dans 94 % des cas et dans 73 % des cas l'incendie est resté circonscrit à moins de la moitié de la surface d'action.

Les statistiques de la CEA portant sur une période toute récente montre que cette probabilité tombe même à 90 % au lieu des 94 % mentionnés ci-dessus. Cette chute s'explique notamment par le recours de plus en plus fréquent à des emballages plastiques.

F. Bibliographie

1. Bibliographie générale

- [1] La résistance au feu des bâtiments, Arnold Van Acker, avril 1996.
- [2] Magazine de l'ANPI mai 2004, article sur la certification, Ludwig Janssens.
- [3] « Application de la réglementation dans les projets de bâtiments nouveaux » conférence de P. Spehl lors de la journée d'étude du 28-09-2000 « Protection contre l'incendie dans les bâtiments industriels : Prescriptions ou Directives ? ».
- [4] Cours de protection contre l'incendie destiné aux préventionnistes incendie, <http://www.aresu.be/>, Helid Aresu de Seui.
- [5] Sécurité contre l'incendie dans les bâtiments, partie 1 prévention passive, dr. Ir. Aloïs Brûls et prof. Dr. Ir. Paul Vandeveld, mai 2000, ISIB.
- [6] Usine Entreprise n°3031, novembre 2004.
- [7] www.normes.be > prévention au feu : site web développé par l'antenne norme du CSTC.
- [8] Evaluation du risque d'incendie dans les bâtiments à appartements multiples, Travail de fin d'études de D. Goffinet, ECAM, 2004.
- [9] Le Sapeur Pompier-Belge n° 2/2003 : « Incendie d'immeuble à appartements à Mons ».
- [10] ANPI Magazine n°165 mai 2003 : « Incendie dans l'immeuble tour 'Les mésanges' à Mons ».
- [11] www.moniteur.be > moniteur belge > recherche avancée > rechercher « normes de base » > liste . Permet d'obtenir les textes complets des arrêtés royaux et de leurs annexes.
- [12] Réaction au feu des produits de construction : le nouveau système européen, CSTB Magazine 145 janvier-février 2003.
- [13] Revue Bâtiments, octobre 2001.
- [14] Concrete and Fire, using concrete to achieve safe, efficient buildings and structures, The Concrete Centre 2004, www.concretecentre.com
- [15] FRAME : <http://www.geocities.com/framemethod/webfrans.html>
- [16] Calcul du risque et sécurité incendie : <http://www.framemethod.be/risque.html>
- [17] Méthode Frame : <http://www.framemethod.be/utilisation.html>
- [18] Cycle de formation, Résistance au feu des constructions, application des Eurocodes dans le cadre de la formation « Fire Safety Engineering », Pr. J.C. Dotreppe, A. Brûls, 2000.
- [19] Sécurité incendie, collection Mémento acier, 2002.
- [20] Designers' Guide to EN 1990 Eurocode : Basis of structural design, H. Gulvanessian, J-A Calgaro and M Holicky, 2002.
- [21] Bulletin du ciment suisse, La lutte contre l'incendie commence au niveau du projet, août 1981.
- [22] Assessment and repair of fire-damaged concrete structures, technical report n° 33, concrete society, 1990.
- [23] Le béton et l'incendie, FEBELCEM, octobre 1981.
- [24] Concrete for fire resistant construction, Cembureau report prepared with the assistance of FIP, 1979.
- [25] Résistance au feu des structures, Principes généraux et recommandations à l'usage des auteurs de projets, J.C. Dotreppe, 1983.
- [26] Passive fire protection in tunnels, CONCRETE February 2003, G. A. Houry.
- [27] Le béton et le feu : mécanisme des dégâts en cas d'incendie, éclatement : le phénomène comment l'éviter, Magazine n°169 de l'ANPI, mars 2004.
- [28] The Cardington Fire Test, Pal Chana and Bill Price (BCA), CONCRETE, January 2003.
- [29] Concrete is Fire Safe, Film, Gand, 13 juin 1974.
- [30] Un incendie volontaire, la construction moderne, septembre-décembre 1974, W. Simons.
- [31] North Galaxy, Ergon Magazine n°36.
- [32] Le comportement au feu des structures, Commission nationale de recherches – incendie, 29 mai 1975.
- [33] Challenge : comprehensive fire protection, CPI – Concrete Plant International – n°5 – October 2002, Ulrich Neck.
- [34] Liste des produits de la catégorie A “Pas de contribution au feu », selon la décision de la Commission Européenne, 94/611/CE modifiée par la décision 2000/605/CE de la Commission (voir [61]).
- [35] Risk and Safety Considerations at different Project Phases, International Conference, Malta, March 21-23, 2001 on Safety, Risk and Reliability – Trends in Engineering, Niels Peter HÖJ.
- [36] Risk Concepts in Fire Safety Design, International Conference, Malta, March 21-23, 2001 on Safety, Risk and Reliability – Trends in Engineering, Hakan Frantzich, Frederik Nystedt and Johan Lundin.
- [37] La résistance au feu des constructions et les Eurocodes, 1ère partie, Magazine CSTC 3ème trimestre 2001, Yves Martin.
- [38] Construction et incendie : les solutions « Les constructions privées et industrielles, les infrastructures », Journée AILG du 19 novembre 2004, Physique de l'incendie, Pr. J-C Dotreppe.

- [39] Construction et incendie : les solutions « Les constructions privées et industrielles, les infrastructures », Journée AILG du 19 novembre 2004, La protection active, Commandant J. Rahier.
- [40] Construction et incendie : les solutions « Les constructions privées et industrielles, les infrastructures », Journée AILG du 19 novembre 2004, Evolution de la réglementation belge en matière de sécurité incendie, M. Y. Picard (SPF Intérieur).
- [41] « Are We Protected From Fire in Buildings ? » Open forum, problems and solutions, PCI journal, January-February 2005, Stephen S. Szoke.
- [42] Concept de sécurité incendie basé sur le feu naturel (NFSC pour Natural Fire Safety Concept), repris comme document CEN/TC250/SC1/N300A, PROFILARBED, août 2001.
- [43] Fire Tech Report - Existing Technologies, Their Acceptabilities, Reliabilities And Cost" (2003), Warrington Fire Research.
- [44] Competitive steel buildings through natural fire safety concepts, technical steel research, final report, Commission Européenne, 2002.
- [45] Reliability of Automatic Sprinkler Systems, William E. Koffel, paper commissioned by the Alliance for Fire Safety.
- [46] Le Sapeur-Pompier magazine, Hors-série Tunnels, mai 2003.
- [47] Revêtement de chaussée en enrobé hydrocarboné ou en béton en situation d'incendie, Albert Noumowe, EPU Editions Publibook Université, Paris, 2003.
- [48] Synthèse sur les feux d'entrepôts, René Dosne, 2001.
- [49] Le comportement des structures en béton, conférence du Groupement Belge du Béton (GBB) du 10-02-2000, conclusions, Félix Janssens.
- [50] Built to Burn? Construction Manager, magazine of the CIOB, June 2005.
- [51] Procédures de justification de la tenue au feu des structures en béton, Journée d'étude du Chapitre ACI de Paris au LCPC, 13 juin 2005, Dhionis Dhima.
- [52] Appropriation des Eurocodes faite en Belgique, Journée d'étude du Chapitre ACI de Paris, 13 juin 2005 au LCPC, P. Spehl.
- [53] Estimates of the Operational Reliability of Fire Protection Systems, R.W. Bukowski, E.K. Budnick and C.F. Schemel, International Conference on Fire Research and Engineering (ICFRE3), Third (3rd). Proceedings. Society of Fire Protection Engineers (SFPE), National Institute of Standards and Technology (NIST) and International Association of Fire Safety Science (IAFSS). October 4-8, 1999, Chicago, IL, Society of Fire Protection Engineers, Boston, MA, 87-98 pp, 1999.
- [54] New Civil Engineer (NCE), magazine of the institution of Civil Engineers, 30 June 2005.
- [55] Fire Design of Concrete Structure, Material, structures and modeling, guide to good practice, fib, à paraître.
- [56] Conception des bâtiments d'activités en béton, - Murs séparatifs coupe-feu et façades à fonction d'écran thermique en béton, réf. B67, CIMBETON, mars 2006.
- [57] Digest de la construction au Canada, CBD-204-F. Calcul de la résistance au feu, T.T. Lie, 1980
voir http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd204_f.html
- [58] Ergon Magazine n°40, juin 2005.
- [59] Les bétons autoplaçants, bulletin n°36 du dossier ciment, FEBELCEM, 2005, Claude Ployaert.
- [60] <http://www.anpi.be>, site web de l'ANPI.
- [61]
http://www.bbri.be/antenne_norm/brand/french/home/norm_and_regl/norm_europe/index.html
- [62] 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 [61]).
- [63] 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 [61]).
- [64] Cycle de formation, Résistance au feu des constructions, application des Eurocodes dans le cadre de la formation « Fire Safety Engineering », Prof. dr. ir. Vandeveld (2000).
- [65] CEA 4001:2003 assurances : Specifications for Sprinkler systems - Planning and installation.
- [66] www.previ.be : présentation d'informations dans le domaine de la protection contre l'incendie dans le cadre des enseignements pour conseillers en prévention donnés à la Faculté polytechnique de Mons.
- [67] Magazine de l'ANPI, novembre 2005, sécurité des panneaux sandwich, Georges Baes.
- [68] Conception de constructions en béton préfabriqué, Modèle de cours, Leçon 10, Résistance au feu des constructions en béton préfabriqué, FEBE, 2005.
- [69] « La protection incendie par les constructions en béton », bulletin n°37 du dossier ciment, FEBELCEM, 2006, J.F. Denoël.
- [70] « Technologie du béton » publié par le Groupement Belge du Béton (www.gbb-bbg.be) (GBB), 608p, édition 2006.

2. Normes

[100] NBN EN 1992-1-1 :2005 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments.

[101] NBN 713-010 : norme relative à la protection contre l'incendie dans les bâtiments élevés.

[102] NBN S 21-201:1980 : norme relative à la protection contre l'incendie dans les bâtiments – terminologie.

[103] NBN S 21-202:1980 : norme relative à la protection contre l'incendie dans les bâtiments – bâtiments élevés et bâtiments moyens : conditions générales.

[104] NBN S 21-203:1980 : norme relative à la protection contre l'incendie dans les bâtiments – réaction au feu des matériaux - bâtiments élevés et bâtiments moyens.

[105] 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.

[106] NBN EN 1991-1-2 :2003 : « Actions sur les structures exposées au feu ».

[107] NBN EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-2 : Règles générales - Calcul du comportement au feu.

[108] NBN EN 12845:2004 : Installations fixes de lutte contre l'incendie - Systèmes d'extinction automatiques du type sprinkler - Calcul, installation et maintenance.

[109] NBN EN 1990:2002 Eurocode : Bases de calcul des structures.

[110] NBN EN 1990-ANB:2005 Eurocode : Bases de calcul des structures Annexe A1 : Application pour les Bâtiments - Annexe Nationale.

[111] BS 7974:PD7 (2003) : Application of fire safety engineering principles to the design of buildings : Probabilistic risk assessment, published by the BSI in London.

[112] NBN EN 1993-1-2:2005 : Eurocode 3 : Calcul des structures en acier - Partie 1-2 : Règles générales - Calcul du comportement au feu.

[113] NBN ENV 1992-1-2 + DAN:2003 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-2 : Règles générales - Calcul du comportement au feu.

[114] NBN EN 1991-1-1-ANB :2005 Eurocode 1 : Actions sur les structures – Partie 1-1 : Actions générales- Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation pour les bâtiments.

[115] NBN B 15-002 :1999 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments.

[116] NBN ENV 1993-1-1 + DAN:2002 Eurocode 3 : Calcul des structures en acier - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments y compris le document d'application belge (version homologuée + DAN)

[117] NBN B 15-001:2004 Supplément à la NBN EN 206-1 – Béton - Spécification, performances, production et conformité.

[118] NBN ENV 1991-2-2 + DAN:2002 Eurocode 1 - Bases du calcul et actions sur les structures - Partie 2-2 : Actions sur les structures - Calcul du comportement au feu y compris le document d'application belge (version homologuée + DAN).

3. Règlements

[201] **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.

[202] **AR 4 AVRIL 2003.** - 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.

