

11/624,753

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : conception et calcul des constructions



Présenté par : Menasria Naima

Traikia Zahia

Thème : sécurité incendie et constructions en béton armé

Sous la direction de : Mme Khaldi Nacera

Junin 2012



Remerciements

On désire en tout premier lieu adresser toute notre reconnaissance à notre encadreur, Mme Khaldi Nacera enseignante au département de génie civil, qui a su croire en nous et dont le soutien, le suivi, la disponibilité et les conseils nous ont été plus que précieux.

Nos remerciements vont également à l'ensemble de l'administration et enseignants de GC.

On tient à remercier la direction de la protection civil de Guelma pour ses aides.

On tient à remercier les membres du jury qui nous font l'honneur de juger notre travail.

Finalement, nos remerciements vont à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

DEDICACE

Je dédie ce travail tout particulièrement à mes très chères parents, mes sœurs, mes frères et mon mari.

Et les petits enfants Nedjem el dine el Assil, Rimasse, Nidale el dine.

A mon amie Naima, et à toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Zahia

DEDICACE

Je dédie ce travail tout particulièrement à mes très chères parents, ma sœur et mon frère.

A mes amies Zahia, Amel, Nawel et à toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Naima

Résumé

Le feu provoque chaque année le décès d'une centaine de personnes et des dégâts matériels considérables.

✓ Le véritable risque lié à l'incendie est d'abord, pour les personnes, le dégagement de fumées toxiques.

Celles-ci provoquent 98% des décès, par asphyxie, dans les premiers instants de l'incendie. Dans un bâtiment à rez-de-chaussée, l'effondrement d'une structure pendant un incendie n'est quasiment jamais à l'origine des pertes humaines. En effet, l'effondrement suppose que la température dans le local en feu a atteint une valeur où aucune vie n'est plus possible depuis longtemps.

Il convient donc de se préoccuper du comportement de l'ouvrage pendant l'évacuation et celui de la phase suivante où le feu doit être éteint. De même, il importe de ne pas causer de dommages aux bâtiments tiers.

Cette dimension doit être prise en compte dès l'origine : c'est avant tout une question de conception, où l'acier contribue largement à limiter la propagation de flamme.

Lorsque l'incendie est éteint, la structure en acier présente un avantage certain : contrairement à d'autres matériaux, l'acier retrouve sa résistance initiale. Cela limite le risque d'effondrement « à froid », après extinction, et la mise en péril de vie des sapeurs-pompiers notamment.

Les mots clés : le feu, l'incendie, protection, le risque, la réglementation ,
béton armé.

المُلخَص

تسبب الحرائق كل عام خسائر بشرية و مادية ضخمة

حيث يعتبر الخطر الحقيقي للحريق على الناس أولا بتسرب الغازات السامة ، إذ تكون نسبة الوفيات خنقا في اللحظات الأولى ب 98 % . بينما لا تكون هناك أي خسائر بشرية عند انهيار الطابق الأرضي للمبنى ، و هذا الانهيار مع الحريق يسبب حتما ارتفاع في درجة الحرارة مما يؤدي الى انعدام فرصة النجاة من الموت.

يجب الانتباه جيدا إلى حالة الهيكل أثناء عملية الإخلاء، و بعد هذه المرحلة تأتي عملية الإخماد حتى لا يحدث أي ضرر على تئني المبنى.

يجب أن يؤخذ هذا البعد منذ البداية في الاعتبار الأصلي حيث الحديد يساهم بقدر كبير في الحد من انتشار الحريق عند إخماده، و هيكل الحديد لديه ميزة معينة على عكس غيره من المواد، حيث يسترد المقاومة الأولى.

و هذا يحد من خطر الانهيار << البرودة >>، بعد الإطفاء، لعدم تعريض حياة رجال الإطفاء على وجه الخصوص للخطر.

الكلمات الرئيسية: الحريق، الخطر، الحماية، الخرسانة المسلحة، القوانين، النار.

Abstract

Fire causes annually the death of people and property damage.

The real risk of the fire is first, for people, the release of toxic fumes.

They cause 98% of deaths by asphyxiation in the first moments of the fire. In a building at ground floor, the structural collapse during a fire is almost never the origin of human losses. Indeed the collapse is assumed that the temperature in the fire room has reached a value where no life is more than possible time.

Should therefore be concerned with the behavior of the structure during the evacuation and that of the next phase where the fire must be extinguished. Similarly, it is important not to cause damage to third building.

This dimension must be taken into account from the beginning; it's all about design, where the steel contributes greatly to limit the spread of flames.

When the fire are extinguished, the steel structure has a certain advantage; unlike other materials, steel regains its original strength this limits the risk of collapse cold, after extinction, and the endangerment of life of firefighters in particular.

The key words: the fire, the risk, the regulations, the steel, the protection, the reinforced concrete.

Liste des figures

Figure 1.1: Le triangle de feu.....	18
✓ Figure 1.2: Phase de développement d'un incendie.....	20
✓ Figure 1.3: Différentes courbes de température.....	22
Figure 2.1: Les effets d'ensemble d'une protection incendie avec l'usage d'élément en béton.	27
Figure 2.2: Habitation individuelle (1 ^{ère} famille).....	33
Figure 2.3: Habitation individuelle (2 ^{ème} famille).....	33
✓ Figure 2.4: Immeubles collectifs (3 ^{ème} famille).....	34
Figure 2.5: Immeubles collectifs (4 ^{ème} famille).....	34
Figure 2.6: Courbe d'élévation de la température en fonction du temps.....	37
Figure 2.7: Evolution des températures dans les essais (graphe extrait des « Technique de l'Ingénieur »).....	37
Figure 2.8: Les principales causes d'incendie dans les bâtiments.....	40
Figure 2.9: Courbes d'incendie nominaux.....	43
Figure 2.10: Phase d'un incendie naturel, en comparant les températures ambiantes à la courbe d'incendie conventionnel ISO834.....	44
Figure 2.11: Couloire contenue de bon nombre d'éléments de protection active.....	45
Figure 3.1: Isotherme et gradient thermique.....	49
Figure 3.2: Schéma du transfert de chaleur conductif.....	51
Figure 3.3: Schéma du transfert de chaleur convectif.....	51
Figure 3.4: Schéma du transfert de chaleur radiatif.....	52
Figure 3.5: Exemple de courbe obtenue par un modèle de zone pour différentes charges au feu de calcul qfd pour un compartiment de 10m*10m*3m=h, avec des parois de 12cm de béton recouvertes de 1,5cm de plâtre dans le cas d'un RHRF de 250 Kw/m ²	56
Figure 3.6: Feu localisé, modèle d'Hasemi.....	58
Figure 3.7: La résistance de compression à chaud.....	61
Figure 3.8: La résistance en traction.....	61
Figure 3.9: Module d'élasticité.....	62
Figure 3.10: Les propriétés relatives de béton avant / après l'élévation de température excepté la propriété résiduelle avec la poudre de chaux à 800°C.....	63
Figure 3.11: Variation de la résistance avec la température.....	63
Figure 3.12: Courbes de la variation de la résistance en compression selon les textes codificatifs DTU et eurocode 2.....	64
Figure 3.13: Evolution de la résistance à la traction en fonction de la température.....	65
Figure 3.14: Résistance en traction d'un BO en fonction de T.....	65
Figure 3.15: Variation de masse volumique de différents types de béton en fonction de la température.....	66
Figure 3.16: Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température.....	66
Figure 3.17: Conductivité thermique.....	67

Figure 3.18: Expansion thermique de pate de ciment.....	68
Figure 3.19: Expansion thermique d'une granulats	69
Figure 3.20: Influence du chargement mécanique sur la déformation.....	70
Figure 3.21: Diminution des propriétés contrainte-déformation avec la température pour l'acier.....	70
Figure 4.1: Gratte-ciel à Madrid lors l'incendie	73
Figure 4.2: Gratte-ciel à Madrid après l'incendie.....	75
Figure 4.3: évolution des caractéristiques des matériaux béton sous l'action d'incendie	79
Figure 4.4: évolution des caractéristiques des matériaux acier sous l'action d'incendie.....	80

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Le type d'essais par euro classe	23
Tableau 2.1: Relation entre exigences de base de la protection incendie et mesure de protection.....	26
Tableau 2.2: résistance au feu des éléments de structure.....	34
Tableau 3.1: Conductivité thermique des certains matériaux.....	51
Tableau 3.2: La densité de charge calorifique moyenne et maximale selon le type de bâtiment.....	59

NOTATIONS

t : temps
 G, G_1 : ensemble des charges permanentes
 G_2 : poids propre du plancher
 Q : charge d'exploitation
 S_n : neige normale
 W : vent normale
 T : température
 \vec{n} : vecteur unitaire de la normale
 S : aire de la surface
 Q : quantité de la chaleur
 X : variable d'espace dans la direction du flux
 h : coefficient de transfert de chaleur par convection
 T_∞ : température des fluides loin de la surface du solide
 T_p : température de surface du solide
 s : constant de Stefan
 Eff : effusivité thermique
 a : diffusivité thermique
 L_{diff} : longueur de diffusion
 A_d : valeur de calcul de l'action thermique indirecte due à l'incendie
 E : module d'élasticité
 $C(\theta)$: chaleur spécifique
 N_u : effort normal
 N_θ : effort normal résistant
 N_{bc} : effort de compression dans le béton
 θ_g : température de gaz dans le comportement eu feu
 ϕ : Densité de flux de chaleur
 φ : Flux de chaleur
 λ : Conductivité thermique du milieu
 ε_p : facteur d'émission de la surface
 α : Coefficient des règles BAEL
 ϕ_b : coefficient de la température moyenne du béton
 Ψ_s : coefficient de la température θ_{si} d'un acier quelconque
 α' : Pression
 ρ : La masse volumique
 ISO : international standard organisation
 SBI : Single Burning Item (objet isolé en feu)
 SF : stabilité au feu
 PF : capacité par-flamme
 CF : capacité coupe-feu

DPC : Directive Produit de Construction
ER : Essential Requirements
DTU : Document Technique Unifié
CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
FB : comportement au feu des structures en béton
FA : comportement au feu des structures en acier
FPM : comportement au feu des poteaux mixtes (acier + béton)
BAEL : règle techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode d'états limites
BPEL : règle techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode d'états limites
CM : constructions métalliques
PS : règles parasismiques
ENV : les prénormes européennes
ELU : Etat Limite Ultime
IGH : Immeuble de Grande Hauteur
INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité
AEAI : Association des Etablissements cantonaux d'Assurance Incendie
RIA : Robinet d'Incendie Armé
CFD : Computational Fluide Dynamique
ANB : Annexe National-National Bijlage
CFD: Contrats Financiers pour Différences
CSH : réhydratation du gel
EC : Eurocode
BO: Béton Ordinaire
OPC: Pâte de Ciment Ordinaire
NIST: National Institute for Standard et Technologies
BRE : Building Research Establishment
(Noumowe 95): effet de haut température (20°C -600°C) sur le béton

SOMMAIRE

i introduction.....	15
ii objectif.....	15
iii présentation de l'étude.....	16
Chapitre 01 : Etude bibliographique	
1 physique de l'incendie.....	18
1.1 Le feu et l'incendie comme des phénomènes physiques.....	18
1.2 Déroulement d'un incendie.....	18
1.2.1 Le triangle de feu.....	18
1.2.2 Les caractéristiques d'un incendie.....	19
1.2.3 Le développement d'un incendie.....	19
1.3 Courbe nominale-la courbe ISO.....	21
1.4 Réaction et résistance au feu.....	22
1.4.1 La réaction au feu.....	22
1.4.2 La résistance au feu.....	24
Chapitre 02 : La sécurité incendie, réglementations et protections et risques	
2.1 Sécurité incendie.....	26
2.2 Règlementation incendie.....	28
2.2.1 Contexte générale.....	28
2.2.2 Les directives européennes et les eurocodes.....	28
2.2.3 Les réglementations incendie selon la protection civil algérienne.....	32
2.2.3.1 Définition des règles et des systèmes.....	32
2.2.3.2 Classifications des établissements recevant publics.....	32
2.2.3.3 Les bâtiments d'habitation.....	33
2.2.3.4 Définition des bâtiments d'habitation.....	33
2.2.3.5 Classifications des bâtiments d'habitation.....	33
2.2.3.6 Résistance au feu des bâtiments d'habitation.....	34
2.2.3.7 Les immeubles de grande hauteur.....	34
2.2.4 Méthode de calcul.....	36
2.2.5 Chargement de structure.....	36
2.2.5.1 Courbe d'élévation de température.....	36
2.2.5.2 Calcul des éléments de structure au feu.....	38
2.2.6 Document technique : défense extérieur contre l'incendie et rétention.....	39
2.2.6.1 Objet et domaine d'application.....	39
2.2.6.2 Principe de la méthode.....	39
2.2.6.3 la prise en compte des volumes d'eau d'extinction.....	39
2.3 Le risque incendie.....	40
2.3.1 Risque.....	40
2.3.1.1 Origine et causes.....	40
2.3.1.2 Types et modélisation d'incendie.....	42
2.3.2 Prévention et protection.....	44
2.3.2.1 Protection active.....	44
2.3.2.2 Protection passive.....	45

2.3.2.3 Comportement humain.....	45
2.3.2.4 Mesures de protection.....	46
Chapitre 03 : Mécanismes thermiques, actions et les matériaux de construction	
3.1 Mécanismes thermiques.....	49
3.1.1 Généralité sur les transferts de chaleur.....	49
3.1.1.1 Introduction.....	49
3.1.1.2 Définition.....	49
3.1.2 Mécanisme de transfert de chaleur.....	50
3.1.2.1 Conduction.....	50
3.1.2.2 Convections.....	51
3.1.2.3 Rayonnements.....	52
3.1.3 Influence de la charge combustible et de ventilation.....	52
3.1.3.1 Caractéristiques thermiques des parois.....	52
3.1.3.2 La sévérité de l'incendie.....	54
3.2 Les actions.....	54
3.2.1 Les actions mécaniques.....	54
3.2.2 Les différents modèles de l'action thermique.....	55
3.3 Les matériaux.....	59
3.3.1 Introduction.....	59
3.3.2 Évolution des caractéristiques de béton.....	60
3.3.2.1 Propriétés mécaniques.....	60
3.3.2.2 Propriétés physiques.....	65
3.3.2.3 Propriétés thermiques.....	66
3.3.3 Évolution des caractéristiques d'acier.....	70
Chapitre 04 : Exemples de comportement au feu des structures en béton lors l'incendie et sa restauration	
4 Exemples de comportement au feu des structures en béton lors d'incendie.....	73
4.1 Conception des bâtiments.....	73
4.1.1 Que s'est-il passé à Madrid ?.....	73
4.1.2 Le viaduc des 3 fontaines.....	75
4.1.3 Teste au feu des bâtiments.....	76
4.1.4 Cardington 2001.....	76
4.2 Étude d'un hôtel R+4 : contreventé par portique.....	76
4.2.1 Protection contre l'incendie.....	76
4.2.2 Comportement des matériaux au feu.....	76
4.2.3 Vérifications complémentaires de résistance à l'incendie.....	77
4.2.3.1 Poteaux des constructions courants (poteau 30*60).....	77
4.2.3.2 Les poutres continues en béton armé à section rectangulaire, armées d'acier naturel.....	78
4.3 La restauration des structures béton.....	80
5 Conclusion.....	80

Introduction générale

i Introduction

L'incendie est une combustion qui se développe sans contrôle dans le temps ni dans l'espace. La combustion est une réaction chimique d'oxydation d'un combustible par un comburant, nécessitant une source d'énergie pour être initiée. Pour que « ça brûle », il faut donc du combustible, du comburant et une source d'énergie. C'est ce que l'on appelle le « triangle du feu ».

De nombreuses causes peuvent être à l'origine de la naissance d'un incendie. La plupart du temps, il s'agit de défauts de type court-circuit.

Les sources d'inflammation sont de natures variées :

Thermique;électrique;électrostatique;mécanique;climatique;chimique ou bactériologique ;

L'incendie comme phénomène est souvent plus complexe : c'est un accident ou un événement ou succession d'événements imprévus ayant pour résultat une atteinte à l'intégrité physique des personnes ou des destructions de matériel. Suivant l'importance de l'incendie, on peut le qualifier d'accident majeur : Le passage d'un simple accident à un accident majeur peut tenir à peu de chose. Un départ de feu rapidement maîtrisé restera un accident, s'il se développe jusqu'à détruire entièrement un bâtiment causant la mort de plusieurs personnes, il devient un accident majeur. Le but de l'analyse de risque est bien évidemment d'éviter la survenance de l'accident, mais surtout de proscrire l'accident majeur

Les dommages causés par un incendie peuvent être directs ou indirects. Par exemple Le feu a entièrement détruit le dernier étage d'un immeuble, et le ruissellement de l'eau utilisée par les services d'incendie et de secours a gravement endommagé les étages inférieurs.

ii Objectif

Evacuer et protéger les personnes sont les deux priorités de la sécurité incendie.

On s'intéresse dans ce travail au choix du béton, réglementations, résistance au feu, risque incendie, et restauration du béton après incendie, on :

- présente les concepts fondamentaux propres au domaine du feu ;
- qualifie le risque incendie ;
- démystifie les protections actives ;
- 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, confère aux ouvrages une résistance remarquable au feu et de bonnes possibilités de restauration après incendie

iii Présentation de l'étude

Ce présent mémoire sera composé de quatre chapitres

- Le premier chapitre est une étude bibliographique qui consiste en un aperçu global sur le feu comme un phénomène physique

-Dans le deuxième chapitre on présente la sécurité incendie ; la réglementation incendie et les protections et risques

-Dans le troisième chapitre nous présentons les mécanismes thermiques ; les actions et les matériaux utilisés dans les constructions

-Dans le quatrième chapitre on présente des exemples de comportement au feu des structures en béton lors d'incendies et la restauration de ces structures avec une conclusion

Chapitre 01

Etude bibliographique

1. Physiques de l'incendie

1.1 Le feu et l'incendie comme des phénomènes physiques

Le feu est un phénomène physique, comme le vent ou le courant électrique.

A distinguer des objets que ce phénomène implique, respectivement les atomes, les molécules d'air et les électrons. Ce qui serait intéressant, c'est de se demander pourquoi les anciens considéraient le feu comme un élément, alors qu'ils voyaient bien la fumée monter et un mouvement se produit.

L'incendie est un phénomène de combustion non maîtrisé dans le temps et dans l'espace, dont la caractéristique principale est de se propager rapidement. Pour qu'une combustion quelconque se produise, trois éléments, que l'on rassemble habituellement dans le <<triangle du feu>>, sont nécessaires : un combustible, un comburant et une énergie d'activation. [2]

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 prédéterminée.

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 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. [1]

1.2 Déroulement d'incendie

1.2.1 Le triangle du feu

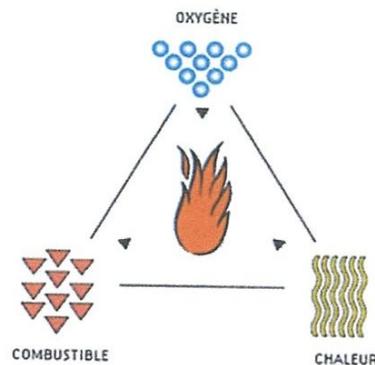


Figure1-1 : le triangle du feu

Le feu est une équation à trois éléments : combustible+ comburant (oxygéné) + source de chaleur.

La combustion est une réaction exothermique (qui dégage de la chaleur) entre l'oxygène de l'air et certaines substances solides, liquides ou gazeuses (combustibles). C'est sous l'action

d'une énergie d'activation, ou source de chaleur –flamme, échauffement, point chaud –, que les deux premiers éléments entrent en combustion, lorsque la température d'inflammation est atteinte. [3]

1.2.2 Les caractéristiques d'un incendie

En dehors de la température, ce qui caractérise communément un incendie sont les flammes et les flammés et les fumées. Toutefois, il peut exister des feux sans flammes apparentes (les flammes émettent un rayonnement dont les longueurs d'onde ne sont pas perceptibles par l'œil humain) ou fumée. [2]

- **Les flammes**

La caractéristique principale des flammes est l'émission de lumière. C'est la partie visible des réactions d'oxydation vive en phase gazeuse. Selon la nature des gaz de combustion, la lumière diffère en qualité et en quantité. L'autre caractéristique essentielle des flammes est l'élévation rapide de température qu'elles génèrent (supérieure à 1000°C et pouvant atteindre 2500°C dans le cas mélange hydrogène-oxygène). On distingue deux types de flammes, les flammes de Premélange et les flammes de diffusion. Les premières ont une couleur blutée et une forme conique, presque immobiles. Elles sont obtenues lorsque le gaz est mélangé au comburant dans des proportions voisines de la concentration stœchiométrique (c'est-à-dire le rapport combustible /comburant optimal pour obtenir une inflammation ou une explosion). Il s'agit, par exemple, des flammes des Appareils de cuisson à gaz. Les flammes de diffusion, quand, à elles, sont celles dont la combustion se poursuit au fur et à mesure de mélange gaz combustible avec l'air. La richesse de la flamme est très élevée au niveau du front de flamme, car le combustible est souvent décomposé par avant de se mélanger à l'oxygène

- **Les fumées**

Les fumées sont des gaz qui diffusent ou absorbent la lumière parce qu'ils contiennent des particules solides de carbone imbrûlé. Elles peuvent être constituées de corps en phase solide ou liquide ou par des gaz à la fois toxiques et inflammables. Elles renferment essentiellement des suies (de l'ordre de 10 p. 100 de la masse du matériau brûlé),

1.2.3 Le développement d'un incendie

Trois composants sont nécessaires au développement du feu [4] :

- le combustible (les matières) ;
- la source d'énergie (une flamme) ;
- le comburant (l'air) ;

Un incendie comporte une phase de développement où la température s'élève, puis une [1]

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 couche supérieure sous le plafond.

En générale, le local contient une couche inférieure se composant de l'air ambiant, de gaz et une couche supérieure chaude (modèle à deux zones). Une température de l'ordre de 200°C provoque l'éclatement des vitres des fenêtres, créant un apport subit d'oxygène fraîche qui redonne de la vigueur à l'incendie. La couche supérieure se rapproche du planché, car elle croit en volume de paraison alimentation en panaches de fumées.

Au cours du déroulement 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-ouvre ou l'embrasement généralisé. Il correspond généralement à une température de 500 à 600 °C la montée très raide des températures dans le compartiment et l'accroissement du dégagement de chaleur provoquent un brassage des fumées où les couches se mélangent (modèle à 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 est 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.

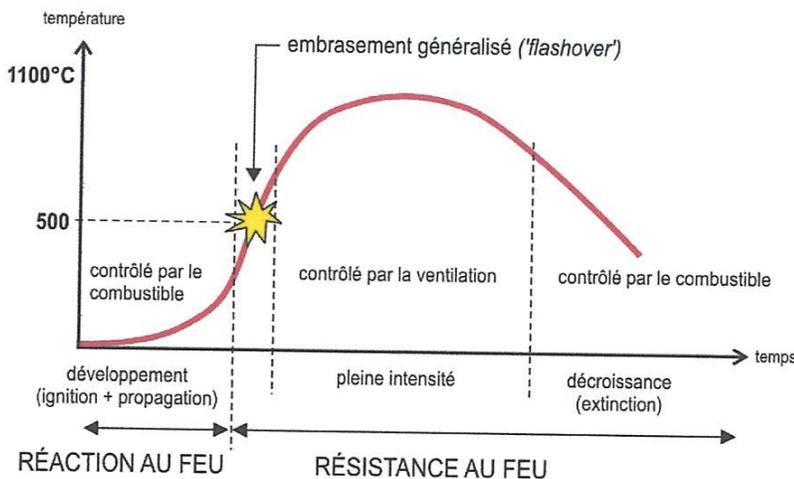


Figure1-2 : phases de développement d'un incendie

1.3 Courbes nominales- la courbe ISO[5]

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

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

Pour ce qui est de la modélisation d'un incendie dans un bâtiment, ces courbes constituent une référence conventionnelle.

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

La notion de durée de résistance est conforme au concept performance : 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 1-3.

Elles ont été établies à partir de l'expérience sur des feux réels, tombant dans une des trois catégories majeures, à savoir les bâtiments, la pétrochimie/plates-formes en mer et les tunnels.

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

Les éléments en béton s'accommodent sans problème d'un feu ISO d'une heure. Une résistance supérieure peut être obtenue sans difficulté, ce qui est très loin d'être le cas des éléments métalliques non protégés.

Après 1 quart d'heure, l'acier atteint 500 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.

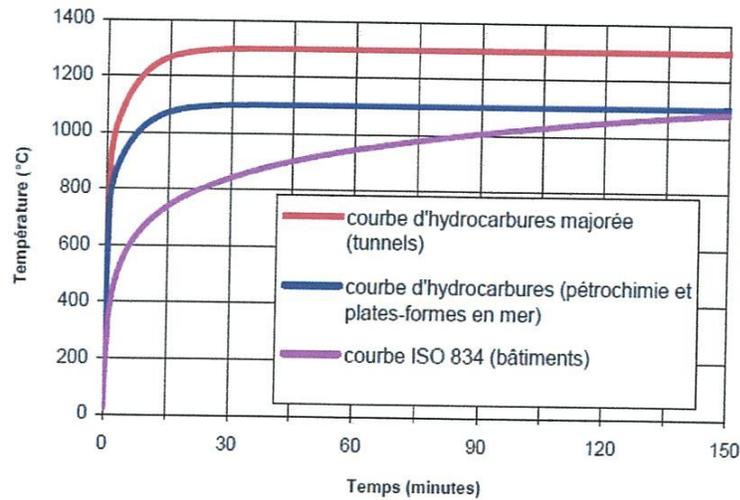


Figure1-3 : différentes courbes de température

1.4 Réaction et résistance au feu

1.4.1 La réaction au feu

La réaction au feu est caractérisée par plusieurs notions : [6]

- Combustibilité : quantité de chaleur dégagée au cours de la combustion.
- Inflammabilité : présence de gaz inflammables.
- Dégagement de fumées ou de gaz corrosifs, qui contribuent à augmenter les dommages lors des incendies à températures (sup à 450°C).

Le tableau ci-après donne le type d'essais par euro classe :

Classes	Autres produits	Classes	Revêtements de sol
F	Aucune performance de réaction au feu déclarée	F _{FL}	Idem classe F
E	<ul style="list-style-type: none"> - Essai à la petite flamme avec observation de la chute de gouttes enflammées qui fait l'objet d'une classification additionnelle 	E _{FL}	<ul style="list-style-type: none"> - Essai à la petite flamme
D	<ul style="list-style-type: none"> - Essai à la petite flamme avec des seuils plus sévères que pour E - Essai SBI 	D _{FL}	<ul style="list-style-type: none"> - Petite flamme - Panneau radiant (éclairage critique supérieur ou égal à 3KWm⁻²)
C	<ul style="list-style-type: none"> - Essai à la petite flamme avec les mêmes seuils que pour la classe D - Essai SBI □ seuils plus sévères que pour la classe D 	C _{FL}	<ul style="list-style-type: none"> - Petite flamme - Panneau radiant (éclairage critique supérieur ou égal à 4,5KWm⁻²)
B	<ul style="list-style-type: none"> - Essai à la petite flamme avec les mêmes seuils que pour la classe D et C - Essai SBI 	B _{FL}	<ul style="list-style-type: none"> - Petit flamme - Panneau radiant (éclairage critique supérieur ou égal à 8 KW m⁻²)
A2	<ul style="list-style-type: none"> - Essai SBI, performances permettant un classement en B. - Bombe calorimétrique ou petit four réel. (le choix réel entre ces deux essais dépend de la composition du produit). 	A2 _{FL}	<p>Même esprit que la classe A2</p> <ul style="list-style-type: none"> - Panneau radiant - Bombe calorimétrique ou petit four
A1	<ul style="list-style-type: none"> - Bombe calorimétrique et petit four. - Dans certains cas, SBI en variante, avec des seuils plus exigeants que pour B. pas de classification additionnelle. 	A1 _{FL}	<p>Deux essais :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bombe calorimétrique - Petit four <p>Pas de classification additionnelle</p>

Tableau 1-1 : le type d'essais par euro classe

1.4.2 La résistance au feu

La résistance au feu des éléments de construction se mesure en temps selon trois critères : [7][6]

- Critère n° 1 : résistance mécanique.
- Critère n° 2 : étanchéité aux flammes et aux gaz chauds ou inflammables.
- Critère n° 3 : isolation thermique (échauffement de 140°C pour la face non exposés).

Les éléments résistant au feu sont classées en trois catégories : [6][7]

- La stabilité au feu (SF) ;
- La capacité pare-flamme (PF) ;
- La capacité coupe-feu(CF) ;

Les éléments de construction sont testés en laboratoire en fonction de ces trois critères, à l'aide de fours qui reproduisent les conditions d'un feu correspondant à la courbe normalisée ISO température/ainsi le temps [7]

- La stabilité au feu (SF) est un critère de résistance mécanique. On mesure le temps pendant lequel un ouvrage structurel (portique, poteau, poutre, voile, etc....) ou un élément de construction, soumise à une charge déterminée, assurent leurs fonctions sans s'effondrer.
- La capacité pare-flammes (PF) est un critère d'étanchéité aux flammes et aux gaz de combustion.
- La capacité coupe-feu (CF) est un critère d'isolation thermique.

Dans chaque catégorie, le classement s'exprime en degré en fonction du temps pendant lequel les éléments ont satisfait aux différents critères, les degrés de résistance au feu sont :

1/4h, 1/2h, 3/4h, 1h, 1h1/2, 2h, 3h, 4h, 6h.

Chapitre 02

La sécurité incendie, Réglementations et protections et risques

2.1 Sécurité incendie

Objectif de la sécurité incendie : La protection des personnes et des biens[1]

Les objectifs de la sécurité incendie, 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

Les exigences de base de la protection incendie consistent à

- Réduire le développement de l'incendie ;
- Eviter la propagation du feu ;
- Assurer l'évacuation rapide des occupants avec une relative sécurité ;
- Faciliter l'intervention du corps des sapeurs-pompiers.

Tableau 2-1 : montre comment les éléments béton satisfont aux exigences fondamentales de la protection incendie

exigences de base de la protection incendie			
réduire le développement de l'incendie	Evitera 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			
À l'aide de murs, sols et plafonds incombustible	À l'aide de parois tant intérieures qu'extérieures hautement coupe-feu	Des chemins d'évacuation constitués d'éléments dotés d'une haute résistance au feu et utilisables pendant un long laps de temps	Des structures portantes à haute résistance au feu qui permet une attaque effective du feu à l'intérieur du bâtiment

La sécurité 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 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 de 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 brut en France ;
- 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 brut en moyenne en France.

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.

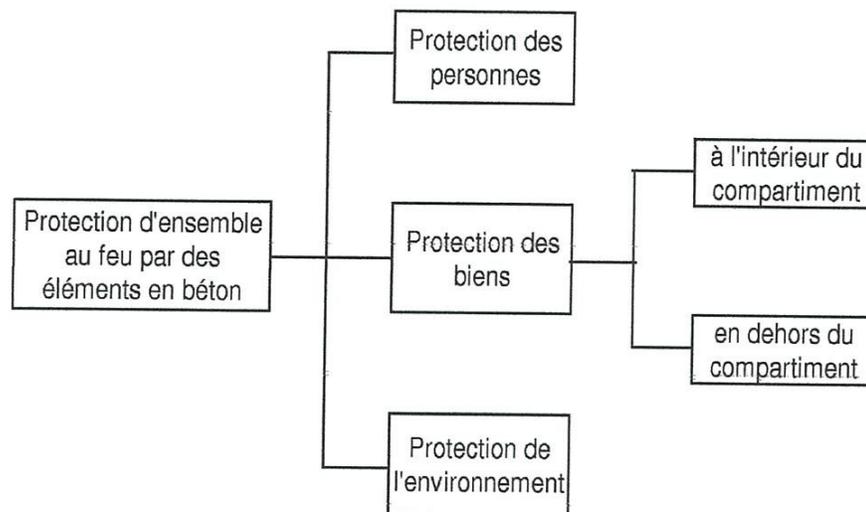


Figure 2-1 : Les effets d'ensemble d'une protection incendie avec l'usage d'éléments en béton

L'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 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.

A cet égard, les structures béton sont des plus rassurants tant au stade de l'évacuation qu'à celui de la lutte contre l'incendie. Selon les observations 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 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 compartiment et non intégrées. Les intérêts : propriétaires, architectes, entrepreneurs, assureurs, occupants des bâtiments et visiteurs, ne sont pas nécessairement convergents. Une réglementation équilibrée devra prévoir des formations, des agrégations des 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.

2.2 Règlements incendie

2.2.1 Contexte générale[8]

Une des règles fondamentales de la sécurité incendie consiste à préserver la vie humaine en favorisant l'évacuation des personnes et l'intervention des services de secours. Pour ce faire, des dispositions constructives doivent être adoptées afin de limiter le développement et la propagation d'un incendie affectant un bâtiment ou un ouvrage de génie civil.

En France, le comportement au feu des constructions est régi par des textes réglementaires émanant de divers ministères. Ces textes précisent notamment les éléments suivants :

- d'une part, les méthodes permettant de justifier que ces matériaux et ces éléments de construction présentent afin de limiter le risque lié à l'incendie à un niveau acceptable ;
- d'autre part, les méthodes permettant de justifier que ces matériaux et ces éléments de construction présentent effectivement le niveau de performance requis.

Dans ce contexte général, on présente les modes de prévision par le calcul du comportement de structures soumises à un incendie.

Il concerne donc essentiellement les méthodes de classification en résistance au feu par le calcul, et tout particulièrement celles consignées dans les normes expérimentales européennes appelées eurocodes.

2.2.2. Les directives européennes et les eurocodes

Les directives européennes[1]

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

La « Directive Produits de Constructions », la DPC, 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 PRODUIT 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 décennal de 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 "Produit de Construction" est une des directives "nouvelle approche" promulguées dans le prolongement du traité de Rome, 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 Etat membres.

Un document interprétatif, rédigé par la commission européenne, en collaboration avec des experts européenne, est lié à chacun des exigences essentielles. Suivants les objectifs généraux dégagés dans le document interprétatif pour L'ER incendie, le bâtiment 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 au bâtiment voisin 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 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 exposée. Les autorités régionales

en charge de développement économique et celles en charge de l'environnement peuvent être sensible 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 toujours selon ce document interprétatif, l'exigence essentielle peut être respectée en suivant les différentes possibilités de stratégie de sécurité incendie en vigueur dans les Etats membre, tels des scénarios de feux conventionnels (feu normalisés) ou "naturels" (feux paramétrés), qui comprennent des mesures de protection passive et /ou active contre l'incendie.

Eurocodes feu[8]

Pour répondre aux exigences formulées dans les textes réglementaires, la résistance au feu des structures est justifiée généralement par des méthodes de calcul simplifiées.

A l'heure actuelle, au plan de France, ces méthodes sont contenues dans les Documents Techniques Unifiés. Le but de ces DTU est de grouper, d'unifier et d'harmoniser, en les précisant, les principales prescriptions techniques et fonctionnelles concernant les travaux de bâtiment. Elaborés par un groupe de coordination présidé par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), ils peuvent être considérés comme l'expression écrite des « règles de l'art ». Les règles de calculs concernant la prévention et la protection contre l'incendie sont :

- Règle FB (DTU P 92-701) : Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton,
- Règle FA (DTU P 92-702) : Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en acier,
- Règle FPM 88 (DTU P 92-704) : Méthodes de prévision par le calcul du comportement au feu des poteaux mixtes (acier+béton).

Pour information, les principales autres règles concernent la stabilité des bâtiments sont les règles BAEL et BPEL pour les ouvrages en béton armé et précontraint, les règles CM pour les constructions métalliques, les règles neige et vent et les règles parasismiques PS.

En complément des DTU, donne la possibilité d'utiliser les eurocodes structuraux européennes (utilisables actuellement à l'état de normes expérimentales), pour déterminer le calcul du degré de résistances au feu des éléments de construction.

A ce sujet, il peut être rappelé que la directive européenne produite de construction (DPC), à l'origine des Eurocodes, fixe les exigences essentielles suivantes pour la limitation des risques d'incendie :

« L'ouvrage doit être conçu et construit de manière que, en cas d'incendie :

- La stabilité des éléments porteurs de l'ouvrage puisse être présumée pendant une durée déterminée ;
- L'apparition et la propagation du feu et de la fumée à l'intérieur de l'ouvrage soient limitées ;
- L'extension de feu à des ouvrages voisins soit limitée ;

- Les occupants puissent quitter l’ouvrage ou être secourus d’une autre manière ;
- La sécurité des équipes de secours soit prise en considération. »

Les parties des eurocodes relatives au comportement au feu des structures en situation d’incendie, communément appelées « Eurocodes Feu », sont les suivantes :

- Eurocode 1, partie 2-2 : Actions sur les structures exposées au feu,
- Eurocode 2, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures en béton,
- Eurocode 3, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures en acier,
- Eurocode 4, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures mixtes (acier+béton),
- Eurocode 6, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures en maçonnerie,

L’Eurocode 1, partie 2-2, définit les actions à prendre en compte, en particulier l’action thermique et les combinaisons d’actions mécaniques dans le cas de la situation accidentelle d’incendie. Cette partie est destinée à être utilisée en liaison avec les parties relatives au calcul de la résistance au feu des ENV 1992 à 1996 et de l’ENV 1999 qui fixent des règles de calcul de comportement au feu des structures. Les actions thermiques mentionnées dans le corps du document sont principalement limitées aux actions thermiques nominales. Des annexes informatives jointes à ces eurocodes présentent des données et des modèles pour des actions thermiques ayant une base physique.

De plus, pour ce qui concerne les structures en béton, en acier et en bois, il peut être noté que la partie 1-2 de l’Eurocode 2 traite du calcul des structures en béton en situation accidentelle d’incendie. Elle apporte des compléments et identifie les différences par rapport au calcul des structures aux températures normales.

Pour les structures métalliques, l’eurocode 3, partie 1-2, décrit les propriétés de l’acier à température élevée, et les différentes méthodes qui permettent d’analyser son comportement au feu. Il présente notamment les méthodes de vérification de la résistance au feu conventionnel d’élément tels que les tirants, les poutres et les poteaux.

Ces méthodes prennent en compte l’échauffement des éléments soumis à un incendie et la diminution concomitante des caractéristiques mécaniques. Une annexe décrit une méthode pour les éléments de structure situés à l’extérieur des bâtiments. La possibilité d’utilisation de méthodes de calculs avancés est présentée.

L’Eurocode 4, partie 1-2, décrit les méthodes de vérification de la résistance au feu conventionnel des éléments mixtes acier-béton tels que les planchers, les poutres et les poteaux. Des valeurs tabulées et des méthodes simplifiées permettent le dimensionnement des éléments pour répondre à des exigences de résistance au feu. La possibilité d’utilisation de méthodes de calcul avancé est présentée.

De manière plus générale, il peut être noté que les eurocodes structuraux traitent d’aspects spécifiques de protection passive au feu en termes de calcul des structures ou de parties de

celles-ci en vue d'obtenir une résistance suffisante et une limitation de la propagation du feu s'il y a lieu.

2.2.3. Les réglementations incendie selon la protection civil Algérienne[29]

2.2.3.1. Définition des règles et des Systèmes

- C'est l'ordre 76/04 en date du 20.02.1976 en matière de protection civile et de prévention, en particulier spécifique à cet ordre 76/04 relative aux règles applicables dans le domaine de la protection contre les dangers d'incendie et de panique, et la composition de la prévention des comités et de la protection civile.
- Journal officiel n ° 21 en date du 12.03.1976 concernant les règles de protection contre l'incendie et la panique, et la composition de la prévention des comités et de la protection civile.
- Décret 76/34 en date du 20.02.1976 concernant situations grave et inquiétante et malsaine.
- Décret 76/35, daté du 20.02.1976 comprend les règles de protection contre les dangers d'incendie et de panique dans les bâtiments avec la haute altitude
- Décret 76/36 en date du 20.02.1976 sur la défense contre les dangers d'incendie et de panique dans les établissements qui reçoivent du public.
- Décret 76/37 en date du 20.02.1976 relative à la protection des risques d'incendie et de panique dans les bâtiments résidentiels.
- Décret 76/38 en date du 20/02/1976 des comités sur la prévention et la protection.
- Décret 76/55 en date du 25/03/1976 qui définit la classification des matériaux et éléments de construction pour les dangers d'incendie des établissements.
- Décret 98/339 en date du 03.11.1998, qui ajuste la réglementation s'applique aux installations et définit une liste de fabricants.
- Décret 99/253 en date du 07.11.1999 pour assurer la formation de la Commission à réglementer la conduite des installations de protection et de contrôle fabriqués.
- Décret 66/198 en date du 27.05.2006 ajuste la réglementation applicable aux institutions, et la protection de l'environnement.

2.2.3.2. Classification des établissements recevant du public

Par rang ou la position :

Les établissements sont classés par la capacité de réception du public

- La première catégorie reçoit plus de 1500 personnes
- La deuxième catégorie reçoit 701 à 1500 personnes
- Troisième catégorie reçoit de 301 à 700 personnes
- La quatrième catégorie reçoit moins de 300 personnes

2.2.3.3. Les bâtiments d'habitation

Décret 76/37 en date du 20.02.1976 relative à la protection contre les dangers d'incendie et de panique dans les bâtiments d'habitation

2.2.3.4. Définition des bâtiments d'habitation

Les bâtiments sont réservés aux résidents seuls

2.2.3.5. Classification des bâtiments d'habitation

Les bâtiments d'habitation sont classés en quatre familles

A/1^{ère} famille: comprend les habitations individuelles: isolées ou jumelées et se compose de deux niveaux au plus sans compter les sous-sols

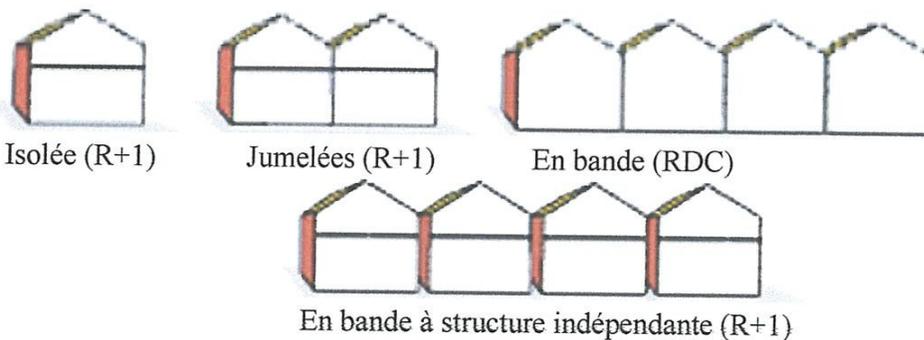


Figure 2-2: habitations individuelles (1^{ère} famille) [B]

B/2^{ème} famille: habitations individuelles ou jumelées et comprennent plus de deux niveaux, simples et regroupées, bâtiments résidentiels et la hauteur du bâtiment est moins de 8 mètres

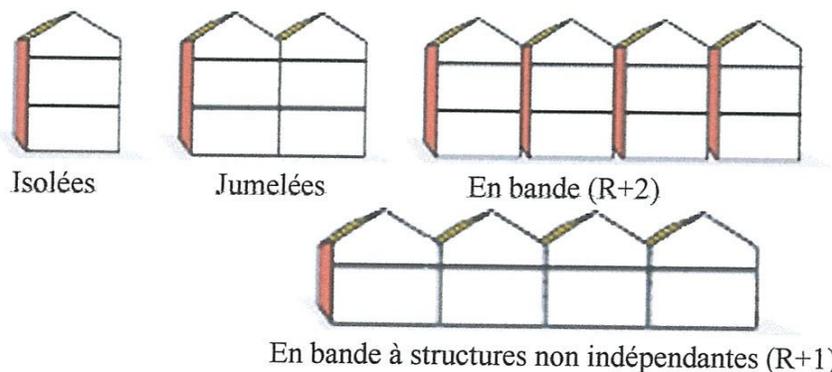


Figure 2-3: habitation individuelles (2^{ème} famille) [B]

C/3^{ème} famille: Logement n'est pas inclus dans l'arrangement précédent et comprend les bâtiments résidentiels, là où la hauteur est moins de 28 mètres

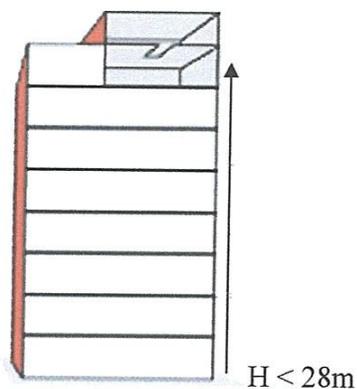


Figure2-4: immeuble collectif (3^{ème} famille) [3]

D/4^{ème} famille: Inclue les logements dont lequel la hauteur est plus de 28 mètres et ne dépasse pas 50 mètres.

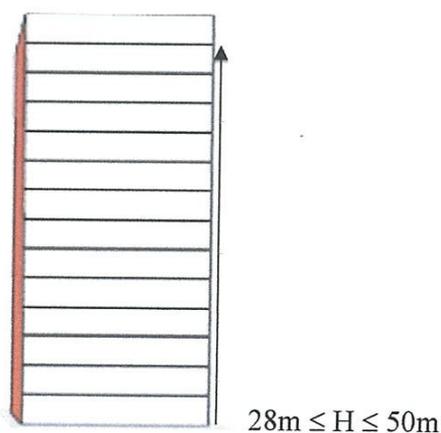


Figure2-5: immeubles collectifs (4^{ème} famille) [3]

2.2.3.6. Résistance au feu des bâtiments d'habitation

Les éléments	1 ^{ère} famille	2 ^{ème} famille	3 ^{ème} famille	4 ^{ème} famille
Les poteaux	SF ¼ h	SF ½ h	SF 1 h	SF 1 h ½
Les planchers	CF ¼ h	CF ½ h	CF 1 h	CF 1 h ½
Les isolations	CF ½ h	CF 1 h	CF 1 h ½	CF 1 h ½
Les murs intérieurs isolés	CF ¼ h	CF ½ h	CF ½ h	CF 1 h

Tableau 2-2 : la résistance au feu des éléments des structures

SF : stable au feu

CF : coupe feu

2.2.3.7. Les immeubles de grande hauteur IGH

- Décret 76/35 en date du 20.02.1976 contient les règles de protection contre les risques d'incendie et de panique dans les immeubles de grande hauteur

Définition

Les immeubles de grande hauteur dont la hauteur est de :

- Plus de 50 mètres pour les bâtiments d'habitation
- Plus de 28 mètres pour les autres bâtiments

Classification des immeubles de grande hauteur IGH

- Les bâtiments résidentiels d'une grande hauteur (GH_A)
- Bâtiments de grande hauteur pour les hôtels (GH₀)
- Bâtiments à grande hauteur pour archives privées (GH_S)
- Bâtiments à grande hauteur pour les établissements de santé (GH_U)
- Bâtiments avec grande hauteur pour les bureaux où la hauteur est plus de 28 mètres et moins de 50 mètres (GH_{W1})
- Bâtiments avec grande hauteur, pour les bureaux où la hauteur est plus de 50 mètres (GH_{W2})
- Bâtiments avec grande hauteur pour les fonctions différentes, la hauteur est plus de 28 mètres (GH_{vz}).

Les conditions et le site des Travaux

1- Ne permet pas la construction de bâtiments avec altitude élevée, mais dans les endroits éloignés des unités de protection civile et à une distance de plus de 3 km.

2- Les bâtiments ayant une haute altitude ne peuvent pas contenir les installations classées, afin d'éviter les risques d'incendie et d'explosion ainsi que des matières dangereuses et inflammables.

3- Doit contenir les bâtiments de haute altitude:

- Une source ou plusieurs sources d'aide pour la fourniture de l'électricité utilisable dans le cas d'un dysfonctionnement électrique et être indépendant de l'alimentation normale.
- Des moyens efficaces de pompes à incendie et lutte contre l'incendie et d'alarme
- Système d'aération efficace de ventilation et de désenfumage
- En cas d'incendie dans les bâtiments à haute altitude les ascenseurs restent fonctionnels
- Les bâtiments avec la haute altitude doivent être équipés de protection contre la foudre

4- Les chauffages dans les bâtiments avec la haute altitude sont interdits, sauf pour les chauffages à gaz

5- Stockage et utilisation des combustibles liquides. Solide ou gazeux est interdite à l'intérieur des bâtiments qui ont une hauteur élevée

6- L'entrée de bâtiments avec une altitude élevée ne devrait pas être autorisée loin de le passage des camions d'aide de la protection civile de plus de 30 mètres

2.2.4. Méthodes de calculs[8]

Le calcul des structures au feu implique d'une part, la prise en compte des actions thermiques et d'autre action mécanique et d'autre part, la vérification des éléments de construction selon les règles consignées dans les ENV 1992 à 1996 et dans l'ENV 1999.

En fonction de la représentation retenue pour les actions thermiques, les méthodes suivantes peuvent être distinguées :

- Les courbes température/temps nominales qui sont appliquées pendant un laps de temps donné et pour lesquelles les structures sont calculées en observant des règles prescriptives, y compris des données sous forme de valeurs tabulées, ou à l'aide de modèle de calcul ;
- Les courbes température/temps paramétrées, calculées sur la base de paramètres physiques et pour lesquels les structures sont calculées à l'aide de modèles de calcul.

La vérification peut se faire en termes de durée de résistance au feu, de résistance mécanique ou de température atteinte par le matériau considéré.

Par ailleurs, pour ce qui concerne le foyer d'incendie, il peut être noté que les compartiments doivent être conçus pour empêcher la propagation de feu à d'autres compartiments pendant le temps prévu d'exposition au feu et qu'en conséquence, le feu de calcul ne doit s'appliquer qu'à un compartiment en feu du bâtiment à la fois.

2.2.5. Chargement des structures[8]

2.2.5.1. Courbe d'élévation de température

Comme indiqué précédemment, les actions résultant d'un incendie sont définies dans la partie 2-2 de l'eurocode 1.

Trois courbes d'élévation de la température en fonction du temps sont définies dans cette norme expérimentale (figure 2-6) :

1. La courbe standard (courbe température/temps normalisée) :

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8t + 1),$$

2. La courbe de feu extérieur : $\theta_g = 20 + 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32t} = 0,313 \cdot e^{-3,6t})$,

3. La courbe hydrocarbure : $\theta_g = 20 + 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-3,167t} - e^{-2,5t})$

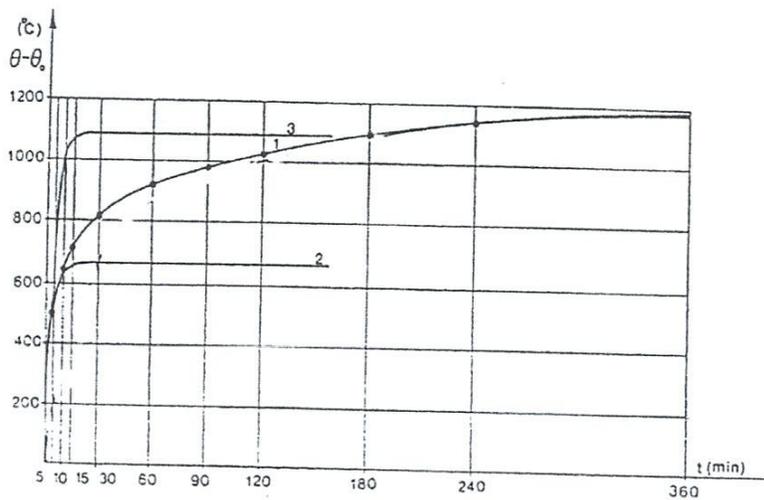
Avec

θ_g : température de gaz dans le compartiment en feu (en °C) ou température des gaz à proximité de l'élément, pour l'équation 2,

t : temps après le début de l'essai (en minutes)

Enfin, des actions résultant d'une exposition à un feu « paramétré » sont envisageables sur la base de paramètres physique prenant au moins en compte la densité de charge calorifique d'incendie (charge calorifiques par unité de surface) et les conditions de ventilation. L'annexe

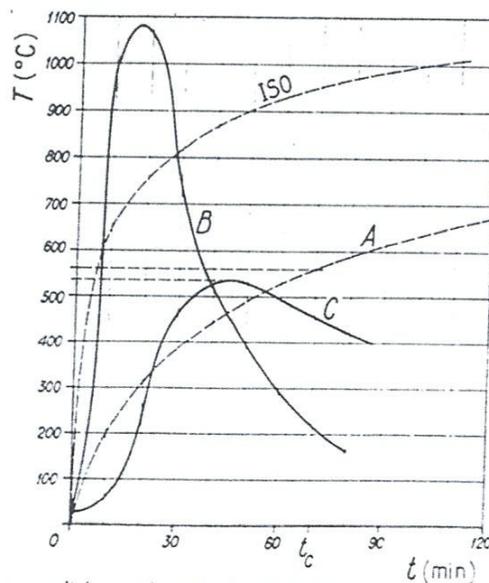
B (informative) de l'ENV 1991-2-2 fournit des courbes température/temps en phase de montée en température et en phase de refroidissement.



Légende : 1 - courbe ISO / 2 - courbe de feu extérieure / 3 - courbe hydrocarbure

Figure 2-6 : Courbe d'élévation de la température en fonction du temps

Une partie des propos susmentionnés sont illustrés sur le graphe reporté en figure 2-7. Ce document présente en effet l'évolution temporelle des températures, dans un local et sur un composant, en considérant d'une part, la courbe ISO et d'autre part, les enregistrements obtenus lors d'essais dits d'incendies naturels.



Légende : ISO : courbe normalisée (température ambiante du four)
 A : réponse de l'élément dans le four soumis à la courbe ISO
 B : courbe de température ambiante d'un incendie naturel
 C : réponse de l'élément dans l'essai d'incendie naturel

Figure 2-7 : Evolution des températures dans les essais (graphe extrait des « Technique de l'Ingénieur »)

La courbe de feu extérieur est une courbe plafonnée à une élévation de la température égale à $20+660^{\circ}$, c'est -à-dire à une température nettement inférieure à la courbe standard (Figure 2-6). Elle s'applique à la face externe des murs extérieurs à fonction séparative, susceptibles d'être exposé au feu à partir des différentes parties de la façade, c'est-à-dire directement de l'intérieur du compartiment se trouvant au-dessous ou à côté du mur concerné. Le courbe hydrocarbure augmente plus rapidement que la courbe standard. De plus, elle est plafonnée à $20 + 1080^{\circ}\text{C}$. Cette courbe est utilisée pour les feux de liquides de type hydrocarbures.

Un feu paramétrique est sensé reproduire les conditions plus réelles d'un incendie. L'allure de la courbe température /temps est ainsi déterminée à partir de modèle de feu et de paramètre physiques spécifiques définissant les conditions à l'intérieur d'un compartiment. Il convient de noter que cette courbe température/temps paramétrée n'est pas reprise, à l'heure actuelle, dans la norme expérimentale française.

La courbe température-temps ainsi définie, l'échauffement des éléments de structures peut être alors déterminé.

2.2.5.2 Calcul des éléments de structure au feu[9]

La NF P 92-701 (Règles FB) : DTU Feu Béton

Pour chaque élément de structure béton armé (poutres, poteaux, dalles, voiles, tirants etc.) considéré, il existe deux choix possibles :

1^{er} choix : effectuer un calcul à froid « classique » et utiliser les « Règles Forfaitaires » définies par le DTU feu béton, et qui permettent de ~~se~~ dispositions constructives à respecter : elles ont l'avantage de permettre un dimensionnement (ou des vérifications de dimensionnement) rapides.

2^{ème} choix : Effectuer le calcul « à chaud ». Cela permet d'optimiser le dimensionnement, mais sans logiciel, cela prend du temps. Le principe étant de déterminer la température du béton et des aciers sous l'action de l'incendie afin d'apprécier la chute des résistances, puis d'effectuer le calcul classiquement, en prenant en compte ces caractéristiques mécaniques dégradées de l'acier et du béton.

Combinaisons d'actions à considérer

Les combinaisons d'actions à considérer sont, à l'ELU, la combinaison accidentelle :

$$G + Q + 0,8*(W \text{ et/ou } S_n)$$

Et la combinaison pour vérification

$$G1 - 0,05G2 + 0,8Q + 0,8*(W \text{ et/ou } S_n)$$

Avec :

G, G1 : ensemble des charges permanentes

G2 : poids propre du plancher (on tient compte en fait de la perte d'eau du plancher à chaud)

G1 : ensemble des charges permanentes

Q : charge d'exploitation

Sn : neige normale (NV 65 mode 2000)

W : vent normal (1,2*le vent des règles NV65)

Au sujet de l'éclatement du béton. La valeur $G1-0,05G2$ correspond en fait à $(G1-G2)+0,95G2$. Car on diminue le poids propre du plancher concerné de 5% pour tenir compte de sa perte d'eau.

La résistance d'une section droite et justifiée en supprimant l'acier de plus grande capacité parmi ceux placés au voisinage du contour.

Cette vérification n'a pas à être faite pour les poutres comportant plus de huit barres à mi-travée, et pour les dalles.

2.2.6 Documents techniques : Défense extérieure contre l'incendie et Rétention[10]

2.2.6.1 Objet et domaine d'application

- Fournir une méthode permettant de dimensionner les volumes de rétention minimum des effluents liquides pollués afin de limiter les risques de pollution pouvant survenir après un incendie.
- Définir les caractéristiques de rétention.

2.2.6.2 Principe de la méthode

Principes

Les éléments suivants sont à prendre en compte dans le calcul des volumes de rétention :

- Volumes d'eau nécessaires pour les services extérieurs de lutte contre l'incendie ;
- Volumes d'eau nécessaires aux moyens de lutte intérieure contre l'incendie ;
- Volume d'eau lié aux intempéries
- Volumes des liquides inflammables et non inflammables présents dans la cellule la plus défavorable.

2.2.6.3 La prise en compte des volumes d'eau d'extinction

Volume d'eau nécessaire à la lutte extérieure contre l'incendie

Le volume d'eau nécessaire à la lutte extérieure contre l'incendie à prendre en compte, pour le dimensionnement de la rétention, est celui défini à partir du document D9.

Si pour des raisons particulières, le volume d'eau déterminé par la méthode du document D9 est différent de celui retenu pour la défense extérieure contre l'incendie, le volume à prendre en compte sera ce dernier.

Le document D9 (défense extérieure contre l'incendie : guide pratique pour le dimensionnement des besoins en eau) définit, par type de risque, une méthode permettant de dimensionner les besoins en eau minimum nécessaires à l'intervention des services de secours. Le document D9 précise que les risques classés RS (Risques Spéciaux) nécessitent une étude spécifique pour définir, au préalable, le volume d'eau d'extinction.

Le débit requis est exprimé en m^3/h pour une durée minimale théorique d'application de 2 heures, ce qui permet d'avoir immédiatement le volume d'eau minimum susceptible d'être utilisé.

2.3 Le risque incendie

2.3.1 Risque[1]

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.

2.3.1.1 Origine et causes[15]

De nombreuses causes peuvent être à l'origine de la naissance d'un incendie. La plupart du temps, il s'agit de défauts de type court-circuit. Dans la Figure ci-dessous, on peut aussi remarquer que la foudre entraîne un très grand nombre de sinistres. (Source Institut National de Recherche et de Sécurité - INRS 2006)

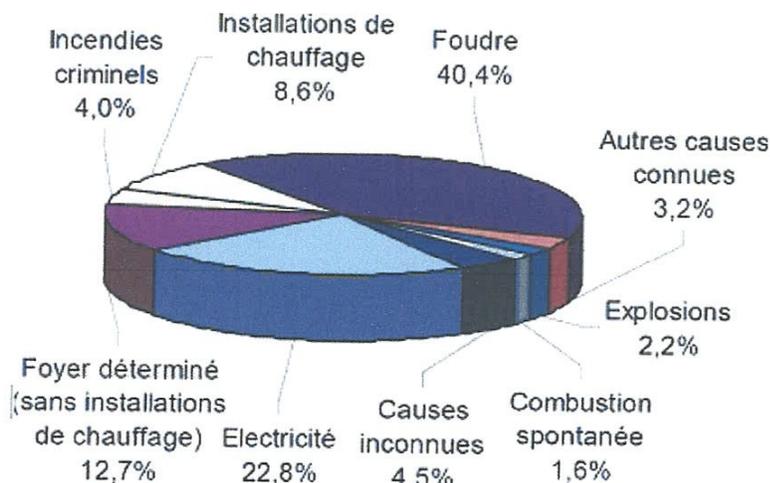


Figure 2-8 : Les principales causes d'incendie dans les bâtiments

Les sources d'inflammation sont de natures variées :

- Thermique (surfaces chaudes, appareils de chauffage, flammes nues, travaux par point chaud...) : Une flamme nue constitue une source d'inflammation active. Les travaux

par points chauds (soudage au chalumeau, oxycoupage...) sont une source majeure de sinistres dans l'industrie. Dans les habitations une grande partie des incendies se déclare dans la cuisine (un quart selon [protectionincendie.com, 2003]2)

- Electrique (étincelles, échauffement...) : La vétusté, des installations non réalisées dans les règles de l'art ou les surcharges électriques peuvent entraîner des échauffements à l'origine de bon nombre de départs d'incendie;
- Electrostatique (décharges par étincelles, ...) : L'électricité statique est une cause indirecte d'incendies. En effet, elle peut provoquer des étincelles qui interviennent comme apport d'énergie d'activation ;
- Mécanique (étincelles, échauffement...) : Les échauffements et les étincelles d'origine mécanique, résultant de la friction, de choc et d'abrasion, ou de défaillances (roulements, paliers...) peuvent être à l'origine de températures parfois très élevées ;
- Climatique (foudre, soleil...) : Un impact de foudre peut constituer une source d'inflammation directe ou à distance en induisant des surtensions ou des échauffements dans les équipements. L'AEAI (Association des établissements cantonaux d'assurance incendie, Suisse) relève que 40% des sinistres sont dues à la foudre ;
- Chimique (réactions exothermiques, auto-échauffement, emballement de réaction...);
- Bactériologique : La fermentation bactérienne peut échauffer le milieu et le placer dans des conditions d'amorçage d'un auto-échauffement ;

Il est toutefois nécessaire d'ajouter que, comme on l'a vu précédemment, il faut non seulement une source d'énergie, mais aussi de l'oxygène et la présence de produits combustibles pour déclarer un incendie.

La propagation de feu[4]

Se fait par l'inflammation des cibles exposées à la chaleur du Premier foyer lorsque celle-ci atteignent à leur tour la température d'allumage. Au cours de cette phase les matériaux de revêtement des murs et des plafonds sont les plus exposés et participent au développement du feu selon leur degré d'inflammabilité.

L'embrasement généralisé d'un local correspond à un régime stationnaire de combustion, qui ne dépend plus que la quantité de combustion et de la dimension des ouvertures. Tous les matériaux thermo dégradable présents entrent en combustion on les flux thermique engendré deviennent dangereux, à la fois pour les personne et pour les biens matériels.

Mode de propagation[11]

Un incendie réel passe par quatre phases :

Première phase « Démarrage du feu »

La rapidité de démarrage d'un incendie sera fonction du combustible en cause, de sa forme, de la ventilation du lieu et du type de source d'allumage.

Durant la phase de feu couvant, la température est localisée au point d'ignition ; les premiers gaz et la fumée apparaissent.

Deuxième phase « Déclenchement de l'incendie »

Au cours de la deuxième phase, où le foyer est vif mais encore localisé, le rayonnement ou le contact des flammes atteints les matières proches, les gaz chauds se dégagent et emplissent le volume, annonçant la troisième phase.

Troisième phase « Embrassement généralisé »

Les gaz chauds accumulés portent les combustibles présents à leur température d'inflammation et l'ensemble du volume s'embrase brutalement (flash-over).

L'incendie atteint son point maximal. La présence de gaz inflammables peut également provoquer des déflagrations plus ou moins violentes.

Quatrième phase « Retombée du feu »

La violence du feu décroît avec la disparition progressive du combustible.

Selon le mode d'inflammation et la nature du combustible, le développement sera plus ou moins rapide.

La sévérité du feu et la durée de ces phases dépendent de plusieurs paramètres :

- quantité et répartition des matériaux combustibles (charge incendie) ;
- vitesse de combustion de ces matériaux ;
- conditions de ventilation (ouvertures) ;
- géométrie du compartiment ;
- propriétés thermiques des parois du compartiment.
- mesures actives de lutte contre l'incendie

2.3.1.2. Types et modélisation d'incendies[11]

Incendie conventionnel (ou normalisé)

Le feu conventionnel est caractérisé par une température ambiante qui augmente de façon continue avec le temps, mais à un taux décroissant[12]

Incendie extérieur

Lorsque l'on examine la résistance au feu d'une structure extérieure, et lorsque les températures ambiantes sont donc probablement inférieures à tout moment donné (ce qui signifie que les températures des matériaux du bâtiment seront plus proches des températures d'incendie correspondantes), on peut utiliser une courbe d'"Incendie extérieur".

La courbe de feu extérieur est une courbe plafonnée à une élévation de la température égale à $20 + 660^{\circ}\text{C}$, c'est-à-dire à une température nettement inférieure à la courbe standard (voir figure 2-9). Elle s'applique à la face externe des murs extérieurs à fonction séparative, susceptibles d'être exposés au feu à partir de différentes parties de la façade, c'est-à-dire directement de l'intérieur du compartiment en feu concerné ou d'un compartiment se trouvant au-dessous ou à côté du mur concerné [12].

Incendie hydrocarbure

Pour les cas où un stockage d'hydrocarbures rend les incendies extrêmement sévères, une courbe "Incendie hydrocarbure" est également donnée. Le courbe hydrocarbure augmente plus rapidement que la courbe standard. De plus, elle est plafonnée à $20 + 1080^{\circ}\text{C}$. Cette courbe est utilisée pour les feux de liquides de type hydrocarbures [12].

Incendie paramétrique

Un feu paramétrique est sensé reproduire les conditions plus réelles d'un incendie. L'allure de la courbe température/temps est ainsi déterminée à partir de modèles de feu et de paramètres physiques spécifiques définissant les conditions à l'intérieur d'un compartiment. Cela permet une modélisation assez simple des températures d'incendie dans les phases d'échauffement et de refroidissement de l'incendie post-embrasement généralisé (la phase de naissance initiale n'est pas concernée), et de la durée à l'issue de laquelle la température maximum est atteinte [12].

Ces trois courbes d'incendies "nominaux" sont illustrées à la figure 2-9.

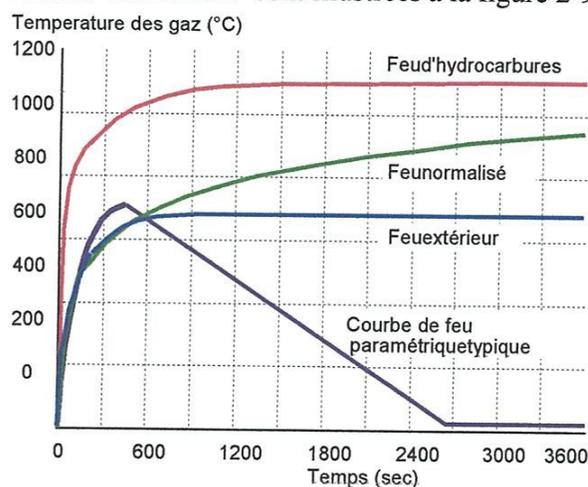


Figure 2-9 : Courbes d'incendies nominaux [13].

Incendie réel

Le développement d'un feu réel n'est jamais identique à celui de l'incendie conventionnel défini par la courbe ISO 834, où la température augmente indéfiniment dans le temps (voir figure 2-10).

En effet, lors d'un incendie réel, la température finit par décroître lorsque le combustible est consommé à environ 70 %. En outre, les mesures actives et l'intervention des services de

secours réduiront les violences du feu tandis que les mesures passives en limiteront la propagation.

Un incendie (feu) réel dans un bâtiment se développe et décroît en fonction de l'équilibre de masse et d'énergie existant dans le compartiment où il se produit (figure 2-10). L'énergie produite dépend de la quantité et du type de combustible disponible et des conditions de ventilation [12].

Les caractéristiques d'un incendie réel sont montrées sur la figure 2-10.

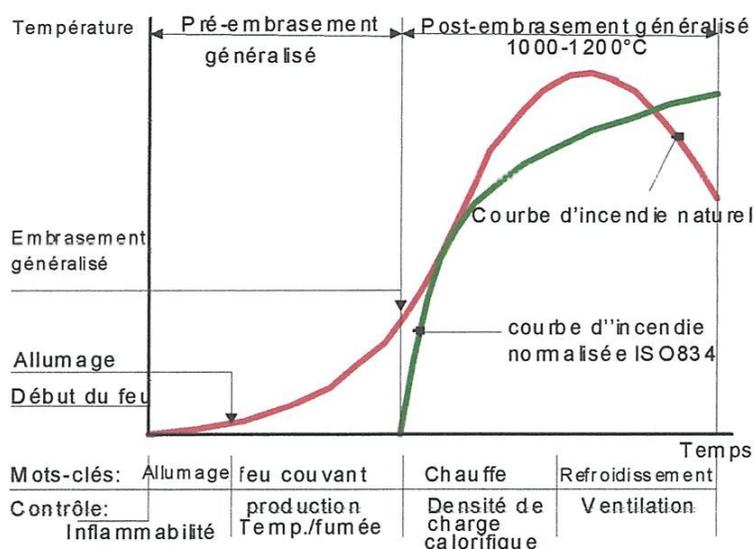


Figure 2-10 : Phases d'un incendie naturel, en comparant les températures ambiantes à la courbe d'incendie conventionnel ISO 834 [13].

2.3.2 Prévention et Protection [11]

Le risque d'incendie existera toujours puisqu'il est impossible de n'utiliser que des produits incombustibles dans les bâtiments. Aussi, le respect et la mise en place d'un ensemble de mesures de prévention adéquates et leur prise en compte dans la conception du bâtiment sont essentiels pour limiter et maîtriser le risque incendie [12].

2.3.2.1 Protection active

Les protections initiales sont dites « actives » lorsqu'elles mettent en œuvre des dispositifs dynamiques (détection, alarmes, désenfumage, sprinklers) ou font intervenir l'action humaine pour éteindre le début d'incendie (robinet d'incendie armé ou RIA). Elles ont pour objectif premier de permettre l'évacuation des personnes dans les meilleurs délais et de faciliter l'intervention rapide des secours.

Le feu doit être détecté au plus tôt pour être combattu efficacement. L'ensemble des protections actives doit être efficace dans les deux premières phases de développement du sinistre.

Quelques dispositifs de protection active [12]:

- les détecteurs, réagissant à la fumée, à la chaleur, ou aux flammes, déclenchent une alarme sonore et la mise en œuvre de certains équipements ;
- les consignes de sécurité et le balisage favorisent l'évacuation des occupants ;
- le système de désenfumage évacue les fumées toxiques, facilitant l'évacuation des occupants sans dommages et l'intervention des secours ;
- les moyens de lutte, extincteurs ou RIA, permettent l'attaque immédiate du feu ;
- les sprinklers, réseau d'extinction automatique, attaquent sans délai le feu naissant.

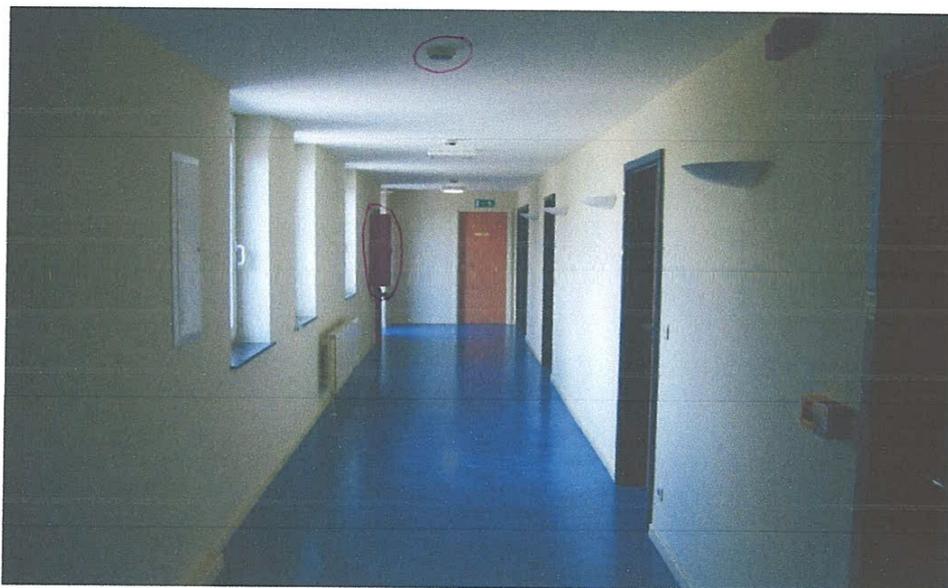


Figure2-11 : Dans ce couloir bon nombre d'éléments de protection active sont présents : dispositif d'alerte, dévidoir, panneau de signalisation, détecteur de fumées, éclairage de secours[1]

2.3.2.2 Protection passive[11]

La protection passive regroupe les moyens mis en œuvre pour limiter les effets destructeurs du feu – résistance au feu, matériaux ou dispositifs coupe-feu et pare-flammes, emploi de matériaux avec différentes réactions ou résistances au feu.

La stabilité au feu d'un bâtiment, spécifiée dans la réglementation, ne représente pas la valeur réelle de tenue au feu de l'ouvrage, mais un temps de référence sous feu conventionnel. Elle s'exprime en heures et en fractions d'heures [12].

2.3.2.3 Comportement humain[1]

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 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 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 : pour les protections passives, 1/9 pour les protections actives et 2/9 pour le comportement des occupants et des responsables dès 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.

2.3.2.4 Mesures de protection[11]

La résistance au feu des structures peut être accrue en augmentant les dimensions des éléments structuraux (surdimensionnement de la structure), en entourant l'élément d'un isolant à faible inertie thermique ou en protégeant tout l'ensemble ou toute la structure d'une membrane isolante.

Le type de protection convenant le mieux à un ensemble donné dépend principalement du type de matériaux utilisés dans sa construction puisque chaque matériau se comporte différemment lorsqu'il est exposé à des températures élevées [12]

Béton

Les ensembles en béton armé et précontraint sont rarement protégés extérieurement car le béton est normalement constitué de matériaux inorganiques dont la conductivité et la capacité thermique sont faibles (le béton est un bon isolant).

Toutefois, le béton perdant graduellement sa résistance à la compression à mesure que les températures augmentent, il faut s'assurer que les éléments ont été calculés avec une résistance de réserve suffisante pour supporter les charges appliquées pendant toute la durée d'exposition au feu prévue.

Il est également important de s'assurer que l'armature d'acier noyée dans le béton est suffisamment isolée car l'acier subit une réduction considérable de sa résistance à la traction à des températures élevées. Le béton étant un assez bon isolant, il ne faut pas un recouvrement très épais pour maintenir la température de l'armature au-dessous des seuils critiques.

Acier

L'acier, comme le béton, a l'avantage d'être incombustible. Cependant, cette seule caractéristique n'a que peu de signification lorsqu'il s'agit d'empêcher l'effondrement.

Pour améliorer le comportement au feu de structure en acier, la mise en place d'isolants de surface est envisageable. Couramment, des isolants du type fibres minérales, mortiers à base

de vermiculite, enduits au plâtre sont projetés sur les éléments de structure à protéger (profils d'ossature et sous-face de planchers). D'autres isolants se présentent sous forme d'éléments préfabriqués, assemblés en caisson autour des éléments à protéger : il s'agit principalement de plaques ou de coquilles à base de plâtre, de vermiculite, de laine de verre, ... La mise en place de ces protections doit intégrer le risque de déplacement par la pression produite par un incendie.

De façon identique aux éléments en bois, la protection peut être faite en utilisant des peintures (épaisseur de l'ordre du millimètre) ou des enduits intumescents (épaisseur de plusieurs millimètres). Ces enduits gonflent sous l'action de la chaleur (entre 180 et 300 °C) et forment une couche isolante autour de l'élément à protéger.

De plus, la protection au feu de poteaux en profils creux peut être réalisée en remplissant ces derniers de béton, qu'il participe ou non à la résistance du poteau à température ordinaire. De même, le refroidissement par l'eau sous forme d'irrigation intérieure peut être envisagé, ce dispositif nécessitant une mise en charge du système permanent ou seulement au moment de l'incendie, avec circulation par gravité ou mécanique, et un entretien de l'installation.

Chapitre 03



Mécanismes thermiques, actions et les matériaux

3.1. Mécanismes thermiques

3.1.1 Généralité sur les transferts de chaleur

3.1.1.1. Introduction

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre.

La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) L'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

3.1.1.2. Définitions

Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x,y,z,t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :

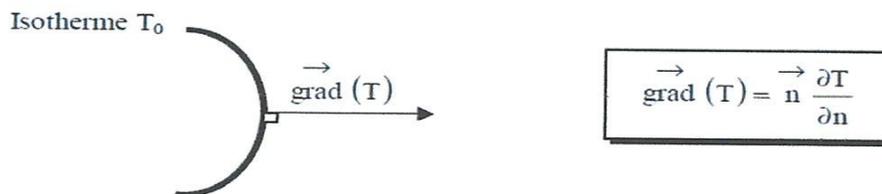


Figure 3-1 : isotherme et gradient thermique

Avec :

\vec{n} : vecteur unitaire de la normale

$\frac{\partial T}{\partial n}$: Dérivée de la température le long de la normale.

Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de températures hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\phi = \frac{1}{s} \frac{dQ}{dt}$$

Où S est l'aire de la surface (m²).

On appelle flux de la chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\varphi = \frac{dQ}{dt}$$

3.1.2. Mécanismes de transfert de la chaleur

3.1.2.1. Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \vec{\text{grad}}(T)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}$$

Avec :

φ Flux de chaleur transmis par conduction (W)

λ Conductivité thermique du milieu (W m⁻¹ °C⁻¹)

X Variable d'espace dans la direction du flux (m)

S Aire de la section de passage du flux de chaleur (m²)

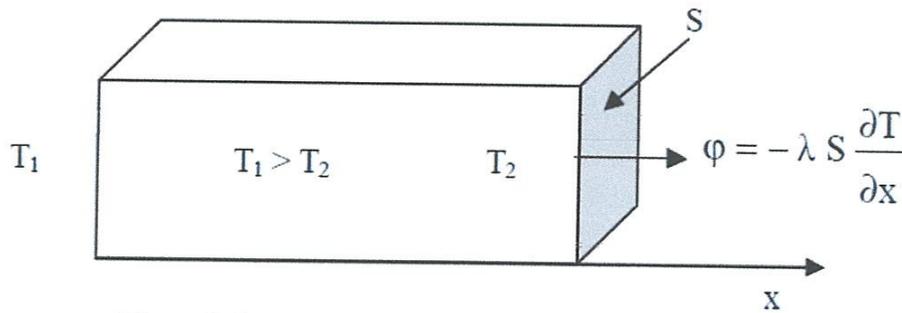


Figure 3-2: Schéma du transfert de chaleur conductif

On trouvera dans le tableau 3-1 les valeurs de la conductivité thermique λ de certains matériaux parmi les plus courants.

Matériau	λ (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	Matériau	λ (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)
Argent	419	Plâtre	0,48
Cuivre	386	Amiante	0,16
Aluminium	204	Bois (feuillu-résineux)	0,12-0,23
Acier doux	45	Liège	0,044-0,049
Acier inox	15	Laine de roche	0,038-0,041
Glace	1,88	Laine de verre	0,035-0,051
Béton	1,4	Polystyrène expansé	0,036-0,047
Brique terre cuite	1,1	Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045
Verre	1,0	Polystyrène extrudé	0,028
Eau	0,60	Air	0,026

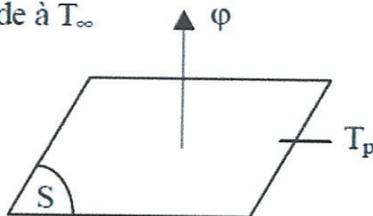
Tableau 3-1 : Conductivité thermique de certains matériaux

3.1.2.2. Convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

Fluide à T_{∞}



$$\varphi = h S (T_p - T_{\infty})$$

Figure 3-3 : Schéma du transfert de chaleur convectif

Avec :

φ Flux de chaleur transmis par convection (W)

h Coefficient de transfert de chaleur par convection (W m⁻² °C⁻¹)

T_p Température de surface du solide (°C)

T_{∞} Température du fluide loin de la surface du solide (°C)

S Aire de la surface de contact solide/fluide (m²)

Remarque : La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

3.1.2.3 Rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation :

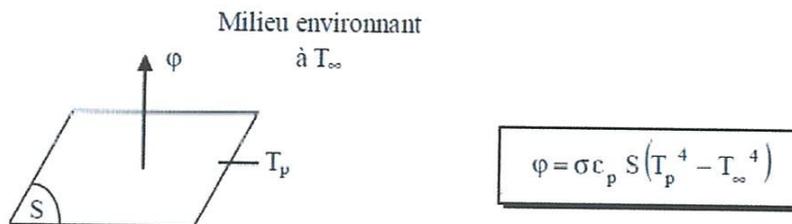


Figure 3-4 : Schéma du transfert de chaleur radiatif

Avec :

φ Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

s Constante de Stefan (5,67.10⁻⁸ W m⁻² K⁻⁴)

ε_p Facteur d'émission de la surface

T_p Température de la surface (K)

T_∞ Température du milieu environnant la surface (K)

S Aire de la surface (m²)

3.1.3. Influence de la charge combustible et de la ventilation

Le développement d'un incendie est lié à deux paramètres principaux : l'importance de la charge combustible contenue dans le local en feu et la surface des ouvertures du local sur l'extérieur.

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

Si l'alimentation en air est suffisante, ce qui entraîne un feu contrôlé par le combustible, ce sont l'importance et la disposition de la charge incendie (combustible) qui exerce une influence décisive sur la sévérité du feu [10].

3.1.3.1. 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**

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

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.

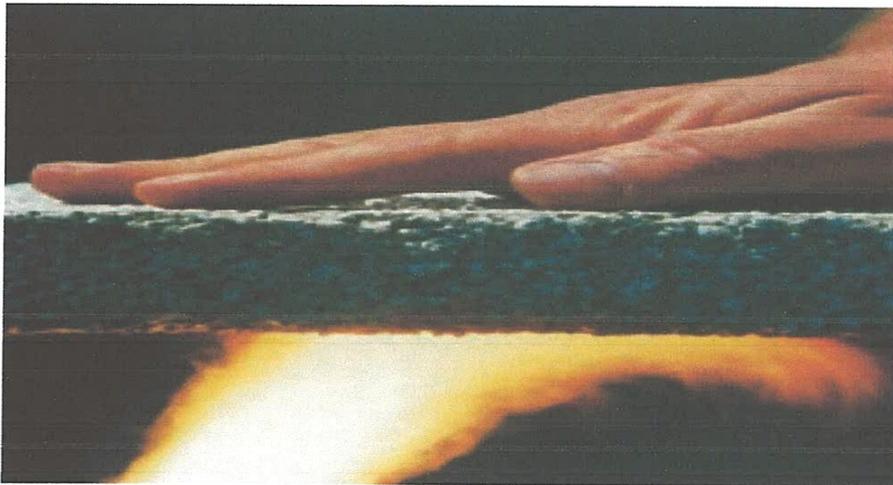
Si une face des parois est soumise à une variation brusque de température T , maintenue ensuite pendant un temps t , la quantité totale de chaleur Q absorbée par la paroi répond à l'équation :

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

La **diffusivité thermique**

$$a = \lambda / (\rho \cdot c)$$

Est quant à elle une mesure de la vitesse à laquelle la température évolue dans le matériau. Plus elle est grande, plus le matériau s'échauffe rapidement.



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 :

$$L_{\text{diff}} = (a \cdot t)^{0,5}$$

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

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 $\text{Eff} = (\lambda \cdot \rho \cdot c)^{0,5}$ élevée, associée à la massivité des éléments en béton, qui se révèle particulièrement favorable dans l'évolution des **températures des gaz** (retardement du flash over). 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 $a = \lambda / (\rho \cdot c)$ 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.

3.1.3.2. 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.

3.2. Actions[1]

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

La présentation des actions thermiques 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 des bâtiments qui le choisit de ne pas s'encombrer des 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 réaction des charges au feu n'aient pas été appliqués pour tenir compte des sécurités actives.

3.2.1. Les actions mécaniques[1]

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.

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
 Ad = 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 ni 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.

3.2.2. Les différents modèles de l'action thermique[1]

Il y a plusieurs façons de modéliser l'incendie 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 (computationnel fluide dynamiques) ;

Et enfin les modèles des 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.

Courbes nominales[1]

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 dépendants est le temps ;
- Il n'y a pas de phase de refroidissement.

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

Courbes paramétriques[1]

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 pré dimensionnement, car elles sont parfois in sécuritaires. 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.

Modèles de zone[1]

Ces modèles utilisent les paramètres développés :

a. Modèles à une zone[24]

(1) Il convient d'appliquer un modèle une zone dans des conditions post-embrassement généralisé. La température, la densité, l'énergie interne et la pression du gaz sont supposées homogènes dans le compartiment.

(2) Il convient de calculer la température en prenant en compte:

- la résolution des équations de conservation de masse et de conservation d'énergie;
- l'échange de masse entre le gaz intérieur, l'air extérieur (par les ouvertures) et le feu (vitesse de pyrolyse);
- l'échange d'énergie entre le feu, le gaz interne, les murs et les ouvertures.

(3) La loi des gaz parfaits à prendre en compte. Un exemple en est donné à la figure ci-après

Température des Gaz $\rho = 0.04 \text{ m}^3/\text{kg}$, Aire-sol = 100 m^2

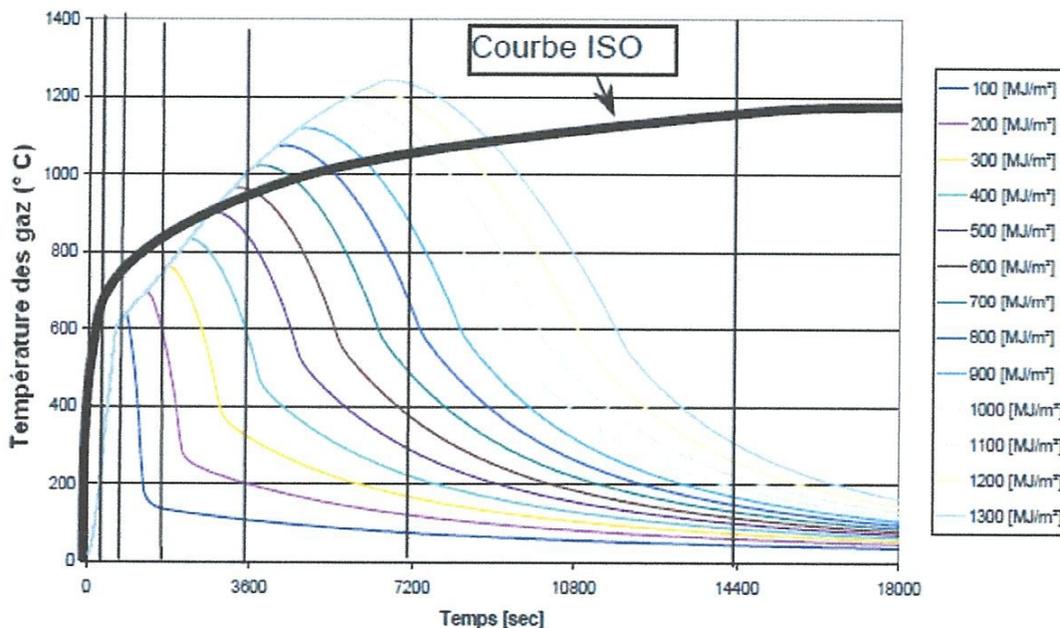


Figure 3-5 : exemple de courbe obtenue par un modèle de zone pour différentes charges au feu de calcul qfd pour un compartiment de $10\text{m} \times 10\text{m} \times 3\text{m}(=h)$ avec des parois de 12 cm de béton recouvertes de $1,5 \text{ cm}$ de plâtre [1]

(4) Le bilan massique des gaz du compartiment s'écrit comme suit: $[\text{kg}/\text{s}]$. Où : $(D.2)$ est le débit massique des gaz dans le compartiment; est le débit massique des gaz sortant par les ouvertures; est le débit massique des gaz entrant par les ouvertures; est le débit massique des produits issus de la pyrolyse.

(5) Le débit massique des gaz et le débit de pyrolyse peuvent être considérés comme négligeables. Par conséquent... (D.3) Ces débits massiques peuvent être calculés à partir de la pression statique due aux différences de densité entre l'air à température ambiante et à température élevée.

(6) Le bilan énergétique des gaz dans le compartiment peut être considéré.

b. Modèles deux zones[24]

(1) Un modèle deux zones repose sur l'hypothèse que les produits de combustion s'accumulent en une couche sous le plafond, avec une interface horizontale. Différentes zones sont définies: la couche supérieure, la couche inférieure, le feu et son panache, l'air extérieur et les murs.

(2) Dans la couche supérieure, les caractéristiques du gaz sont supposées uniformes.

(3) Les échanges de masse, d'énergie, et de substance chimique peuvent être calculés entre ces différentes zones.

(4) Dans un compartiment donné dont la charge calorifique est répartie de façon uniforme, un modèle deux zones peut devenir un modèle une zone dans l'une des situations suivantes: —si la température du gaz de la couche supérieure dépasse 500°C; —si la couche supérieure est telle qu'elle occupe 80% de la hauteur du compartiment.

c. Modèles de feu localisé[22]

Dans un feu localisé, il y a accumulation de produits combustibles dans une couche sous le plafond (couche supérieure), avec une interface horizontal entre cette couche chaude et la couche inférieure où la température des gaz demeure beaucoup plus basse.

Cette situation est bien représentée par un modèle à deux zones, utilisé dans toutes les situations de pré-flash over. En plus du calcul de l'évaluation de la température des gaz, ces modèles sont utilisés pour connaître la propagation des fumées dans les bâtiments et pour estimer la sécurité des personnes en fonction de la couche de fumée, de la concentration des gaz toxiques, du flux radiatif et de la densité optique.

L'action thermique sur les éléments horizontaux situés au-dessus du feu dépend également de leur distance par rapport au foyer. Elle peut être estimée par des modèles spécifiques déterminant l'évaluation de l'effet local sur les éléments adjacents, comme la méthode d'Helke stade ou d'Ha semi.

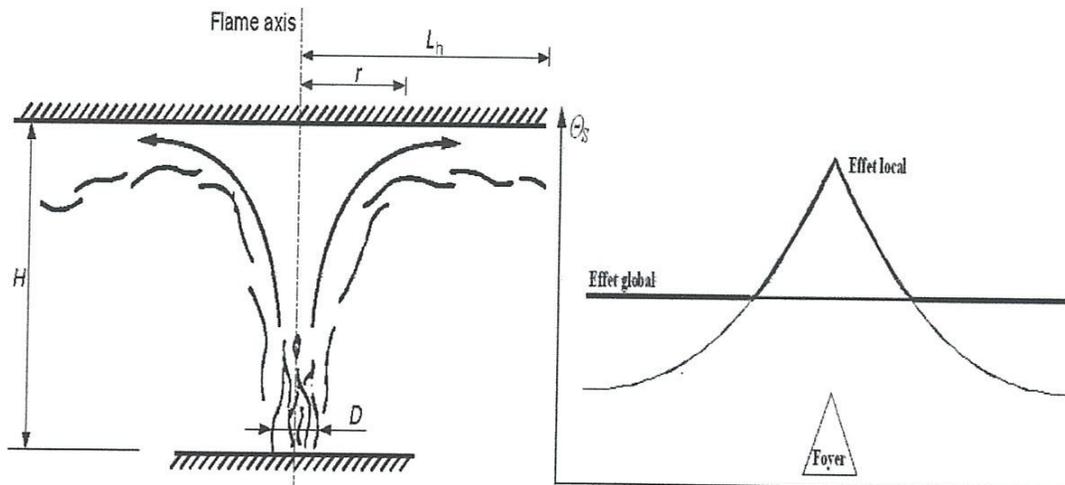


Figure 3-6 : Feu localisé : modèle d'Hasemi [1]

d. Modèles de CFD [23]

CFD signifie contrats financiers pour différences. Les CFD appartiennent à la famille des produits dérivés. Ce sont des instruments financiers modernes qui permettent de tarder les actions, les incendies et les matières premières (comme l'or ou le pétrole) des manières simple et peu onéreuse.

Quelle courbe choisir ? [1]

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'écoulement des ouvrages en cas d'incendie : un feu ISO de 2 heures dans des habitations, des bureaux ou tout autre bâtiment, avec une courbe ISO 42 densité de charge calorifique inférieure, est plus sévère qu'un feu calculé avec des courbes paramétrique ou des modèles de zone. L'usage de ces courbes est développé plus loin dans le cadre du dimensionnement par le « Fire Safety Engineering ».

Pour les bâtiments administratifs (USA, Allemagne, France, Pays-Bas) les charges d'incendie sont de 50 kg/m^2 , et dans 95% des cas, inférieures à 90 kg/m^2 .

Type de bâtiment	Densité de charge calorifique moyenne (kg de bois/m ²)	Densité de charge calorifique maximale (kg de bois/m ²)
Logement	15	35
Ecoles	15	50
Hôpitaux	20	50

Tableau 3-2 : La densité de charge calorifique moyenne et maximale selon le type de bâtiment.

Certaines différences notoires forcent prudence. En Belgique une analyse plus précise conforte les chiffres les plus récents. Les catégories bureaux, 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 40kg 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 60kg/m². Un dépassement de la charge d'incendie ou bien des conditions de ventilation défavorables généreront un risque élevé d'effondrements 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 charge d'incendie élevé. 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.

3.3. Les matériaux

3.3.1. Introduction[11]

Les deux matériaux de base utilisés pour les structures mixtes sont respectivement l'acier de construction et le béton de masse volumique normale. Il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance de leurs propriétés mécaniques aux températures élevées.

3.3.2. Evolution des caractéristiques de béton

3.3.2.1. Propriétés mécaniques

Le béton est un matériau qui s'endommage sous l'effet de la température, il subit de fortes modifications physico-chimiques qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques avec la température. La déshydratation, les réactions de transformation, la pression dans les pores, la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats engendrent des effets importants sur la résistance de béton à haute température.[16]

Résistance à chaud

Tous les auteurs s'accordent sur le fait que la résistance en compression du béton varie en fonction de la température à laquelle il est exposé ou a été exposé. Des comportements différents peuvent être observés selon que les essais sont effectués au cours de chauffage ou après refroidissement.[16]

Résistance en compression à chaud[16]

La résistance en compression à chaud dépend de la composition du béton, de la nature de ses constituants, de son âge, de sa teneur en eau, des formes et dimension des pièces, du fait qu'il est chargé à chaud ou non.

De manière globale, la résistance en compression du béton baisse légèrement de 15 à 20% de la résistance à la température ambiante causée par le départ d'eau libre contenue dans le béton. En dépassant 120°, on constate une augmentation à la résistance en compression, ceci peut être expliqué par l'augmentation du processus de séchage. Le départ d'eau absorbée provoque accroissement des forces de surface entre les particules de gel qui assurent la résistance de la pâte de ciment.

Après 300°C, le béton est complètement sec, on constate une rapide dégradation des propriétés mécaniques du béton. Cette diminution de résistance peut être attribuée à une modification de structure de béton conséquence des différences de coefficient d'expansion thermique des différents constituants.

Après 400°C, la dégradation du béton peut être liée à la dissociation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Entre 400°C et 600°C, la résistance en compression diminue encore plus rapidement.

Entre 600°C et 700°C, la vitesse de perte de résistance diminue. Attribuent cela à la calcination des granulats calcaires utilisés qui peut intervenir à partir de 600°C.

A 800°C la résistance du béton chauffé est de l'ordre de 30% de la résistance à température ambiante.

La figure 3-7 montre l'évolution de la résistance à la compression à chaud

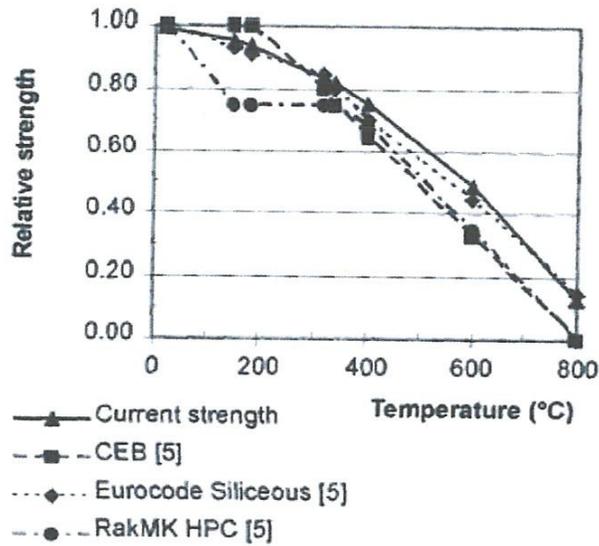


Figure 3-7 : la résistance de compression à chaud

Résistance en traction[17]

La plupart des résultats expérimentaux montrent une diminution immédiate et continue de la résistance à la traction avec la température.

Malheureusement, ces résultats sont peu nombreux et très différents, de sorte qu'il est raisonnable, en l'absence de meilleures informations.

A noter cependant que la vitesse d'échauffement ne semble pas influencer la décroissance de la résistance à la traction, ainsi que le fait apparaître sur la figure 3-8 : au cours des essais conduisant à la courbe(1), l'échantillon n'était pas protégé, tandis que durant ceux conduisant aux courbes(2) et (3), il était protégé par 5 et 10 mm de laine minérale respectivement.

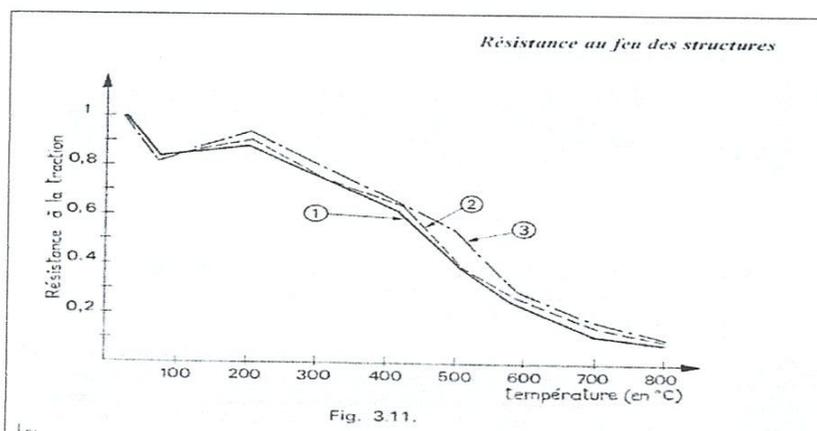


Figure 3-8 : La résistance en traction

Module d'élasticité[17]

La disparition de l'eau contenue dans le béton, phase incompressible, entraîne une chute assez rapide des modules d'élasticité longitudinale et transversale du béton, après une première

phase (0 à 150 °C environ) durant laquelle on assiste parfois à une légère augmentation de E. ce comportement est comparable à celui de la résistance à la compression : il existe en effet à froid de nombreuses relations empiriques entre ces deux caractéristiques ; il est donc logique de les retrouver à chaud. Les résultats expérimentaux montrent cependant que l'augmentation initiale du module d'élasticité longitudinale E est beaucoup plus faible que celle de la résistance à la compression : 1 à 5 % seulement contre 25% parfois.

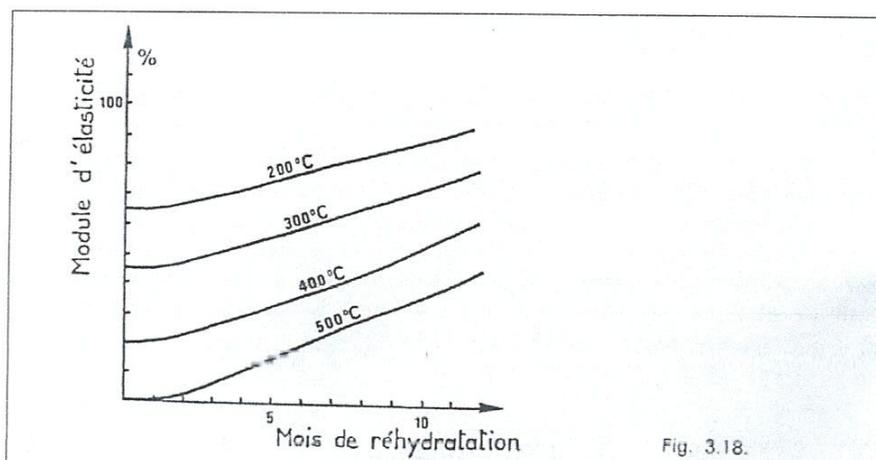


Fig. 3.18.

Figure 3-9 : module d'élasticité

La mesure de E se fait de plusieurs façons : outre les mesures directes sur éprouvettes cylindriques, on utilise une méthode indirecte consistant à solliciter en compression une poutre et à mesurer, à l'aide d'un appareil optique, les déplacements angulaires entre deux points prédéterminés.

Après l'incendie, le béton a perdu une bonne part de sa résistance, et son module d'Young est considérablement réduit.

Résistances résiduelles

a. Effet de refroidissement[16]

Des études ont montrées que les éprouvettes subissant un refroidissement présentent des résistances différentes que celles mesurées à chaud. Ce qui est montré dans la figure 3-10.

Le fait de refroidir le matériau, peut entraîner l'apparition d'une fissuration supplémentaire et une ré-humidification provoquant la réhydratation du gel mais aussi la réaction de la CaO avec l'eau présente dans l'environnement endommageant d'avantage la structure du béton. Après un temps défini qui suit le cycle de chauffe. Il a été rapporté que le béton est capable de récupérer une partie de sa résistance. Ce phénomène d'autoréparation des bétons peut s'expliquer par la réhydratation des grains de ciment non hydratés présent dans les bétons caractérisés par un rapport E/C très faible

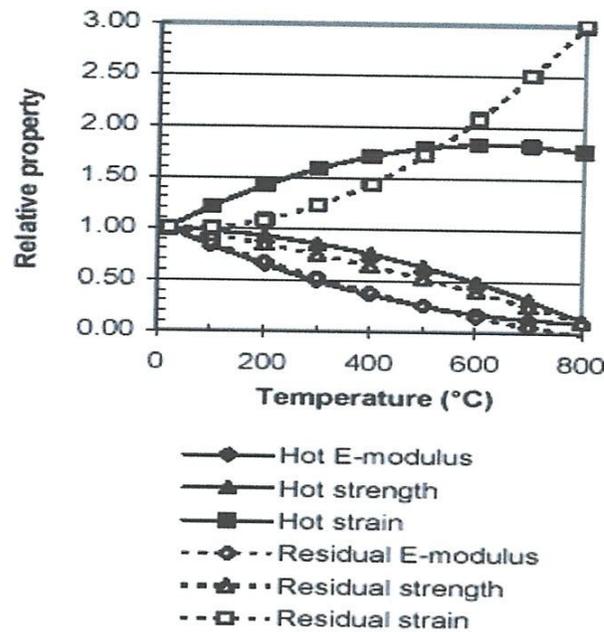


Figure 3-10: Les propriétés relatives de béton avant/après l'élévation de température excepté la propriété résiduelle avec la poudre de chaux à 800°C

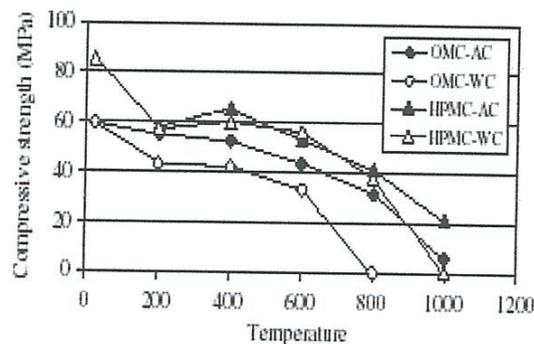


Figure 3-11 : variation de la résistance avec la température.

b. Résistance à la compression[16]

Après le refroidissement le béton prend un temps pour regagner son équilibre avec le milieu ambiant, ce qui explique les résultats de nombreux essais qui montre les résistances mesurées à chaud sont plus élevées que les résistances résiduelles mesurées juste après le refroidissement.

Et il y a encore des variations après le refroidissement puisque l'humidité est réabsorbée dans le béton sec. Ce changement de résistance après refroidissement, qui produit quand le spécimen se rapproche de l'équilibre de son entourage est accompagné par un changement de dimension. Dans une structure, durant la période immédiatement après un feu, ces changements peuvent causer une redistribution des contraintes et provoquer des dégâts additionnels.

Dans les documents codificatifs tels que le DTU (Document Technique Unifié) et l'EUROCODE 2 nous trouvons les courbes d'évolution de la résistance en compression avec la température. Ces courbes ont été établies en se basant sur les résultats expérimentaux, obtenus sur les bétons de compositions variées par différentes équipes des chercheurs.

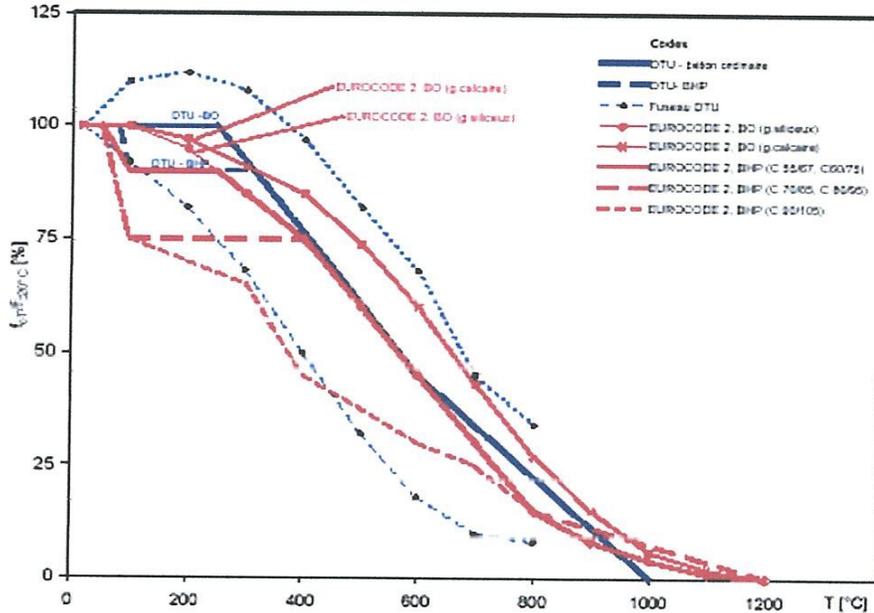


Figure 3-12 : Courbes de la variation de la résistance en compression selon les textes codificatifs DTU et EUROCODE 2

c. Résistance en traction[16]

L'évolution de la résistance en traction en fonction de la température n'a pas été étudiée aussi souvent que celle de la résistance en compression. En effet la réalisation de l'essai de traction directe ou de flexion s'avère toujours difficile, compte tenu de la localisation de l'endommagement et du développement d'une macrofissure généralement instable, qui mène par la suite à la rupture brutale la température. La Figure 6-8 regroupe les résistances résiduelles déterminées en flexion par Malhotra et al 1989 et en traction directe par Noumowé et al.[Noumowe 95]. Les mesures sont effectuées sur des éprouvettes ayant préalablement été refroidies. On remarque sur cette figure que toutes les valeurs déterminées se situent au-dessus de celles de DTU.

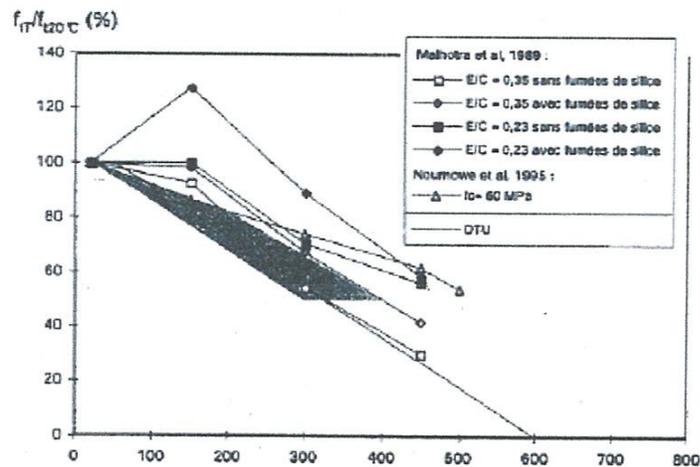


Figure 3-13 : Evolution de la résistance à la traction en fonction de la température

Après exposition à 500 °C, les bétons gardent 60 à 63 % de leur résistance en compression alors qu'ils n'ont plus que 42 à 53 % de leur résistance en traction.

La figure 3-14 montre la variation de la résistance à la traction par flexion avec la température d'un béton ordinaire.

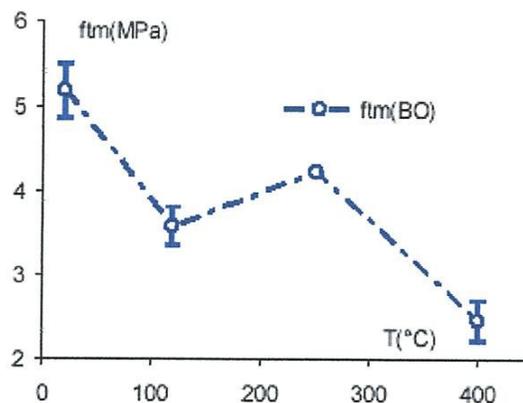


Figure 3-14 : résistance en traction d'un BO en fonction de T

3.3.2.2. Propriétés physiques[16]

Densité apparente

A haute température, ce paramètre dépend fortement de la nature des granulats dans le béton.

La Figure 3-15 montre les variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. On observe une diminution quasi-linéaire jusqu'à 800°C, or le béton à granulats calcaires présente une forte diminution de la densité au delà de 800°C. Cette baisse de la masse volumique est liée à deux phénomènes à savoir l'hydratation complémentaire des anhydres et la carbonatation de la portlandite.

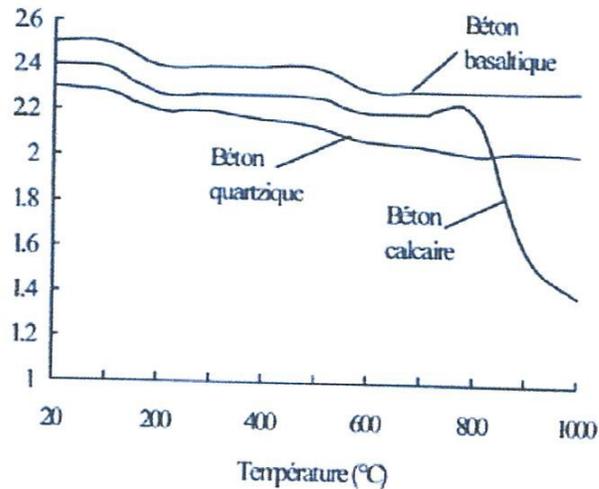


Figure 3-15: Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température.

Perte de masse

Durant l'échauffement du béton, sa masse est soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH. Sur la Figure 3-16 nous pouvons observer une courbe caractéristique de la perte de masse durant l'échauffement, ainsi que la courbe de la vitesse de la perte de masse.

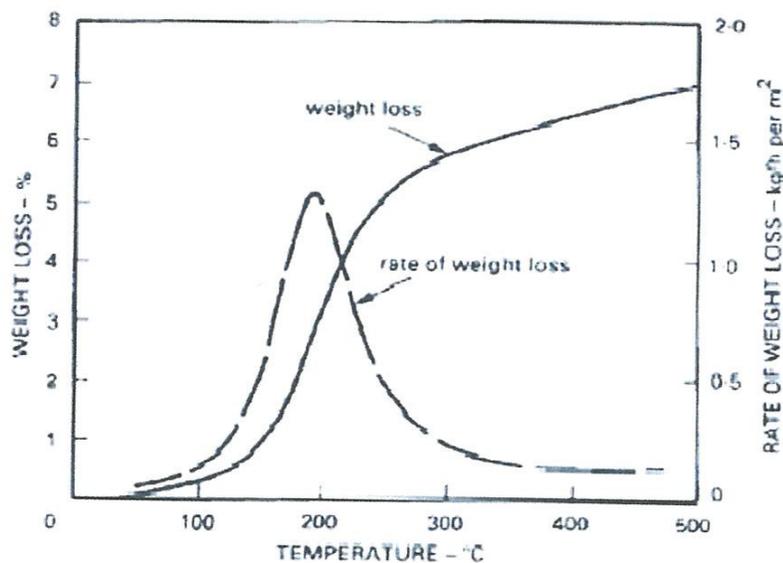


Figure 3-16: Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température

3.3.2.3. Propriétés thermiques

Il a été bien établi que les propriétés thermiques du béton sont modifiées quand il est exposé aux températures élevées.

Il est difficile de déterminer les propriétés de béton avec exactitude à tous les niveaux de température à cause de nombreux phénomènes qui se produisent au sein de la microstructure du béton et qui ne peuvent pas être séparés facilement

La distribution des températures est gouvernée par les propriétés thermiques[16]

Conductivité thermique[18]

Les recherches montrent que la conductivité thermique du béton dépend essentiellement de celle des agrégats qui entrent dans sa composition ; les agrégats à base de quartz présentent les conductivités les plus élevées, les plus faibles sont obtenues avec des agrégats du type anorthosite. Sur la figure 3-17 sont reportés les résultats expérimentaux rapportés en [19] ainsi que la courbe proposée par le DTU [20] ; on peut y faire correspondre l'équation suivante[21] :

$$\lambda(\theta) = 1,4 - 1,5 \cdot 10^{-3} \theta + 6 \cdot 10^{-7} \theta^2 \text{ (Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C)}.$$

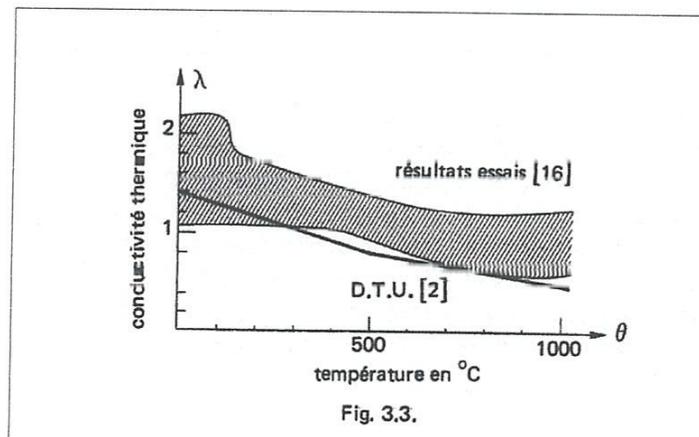


Fig. 3.3.

Figure 3-17 : conductivité thermique

Chaleur spécifique[18]

Les recherches expérimentales indiquent que les matériaux relativement stables chimiquement ont une chaleur spécifique augmentant faiblement avec la température (augmentation de 0,2 à 0,3 kcal/kg °C entre 0 et 100°C). Le béton a une chaleur spécifique variant dans les mêmes limites que ci-dessus mais en présentant quelque irrégularités ; il est recommandé de prendre une valeur constante :

$$C(\theta) = 0,22 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}.$$

Diffusivité thermique[16]

La diffusivité thermique représente la vitesse à laquelle la chaleur se propage à l'intérieur d'un matériau. Elle est directement proportionnelle à la conductivité thermique et elle est inversement proportionnelle à la chaleur spécifique et à la masse volumique. On explique cette dispersion par la difficulté des mesures directes devant être réalisées en régime transitoire, et qui sont très sensibles aux conditions d'essais et au traitement thermique subi par les spécimens testés avant les mesures. On peut toutefois indiquer que la diffusivité thermique décroît progressivement avec la température.

Déformation thermique[16]

La déformation totale d'une éprouvette de béton non chargée soumise au chauffage est due à

- L'expansion thermique des constituants du béton
- Retrait de dessiccation du mortier
- Fissuration
- Détérioration physique des divers constituants

La pâte de ciment se dilate lors de chauffage jusqu'au 105c°, puis elle est sujette ensuite à un fort retrait de séchage. A 300 c°, le retrait devient très important. Des essais de dilatomètre effectués sur des pâtes de ciment indique qu'après l'expansion, le retrait est dû à la perte d'humidité (eau libre; eau combinée).

La Figure 3-18 montre les déformations thermiques de la pâte de ciment ordinaire (OPC), avec fumée de silice (Si), avec cendre volante (Lt), sans ajout pouzzolanique (Tr) en fonction de la température.

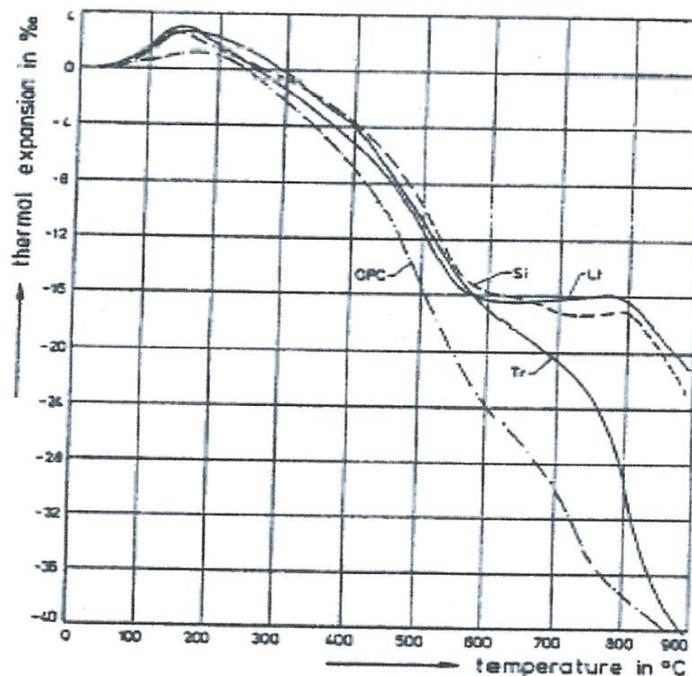


Figure 3-18: Expansion thermique de pâte de ciment

Les granulats se dilatent lorsqu'on les soumet à la chaleur, l'expansion thermique dépend de la nature minéralogique

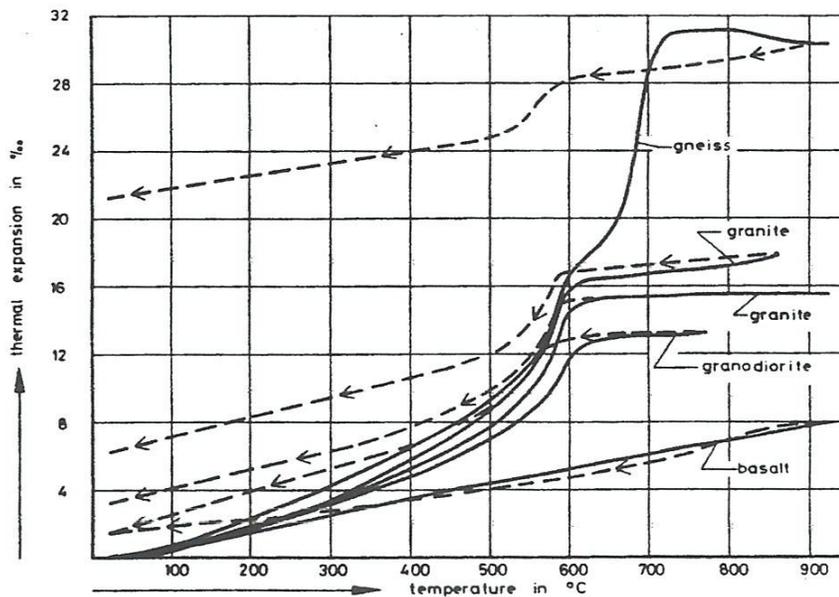


Figure 3-19: Expansion thermique de granulats

Donc à haute température, le ciment subit un retrait de dessiccation et le granulats une expansion. Généralement c'est la dilatation des granulats qui prédomine. Le coefficient d'expansion de béton est fonction de nature de granulats.

Les granulats silicocalcaire se dilatent plus que le calcaire qui a son tour se dilate plus que le basalte.

Les granulats silicocalcaire se distingue de leur forte expansion au dessus de 350°C due à la rupture de ces matériaux chauffés à 600°C le calcaire présente une expansion irréversible. Dans la figure 3-20, les courbes d'expansion des éprouvettes chargées et non chargées mécaniquement pendant le chauffage n'ont pas du tout la même évolution. La déformation mécanique se superpose à la déformation thermique et modifie le comportement de béton.

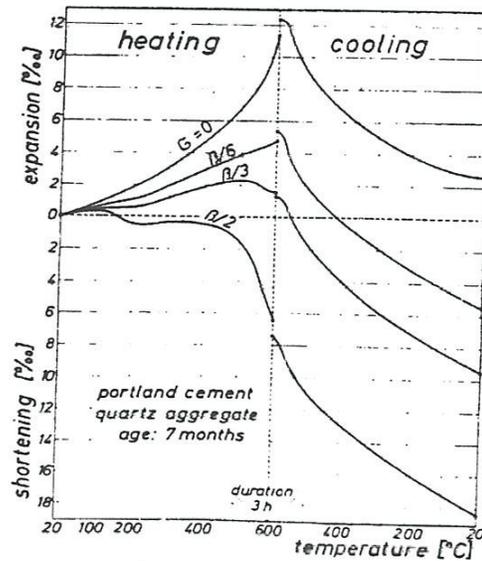


Figure 3-20 . Influence du chargement mécanique sur la déformation

3.3.3. Evolution des caractéristiques d'acier[11]

La plupart des matériaux de construction souffrent d'une perte progressive de résistance et de rigidité lorsque leur température augmente. Les EC3 et 4 montrent cette évolution pour l'acier à l'aide de courbes contrainte-déformation (figure 3-21) à des températures aussi basses que 300°C. Bien que la fusion ne se produise qu'aux environs de 1500°C, seul 23% de la résistance à température normale est encore présente à 700°C. A 800°C, ce rapport se réduit à 11% et à 900°C à 6%. Ces courbes sont basées sur de nombreuses séries d'essais.

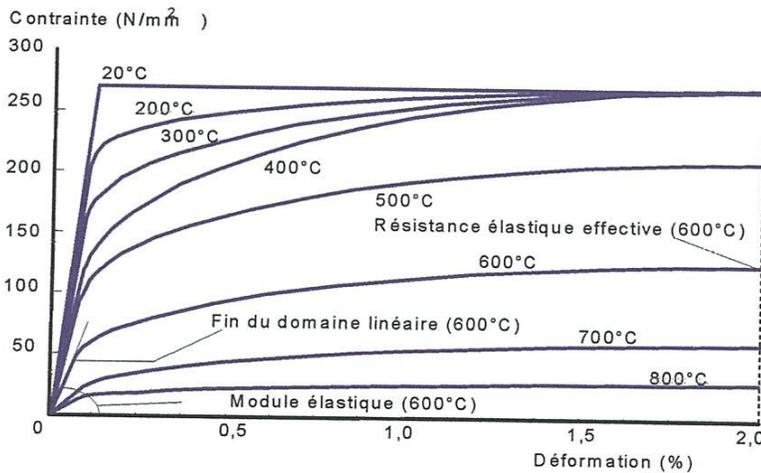


Figure 3-21 : Diminution des propriétés contrainte-déformation avec la température pour de l'acier.

Les caractéristiques physiques des aciers sont également modifiées en fonction de la température. Parmi celles à considérer dans le calcul de la stabilité de structures, il peut être précisé que la valeur du coefficient de dilatation thermique des aciers courants de construction augmente avec la température. Ainsi, des dilatations importantes se produisent dans tout élément en acier lorsque la température s'élève. Ce phénomène devra être pris en compte. En

effet, si un élément structural est assujéti contre tout déplacement axial, la dilatation due à la chaleur se traduira en contraintes thermiques qui viendront accroître le niveau de contraintes global à l'intérieur de l'élément, causant ainsi un effondrement plus rapide. Sans assujettissement axial, un élément d'acier se dilate et peut imposer des charges excentrées aux éléments structuraux contigus en déplaçant l'une de leurs extrémités (par exemple, une poutre déplaçant un mur de maçonnerie porteur). Les règles de l'art de la protection incendie consistent soit à empêcher la dilatation thermique en limitant la température de l'acier, soit à tenir compte de ses effets sur la structure lors de la conception.

Comme susmentionné, les propriétés physiques des aciers dépendent de la température.

Toutefois, l'Eurocode traitant du calcul du comportement au feu des structures en acier (Eurocode 3, partie 1-2), indique que l'évaluation du comportement de structures en acier soumises à un incendie au moyen de modèles de calculs simplifiés permet de considérer les caractéristiques de l'acier suivantes comme étant indépendantes de la température :

- Chaleur spécifique (grandeur caractéristique de la vitesse d'élévation de la température en fonction des échanges thermiques de la structure avec l'atmosphère) :
 $c_a = 600 \text{ J/kg/K}$,
- Conductivité thermique (grandeur caractéristique des gradients thermiques à l'intérieur d'une section) : $\lambda_a = 45 \text{ W/m/K}$.

Chapitre 04

comportement au feu des structures en béton et sa restauration

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

4.1. Conceptions de bâtiments[26]

Objectifs généraux

- la protection et la consommation d'énergie montrent un impact sur l'environnement très élevé.
- La conception des bâtiments est responsable de sa consommation d'énergie pendant une très longue période.
- Les administrations publiques doivent être exemplaires au regard de l'utilisation rationnelle de l'énergie.
- Les spécifications dans les marchés de construction de bâtiments publics devraient inclure des performances énergétiques maximales ; pour se faire, un système de classement par point devrait être inclus dans les appels d'offres afin de juger les propositions selon des critères énergétiques.
- Un comportement au plan environnemental justifie des surcoûts raisonnables
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.

4.1.1. Que s'est-il passé à Madrid ? [1]



Figure 4-1 : gratte-ciel à Madrid lors l'incendie

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'édifiée 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 & technologie) 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 « technique » 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.

“A chevé en 1978, le building WINDSOR totalisait 32 étages, 29 en superstructure et 3 en sous-sol. Les locataires étaient les comptables 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 Valentine 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^{ème} 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, l'installation de mesures de prévention actives et passives.

Le feu a démarré au 21^{ème} étage et s'est rapidement propagé travers le haut que le bas. Les services incendie ont dû se limiter à une action de confinement de l'incendie. L'incendie s'est achevé 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. La 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...

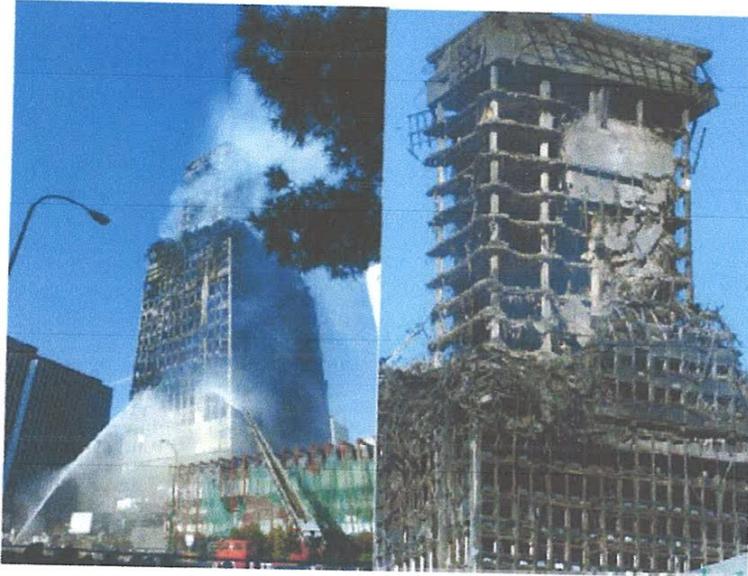


Figure 4-2 : gratte-ciel à Madrid après l'incendie

4.1.2. Le viaduc des 3 fontaines[25]

Le viaduc des 3 Fontaines, construit en 1981, est situé sur l'autoroute E411 à l'entrée de Bruxelles.

La fermeture partielle du viaduc des trois fontaines suite à un incendie d'un local situé sous son tablier, en décembre 2003, (construit sans autorisation entre 1968 et 1970) parce que voire de pénétration non urbaine des navetteurs dans Bruxelles et source de pollution sonore et environnementale considérable.

Quelques chiffres...

- Le viaduc des trois fontaines supporte 60.000 véhicules par jour.
- Le plan régional de développement prévoit la réduction de 20% de la pression automobile dans Bruxelles d'ici 2010.
- 100 logements sont directement situés à proximité du viaduc.
- Les riverains du viaduc en endurent un bruit dépassant les 70 décibels en journée (soit un environnement sonore reconnu comme pénible).

4.1.3. Tests au feu des bâtiments[1]

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.

4.1.4. Cardington 2001[1]

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 européenne concrete building Project et a été financé notamment par la British Cement Association, FEBLCEM (Fédération de l'industrie cimentière belge) et CEMBEREAU (Fédération de l'industrie cimentière européenne).

Ce bâtiment en béton comportait 7 étages, chacun d'entre eux de 22.5 m * 30 m. Chaque étage comportait 12(3*4) travées (7.7m*7.7m). Ce test a démontré, malgré la mise à un 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.

4.2. Etude d'un hôtel R+4 : contreventé par portique[27]

4.2.1. Protection contre l'incendie

Les causes d'incendie dans le bâtiment sont nombreuses ; les risques sont principalement fonction des matériaux mis en œuvre, car on ne peut utiliser des matériaux résistants aux hautes températures sans augmenter anormalement le coût de la construction. Ils sont aussi fonction de la conception architecturale du bâtiment (cloisonnements, communications, contiguïtés avec d'autres bâtiments présentant des risques) ; de la nature de l'utilisation des locaux (conditions d'exploitation, stockage de produits inflammables, fabrications dangereuses) ; enfin des moyens de détection et d'extinction.

4.2.2. Comportement des matériaux au feu

a/ Métaux :

Les températures peuvent atteindre 1300°C dans les grands incendies. Ce qui correspond à la température de fusion de la plupart des métaux : étain 232°C, fonte 1350°C et acier 1300°C. De plus, (les matériaux) métaux subissent des déformations dues à la dilatation avant d'atteindre la fusion.

b/ Briques :

Elles résistent bien au feu.

c/ Bétons :

La résistance dépend du ciment employé, il se produit une déshydratation du ciment qui diminue la résistance du béton. Les ciments alumineux donnent des bétons réfractaires

résistant très bien. Dans le béton armé, il faut que les armatures soient parfaitement enrobées et protégées : 3 cm pour les armatures secondaires, 4/5cm pour les armatures principales.

d/ Matériaux d'étanchéité :

Le bitume et le goudron sont combustibles, sur tant lorsqu'il s'agit d'enduits imprégnant des feutres.

Essai des matériaux au feu :

Les règlements de construction fixe des exigences de sécurité en cas d'incendie qui se référant aux essais, à la classification des matériaux de construction.

Par rapport au danger l'incendie et notamment à la définition des degrés de réaction au feu et de résistance au feu. la réaction au feu du matériau est l'aliment apporté au feu et au développement de l'incendie, par suite de la chaleur dégagée en cours de combustion et de la formation de gaz inflammables.

La résistance au feu qui permet d'apprécier le comportement d'un élément construction soumis à l'action de la chaleur, est le temps pendant lequel les matériaux continuent à jouer leur rôle malgré l'incendie, temps évalué en fonction de critère de résistance mécanique.

Les ossatures en acier doivent être protégées par des revêtements en maçonnerie ; une bonne protection de 2h. La résistance d'une ossature en béton armé assure une protection maximum de 6h ; un enduit en plâtre de 1.5 cm donne une protection de 2h. La résistance d'une ossature en béton armé dépend du bon enrobage des armatures, la protection peut être améliorée par un revêtement en brique ou en enduit en plâtre.

4.2.3. Vérifications complémentaires de résistance à l'incendie

Dans cette partie on procède les vérifications complémentaires de résistance à l'incendie d'élément dont le dimensionnement a été fait au préalable par les règles BAEL pour les températures normales d'utilisation.

4.2.3.1. Poteaux des constructions courants (poteau 30*60)

L'effort normal résistant est défini par :

$$N_u = \alpha [B_r \phi_b f_{c28} / 0,913 + f_e \square A_s \Psi_{si}]$$

Pression dans laquelle :

$$\alpha = \frac{\alpha}{0,35}$$

α : coefficient des règles BAEL.

B_r : section réduite du poteau obtenue en déduisant de sa section réelle un centimètre d'épaisseur sur toute sa périphérie.

ϕ_b : coefficient de la température moyenne du béton.

Ψ_{si} : coefficient de la température \square_{si} d'un acier que quelconque A.

N_u : effort normal.

Il faut : $N \leq N_u$

$$\alpha = \frac{\gamma f_{c,j}}{\gamma f_{c,j} + \sigma_s} = \frac{9 \cdot 25}{9 \cdot 25 + 400} = 0.36 \quad (\text{d'après BAEL91})$$

$$\alpha' = 0.36 \cdot \frac{1}{0.85} = 0.42$$

$$\beta_r = [(60 - 2)(30 - 2)] \cdot 10^{-2} = 0.1624 \text{ m}^2$$

$$\phi_b = 0.45 \quad \text{avec : } \square = 600^\circ\text{c} \quad (\text{température moyenne de béton})$$

$$\phi_s = 0.42 \quad \text{avec : } \square = 600^\circ\text{c} \quad (\text{température moyenne d'acier HA})$$

$$N_{u \text{ max}} = 208825,42 \text{ N} \quad A = 8\text{HA}25 = 39,27 \text{ cm}^2$$

$$N_{\theta} = 0,42 \left[\frac{0,1624 \cdot 0,15 \cdot 25}{0,013} + 400 \cdot 39,27 \cdot 100 \cdot 0,42 \right] = 277089,96 \text{ N}$$

Donc : $277089,96 > 208825,42 \text{ N} \rightarrow$ condition vérifier.

4.2.3.2. Les poutres continues en béton armé à section rectangulaire, armées d'acier naturel

a/ section en travée (béton comprimé cote face froide)

L'effort de traction dans les aciers inférieurs :

φ_{si} : correspondant à la température θ_{si} de l'acier A_i

$$A = 9,42 \text{ cm}^2$$

$$f_e = 348 \text{ N/mm}^2 \quad \varphi_s = 0,42$$

Effort de compression dans le béton est défini par : (diagramme rectangulaire)

$$N_{bc} = 0,8 b_0 y \frac{f_{c,j}}{1,3} \quad (\varphi_b = 1)$$

$$N_{bc} = N_{s\theta} \Rightarrow 137682,72 = 0,8 \cdot 300 \cdot y \cdot \frac{25}{1,3} \Rightarrow y = 29,83 \text{ mm} = 3 \text{ cm}$$

$$Z = 58 - 0,4 \cdot 3 = 56,8 \text{ cm}$$

$$M_{t\theta} = N_{s\theta} \cdot Z = 137682,72 \cdot 0,568 = 78203,78 \text{ Nm}$$

$M_{t\theta} > M_{tu} = 15933,01 \text{ Nm} \rightarrow$ condition vérifier.

b/ sections sur appuis (béton comprimé coté face chaude)

$$M_{a\theta} = M_{0,u} + M_{t\theta}$$

$M_{0,u}$: moment isostatique sous les sollicitations

$$M_{0,u} = -28259,83 \text{ Nm}$$

$$M_{a\theta} = -28259,83 + 78203,78 = 49943,95 \text{ Nm}$$

$$d-0,4y = \frac{Ma\theta}{N_s} = \frac{49943,95}{N_s}$$

$$y = 2,5 (d-z)$$

$$N_s = 0,8 b_0 (2,5(d-z)) \cdot \frac{f_{ct}}{1,3} = \frac{Ma\theta}{d-0,4 (2,5(d-z))}$$

$$N_s = 348 \cdot 942 = f_e \cdot A = 327816 \text{ N}$$

$$d-0,4y = \frac{49943,95}{327816} \Rightarrow y = (-0,150 + 580) / 0,4 = 1075 \text{ mm}$$

$$z = 15 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow f_{c\theta} = \frac{N_b c \cdot 1,3}{0,8 \cdot b_0 y} = \frac{327816 \cdot 1,3}{0,8 \cdot 300 \cdot 1075} = 1,65 \text{ Mpa}$$

$$M_{a,\theta} = 49943,95 > 28259,83 \text{ Nm} \rightarrow \text{condition vérifiée}$$

Donc : tous les éléments en béton armé vérifiés la résistance à l'incendie donc le dimensionnement est acceptable.

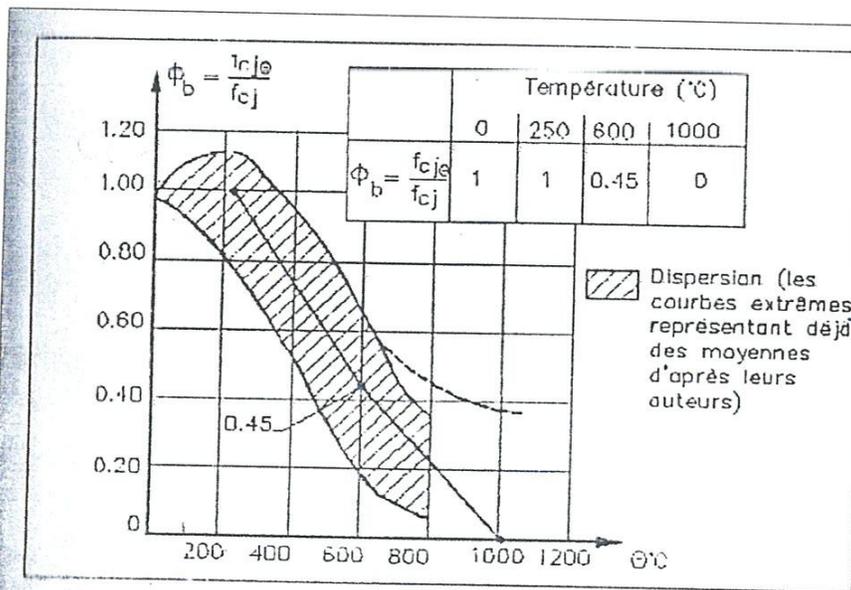


Figure 2 résultats d'essais

Figure 4-3 : évolution des caractéristiques des matériaux béton sous l'action de l'incendie

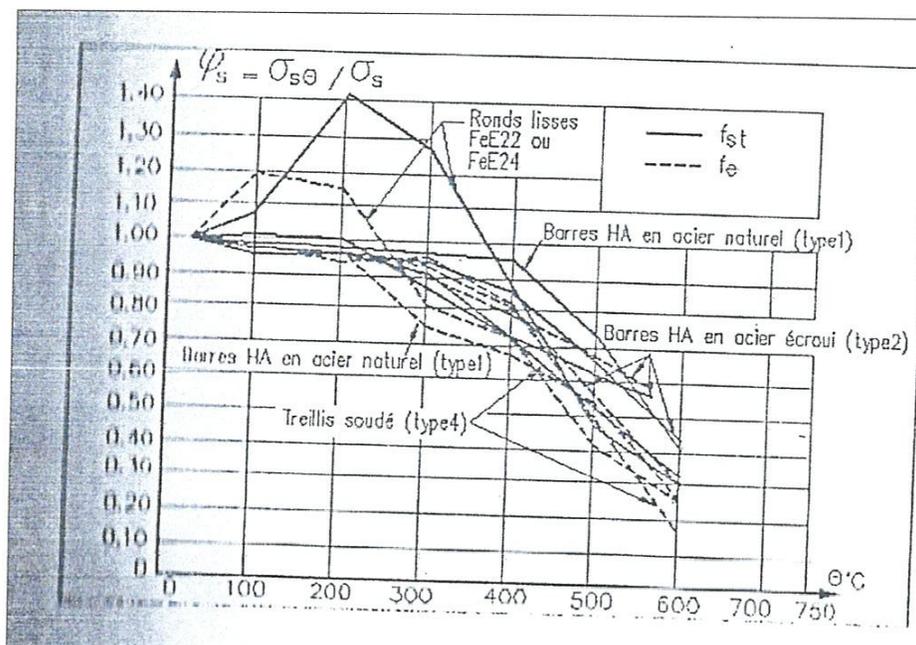


Figure 4-4 : évolution des caractéristiques des matériaux béton sous l'action de l'incendie

4.3. La restauration des structures béton

Possibilités de réparation[1][8]

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.

L'évaluation de la résistance au feu concerne l'ensemble de la structure d'un compartiment, voire d'un bâtiment. L'analyse peut être une analyse globale de la structure, une analyse partielle de la structure ou une analyse individuelle des éléments constitutifs de la structure. L'analyse globale de la structure doit être effectuée en prenant en compte le mode de ruine vis-à-vis de l'exposition au feu, les propriétés des matériaux et la rigidité des éléments, qui dépendent de la température.

Comme alternative à l'analyse globale de la structure, des analyses structurales de sous ensembles comprenant les parties appropriées de la structure peuvent être effectuées. De même, il est possible d'analyser des éléments individuels en situation d'incendie (une analyse par éléments est suffisante pour vérifier les exigences de résistance à l'incendie normalisé). Par ailleurs, une alternative à l'utilisation des modèles de calculs peut être le dimensionnement sur la base de résultats d'essais.

En général, les Eurocodes présentent 3 approches possibles pour l'évaluation de la résistance au feu :

- des méthodes tabulées permettant de s'affranchir de tout calcul de température, moyennant l'adoption de dispositions constructives particulières pour chaque type d'élément ;
- des méthodes de calcul simplifiées nécessitant la connaissance de la distribution de la température dans la section (application des lois de la propagation de la chaleur en milieu continu, dites lois de Fourier) mais mettant en œuvre des hypothèses simplificatrices ;
- des méthodes de calcul avec des modèles « avancés », basées sur le comportement physique fondamental des matériaux à chaud et pouvant faire appel notamment à une analyse en plasticité de la structure.

Lorsque les méthodes tabulées ne sont pas utilisées, le dimensionnement à chaud consiste à vérifier si le dimensionnement à froid permet de résister à la durée d'exposition au feu souhaitée et ce, en utilisant les deux dernières méthodes de calculs susmentionnées. Les calculs effectués à chaud nécessitent la connaissance de l'évolution des caractéristiques physiques des matériaux en fonction de la température.

Les modèles de calculs simplifiés sont appliqués à des éléments de construction individuels. Ils donnent des résultats majorants, orientés du côté de la sécurité.

Les modèles de calculs avancés sont des méthodes de calculs dans lesquelles les principes de l'ingénierie sont appliqués de manière réaliste à des cas spécifiques.

La réponse à l'action thermique correspond à une élévation de la température de la structure qui conduit à une modification des propriétés mécaniques et donc une perte de résistance mécanique.

Lorsque la température de l'élément est connue, son comportement mécanique à température élevée peut être étudié. Celui-ci peut être évalué, en première approche, d'une manière simplifiée en utilisant les formules simplifiées des Eurocodes, en considérant une température homogène en section et le comportement des éléments indépendamment.

Une étude approfondie d'une partie de la structure globale peut être réalisée, en utilisant des logiciels aux éléments finis prenant en compte les éventuels gradients en section et l'interaction entre éléments.

Les méthodes de calculs avancées pour la réponse mécanique doivent être fondées sur les hypothèses de la théorie de la mécanique des structures, prenant en compte les variations des propriétés mécaniques avec la température. Les effets des contraintes et des déformations thermiques, dues tant à l'accroissement de température qu'aux gradients de température, doivent être pris en compte. De plus, lorsqu'il y a lieu, le modèle de réponse mécanique doit également tenir compte des éléments suivants :

- effets combinés des actions mécaniques, des imperfections géométriques et des actions thermiques,
- propriétés mécaniques du matériau en fonction de la température,
- effets de non-linéarité géométrique,
- effets de non-linéarité des propriétés des matériaux, incluant les effets bénéfiques du chargement et du déchargement sur la raideur des structures.

Après avoir évalué le comportement au feu d'une structure ou d'un élément structurel, si celui-ci n'est pas satisfaisant, il est nécessaire de recourir :

- soit à un surdimensionnement de l'élément de manière à diminuer son taux de chargement mécanique et diminuer sensiblement son échauffement ;
- soit à une protection thermique de manière à réduire notablement l'échauffement de l'élément

Concernant ce dernier aspect, il peut être noté que les eurocodes contiennent des abaques issus d'essais normalisés réalisés par un laboratoire agréé en résistance au feu, conformément à une méthode officielle française, qui permettent de déterminer les épaisseurs de protections à appliquer.

Conclusion

5. CONCLUSION

Les constructions en béton garantissent une excellente sécurité au feu. Dans le passé, de nombreux essais menés à l'échelle mondiale l'ont confirmé. Le béton est un matériau à faible conduction thermique qui, moyennant un dimensionnement correct et une couverture suffisante, peut garantir une résistance au feu de 180 minutes, ou plus, sans protection additionnelle.

Le béton permet la réalisation d'éléments de construction présentant la résistance au feu requise avec des épaisseurs courantes sans sur dimensionnement.

Le béton est bien adapté aux exigences des immeubles de grande hauteur et des établissements recevant du public ou, sous réserve d'un enrobage correct des armatures, il assure largement la résistance exigée pour les structures ou pour le compartimentage.

Les bâtiments préfabriqués à base d'éléments en béton ont de par leur constitution un comportement tout à fait favorable à une bonne tenue au feu.

Il convient de souligner que si la réglementation ne prend en considération que la protection des personnes, celle des biens, et donc des ouvrages, est délaissée par le législateur. Il appartient aux assureurs de prendre en compte le risque incendie. Le béton, là encore, bénéficie des meilleures prises en compte, le maximum de réduction de la prime d'assurance lui est accordé.

Enfin, on notera que les bâtiments en béton, après un incendie, offrent l'avantage de ne pas s'effondrer.

De plus, par des moyens simples (réparation de surface par projection), il est généralement possible de les remettre en état rapidement. La reprise de l'activité permet de limiter les pertes d'exploitation.

[27] M^{elle} BEN CHEIKH MESSAOUDA, M^{elle} KOUAHLA CHAHINEZ « Etude d'un hôtel R+4 : contreventé par portiques », Mémoire de fin d'étude, Promotion juin 2001 Université 08 mai 45. Guelma.

[28] <http://www.discaunt pdh.com/ course/ meant water / maintenance%20 of %20 waterf.>

[29] Protection civil. Guelma. _____