

**LE COMPORTEMENT DES STRUCTURES EN BETON
ARME SOLLICITEES A DE HAUTES TEMPERATURES.**

Présenté par

TOUAHRI AHMED

Dirigé par

D^R LAMRI BELKACEM

Soumis à la :

Faculté des sciences de l'ingénieur
Département de Génie Civil

Pour l'obtention du diplôme de :

MAGISTERE EN GENIE CIVIL

MAI 2008

REMERCIEMENTS.

Arrivé au bout de ce travail, effectué au sein de l'unité de recherche « le comportement des structures sollicitées à de hautes températures », je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à l'ensemble des personnes qui m'ont permis de le mener à terme.

Je tiens à remercier tout d'abord, Lamri Belkacem, Maître de conférence à L'UHBB de Chlef de m'avoir encadré et d'avoir pu bénéficier aussi bien de ses conseils et compétences scientifiques que ses qualités humaines.

Je suis gré à M^r Ahmed Bettahar , Professeur à l'Université de Hassiba Ben Bouali de Chlef de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Toute ma gratitude, à M^r Ahmed Benyahia Ali, Professeur à l'Université de Bab Ezzouar qui m'a fait l'honneur d'examiner mon travail.

Un grand merci aux D^r Taieb Branci et Dr Ali Makhlouf de m'avoir fait le plaisir de participer à mon jury en tant qu'examinateurs. Leurs remarques ainsi que leurs expériences nous seront utiles pour les travaux ultérieurs sur le sujet.

J'adresse également mes remerciements à tous les membres et collègues du département de génie civil sans oublier Mrs Ait Athmane Hassane et Said Nouri qui m'ont beaucoup aidé dans l'accomplissement de ce travail.

Que mes collègues de structures trouvent ici toute ma reconnaissance pour les années passées en leurs compagnies. Que l'avenir leur permette de réaliser leurs projets.

Je remercie enfin toutes les personnes qui ont contribué de manière directe ou indirecte à ce travail. Je souhaite enfin exprimer ma gratitude envers l'ensemble de mes collègues enseignants, chercheurs et travailleurs du département de génie civil de l'UHBB de Chlef.

RESUME

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

Plus récemment, des incendies se sont produits dans des tunnels ont conduit tout un chacun à une plus grande vigilance, à réfléchir aux différentes composantes des incendies et, sûrement, à se poser des questions sur la tenue des ouvrages au feu.

Ce mémoire :

- rappelle quelques concepts fondamentaux propres au domaine du feu
- fixe le contexte des réglementations

- précise le comportement des matériaux béton et acier, durant et après l'incendie

- montre que le béton intégré dans la structure sous forme de béton armé confère aux ouvrages une résistance remarquable au feu.

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

INTRODUCTION

La complexité de la microstructure du matériau béton est une des causes des particularités de son comportement mécanique. Le comportement très complexe et les mécanismes qui conduisent à sa modification peuvent être bien définis, seulement en étudiant le béton au niveau microscopique, et en prenant en considération ses modifications physico-chimiques et les réactions qui ont lieu lors de chargement.

Ainsi dans la première partie de ce mémoire, nous nous proposons de décrire la sécurité incendie dans les bâtiments et de mettre en évidence la prévention et la prévision du feu afin de protéger les structures en béton armé. Un chapitre a été consacré à la compréhension de la physique de l'incendie afin d'expliquer le développement ainsi que les modes de propagation d'un incendie dans un bâtiment.

Nous avons présenté dans la deuxième partie, les mécanismes thermiques et mécaniques afin d'expliquer d'une part les effets de dégradations thermiques causés par le processus de chauffage (endommagement thermique) et d'autre part, les effets de la dégradation mécanique au cours des cycles de chargement. En effet la perte de la capacité portante dans le cas des structures en béton armé peut être attribuée aux effets mécaniques (déformation imposée, charge variable appliquée et effets de fatigue) ou encore aux effets thermiques et leurs interactions avec la mécanique (déformation thermique, fluage transitoire).

Pour la troisième partie, une bibliographie de modèles et de méthodes ont été discutées afin de permettre aux ingénieurs de cerner la résistance au feu des constructions et un tableau de modèles CFD [Computational Fluid Dynamics] a été donné.

Nous avons présenté dans la quatrième partie une étude bibliographique détaillée des travaux expérimentaux réalisés sur la tenue au feu du béton et de l'acier. Le dernier chapitre a été consacré au calcul de la résistance au feu des structures en béton armé.

TABLE DES MATIERES

-INTRODUCTION	3
CHAPITRE 1. LA SECURITE INCENDIE	
-A : La prévention.....	8
1.1. Définitions.....	9
1.2. Les principes.....	9
1.2.1. Les causes naturelles.....	10
1.2.2 Les causes energetiques.....	10
1.2.3 Les causes humaines.....	10
1.3. Les mesures.....	11
-B. La prévision.....	11
1.4. Généralités.....	12
1.4.1. Définitions.....	12
1.4.2. Mesures de prévision.....	12
1.4.2.1. La prévision technique.....	12
1.4.2.2. La prévision tactique ou opérationnelle.....	13
1.4.2.3. Vérification permanente des moyens d'intervention.....	13
1.4.2.4. Etablissement des consignes d'alerte et d'appel.....	14
1.4.2.5. Liaison téléphonique.....	14
CHAPITRE 2. PHYSIQUE DE L'INCENDIE	
2.1. Terminologie : Feu et incendie.....	15
2.2. Déroulement d'un incendie.....	15
2.2.1. Le triangle de feu.....	15
2.3. Développement de l'incendie.....	26
2.4. Propagation de l'incendie.....	28
2.4.1. Modes de propagation.....	28
2.4.2. La modélisation d'un incendie.....	30
2.4.3. Modélisation d'un incendie réel.....	31
2.4.4. Propagation dans un bâtiment.....	32
2.4.5. Propagation d'un bâtiment à un autre.....	33
2.4.5.1. Propagation de l'incendie par déplacement des substances...34	
2.4.5.2. La propagation de l'incendie par transmission de chaleur.....34	
2.5. Les différents classement de feu.....	34
2.6. Les deux principes fondamentaux de la protection passive.....	36
2.6.1. La réaction au feu.....	36
2.6.2. La résistance au feu.....	46

2.7. Protections et risques	51
2.7.1. L'incendie : risques, facteurs, origine de propagation	51
2.7.2. Propagation passive et active et comportement humain	52
2.7.3. Mesures de protection passives : le compartimentage	53
2.7.4. Mesures de protection actives	55
2.7.5. Comportement humain	57

CHAPITRE 3. MECANISMES THERMIQUES.

3. Introduction	60
3.1. Méthodologie	60
3.2. Objectifs	61
3.3. Transfert thermique	61
3.3.1. Puissance thermique	65
3.4. Les mouvements de fumée	66
3.4.1. Mouvements de convection	67
3.4.2. La suppression causée par le feu	67
3.4.3. Principaux mouvements de fumée au début d'un incendie en milieu fermé	68
3.4.4. La dilatation thermique	69
3.4.4.1. Les différences de pression entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment	69
3.4.4.2. Les différences de pression en fonction de la hauteur d'un bâtiment	71
3.4.4.3. La présence des vents, d'ouvertures, de systèmes de circulation d'air	71
3.4.4.4. La densité et la composition de la fumée	71
3.5. La charge incendie et son débit calorifique (RHR)	72
3.5.1. La ventilation	75
3.5.2. Caractéristiques thermiques des parois	76
3.5.3. La sévérité de l'incendie	80

CHAPITRE 4. LA RESISTANCE AU FEU DES CONSTRUCTIONS ET LES EUROCODES.

4.1. Eurocodes structuraux	81
4.1.1. Eurocode feu	82
4.2. Méthodes de calcul	84
4.2.1. Actions mécaniques	84
4.2.2. Les différents modèles de l'action thermique	85
4.2.3. Courbes normalisées	85
4.2.4. Courbes paramétriques	87
4.3. Modèles à zones	88
4.3.1. Modèles à une zone	88

4.3.2. Modèles à deux zones	89
4.3.3. La méthode Heskestad	92
4.3.4. La méthode Hasemi	93
4.4. Combinaison entre un modèle à deux zones et un modèle de feu localisé	94
4.4.1. Modèles CFD	95
4.4.2. Différentes approches	96
4.4.3. Géométries et maillages	96
4.5. Sélection des modèles physiques	96
4.5.1. Modèles de turbulence	97
4.5.2. Modèles de combustion	98
4.5.3. Modèles de radiation	100
4.5.4. Modèles de transport de fumées	101
4.5.5. Conditions aux limites	102
4.6. Méthodes numériques	103
4.6.1. Le traitement des résultats	103
4.6.2. Les principaux outils existants	104
4.6.3. Quel courbe, quel modèle choisir ?	106

CHAPITRE 5. REVUE DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX REALISES SUR LA TENUE AU FEU DU BETON ET DE L'CIER.

5.1. Le béton	107
5.1.1. Déshydratation et modifications physico- chimiques du béton	107
5.1.2. Microfissuration et dégradation de l'interface pâte granulats	108
5.1.3. Evolution de la porosité	108
5.1.4. Modification de l'état hydrique	109
5.2. Evolution des propriétés thermiques du béton avec la température	109
5.2.1. Conductivité thermique	110
5.2.2. Chaleur spécifique	111
5.2.3. Diffusivité thermique	112
5.3. Evolution des propriétés mécaniques du béton avec la température	112
5.3.1. Module d'élasticité à hautes températures	112
5.3.2. Résistance en compression à hautes températures	113
5.3.3. Résistance en traction à hautes températures	113
5.3.4. Effets des hautes températures sur l'énergie de fissuration du Béton	114
5.4. Comportement mécanique du béton à hautes températures	114
5.4.1. Comportement du béton en compression à hautes températures	114
5.4.2. Comportement du béton en traction à hautes températures	115
5.4.3. Déformation thermique du béton à hautes températures	116
5.4.4. Déformation thermique libre	116
5.4.5. Conclusion de la partie thermique	117

5.5. L'acier.....	117
5.5.1. Déformation de l'acier.....	118
5.5.2. La dilatation thermique.....	118
5.5.3. La chaleur spécifique de l'acier.....	119
5.5.4. La conductivité thermique de l'acier.....	119
5.5.5. Comparaison des caractéristiques mécaniques des matériaux acier - béton.....	120

CHAPITRE 6 : CALCUL DE LA RESISTANCE AU FEU DES STRUCTURES EN BETON ARME.

6.1. Les types de modèles de calcul.....	122
6.2. Calcul du comportement au feu des structures en béton EC2 partie 1-2...	123
6.2.1. Principes de base.....	123
6.2.2. Méthode des valeurs tabulées.....	125
6.2.2.1. Principes généraux.....	125
6.2.2.2. Utilisation de la méthode pour la vérification d'un poteau en béton armé.....	126
6.2.2.3. Utilisation de la méthode pour la vérification d'un poutre en béton armé.....	128
6.2.2.4. Utilisation de la méthode pour la vérification d'un dalle en béton armé.....	129
6.3. Modèles de calcul simplifiés.....	131
6.3.1. Poutres et dalles en béton armé.....	131
6.3.2. Poteaux en béton armé.....	132
Conclusion.....	137
Références.....	138

CHAPITRE : 1

LA SECURITE INCENDIE

La sécurité des personnes en cas d'incendie est principalement réglementée par des codes. L'un des principaux objectifs est d'assurer un degré minimal de sécurité incendie aux occupants des bâtiments. A cette fin le code impose l'utilisation de matériaux de construction incombustibles, ou qui propage la flamme lentement, ou encore, qui empêche la propagation de l'incendie.

Ces mesures, qui font parties d'un plan d'ensemble en vue d'accroître la sécurité incendie, constituent les principaux sujets du regard sur la science du bâtiment.

Les codes établissent indirectement le degré de sécurité incendie requis en spécifiant les dimensions des issues (à partir desquelles le temps d'évacuation peut-être calculer), la résistance au feu des matériaux, les techniques d'extinctions sur la charge combustible.

D'un point de vue global, ces exigences représentent le degré minimal de sécurité incendie. Ce terme pris dans son sens le plus général, recouvre deux notions distinctes :

La prévention et la prévision

- a) la prévention au sens strict que l'on peut définir comme l'ensemble des mesures propres à éviter les incendies, ou à en limiter les effets.
- b) La prévision : c'est l'ensemble des dispositions destinées à déceler le feu des son origine et à en assurer l'extinction la plus rapide.

A) La prévention

A.1) Généralité

a) Tout d'abord assurer la protection des personnes, c'est-à-dire mettre à l'abri des risques le public, le personnel, les ouvriers pouvant se trouver dans les locaux.

b) Ensuite, éviter les pertes matérielles, de façon à permettre à l'entreprise de surmonter les conséquences d'un sinistre et de maintenir le plein emploi de ce personnel.

Il est normal que la sécurité humaine soit l'objectif prioritaire, celui qui doit commander. La prévention doit mettre à l'abri des risques d'accidents le personnel des entreprises, le public qui a accès dans certaines d'entre-elles et, en même temps, le public extérieur qui peut être menacé indirectement.

En ce qui concerne les pertes matérielles, elles visent les destructions ou détériorations de biens immobiliers, soit par l'action immédiate du feu, soit par ses conséquences directes (écroulements des bâtiments)

Dans l'industrie, on constate en général que les 2/3 des établissements qui ont subi un incendie très sérieux ne continuent pas leur exploitation au –delà de trois ans. Dans certains secteurs de pointe où règne une compétition, une industrie absente du marché durant un mois met environ douze mois pour rattraper ses concurrentes.

Enfin, il faut savoir que les pertes d'exploitation et les dommages indirects sont trois fois plus élevés que les coûts directs de l'incendie par suite de l'arrêt ou de la diminution de la production, de la perte des marchés et du chômage qui se traduisent généralement pour le capital par la perte appréciable de revenus et, pour la main d'œuvre, par une perte sensible des salaires.

Par ailleurs, le gage de réussite d'une intervention c'est l'assurance que les sauveteurs vont pouvoir combattre le sinistre (au plus près) en s'engageant à l'intérieur de l'établissement dans le but de le maîtriser au plus vite. Si les structures des bâtiments n'offrent pas des garanties de stabilité pendant une certaine durée permettant en particulier la mise en œuvre des matériels des sapeurs-pompiers, l'action de ceux-ci ne pourra être qu'inopérante.

1.1 Définitions

Ces buts étant déterminés, comment peut-on définir la prévention ?

D'une manière générale, prévenir un risque c'est l'empêcher d'exister ou, tout au moins, essayer par tous les moyens possibles d'arriver à ce résultat ; prévoir un risque, c'est penser qu'il pourra exister à un moment donné et prendre en conséquence, des mesures en vue de son apparition.

Deux définitions de la prévention, parmi tant d'autres, peuvent être données :

(La prévention de l'incendie est une discipline scientifique dont la finalité est la protection de la vie des êtres humains et la sauvegarde de leurs biens)

La deuxième est plus élaborée :

(La prévention contre l'incendie peut –être considérée comme l'ensemble des activités administratives et techniques organisant et assurant la recherche et l'expérimentation, l'application et le contrôle des moyens, des mesures et des méthodes permettant, de s'opposer, quand elles sont nuisibles, à la naissance et à la propagation du feu, à leurs effets directs et indirects sur les personnes, les animaux et les biens.

1.2. Les principes

La prévention définie, quels sont les objectifs ?

Ils sont en nombre de quatre

- limiter les risques de naissances de feu,
- limiter la propagation de l'incendie,
- évacuer les personnes en danger,
- faciliter l'intervention des secours.

Le problème ainsi posé, quels sont les principes qui vont permettre de la résoudre ?

En premier lieu il convient d'empêcher l'éclosion du sinistre, c'est-à-dire de réduire au maximum les causes d'incendie ; ce résultat ne peut-être obtenu que si nous connaissons parfaitement ces dernières.

A la base de l'incendie on retrouve toujours, comme cause générale l'énergie sous sa forme calorifique, c'est pourquoi les sources de chaleur qu'elles soient chimiques, mécaniques, électriques ou lumineuses, doivent être étudiés avec soin pour déterminer leurs dangers.

Les progrès accomplis dans le domaine scientifique nous permettent de déceler et de prévoir toutes les productions de chaleur et, par la suite, d'annihiler leurs effets, exception faite toutefois de l'électricité atmosphérique qui dépasse le cadre des possibilités humaines.

On peut classer les causes d'incendie en 3 catégories :

1°)-Causes naturelles.

.La foudre.

.Le soleil.

.La fermentation.

2°)- Causes énergétiques.

.Les frottements.

.Les étincelles.

.Les réactions chimiques.

.Les courts-circuits.

3°). Causes humaines.

.La cigarette.

.L'électricité.

.La négligence.

.Les produits inflammables.

.L'ignorance.

.La malveillance.

1.2.1. Les causes naturelles, comprennent le soleil, la foudre, la combustion spontanée qui provoque souvent des feux de matières organiques et de produits chimiques.

1.2.2. Les causes énergétiques, sous n'importe quelle forme (chaleur, lumière, force, électricité.....)

Cette énergie peut être à l'origine des incendies :

- si elle se produit à proximité des matériaux combustibles
- si les installations électriques ou de gaz sont défectueuses,
- par suite d'une mauvaise disposition des lieux (isolement Insuffisant, ventilation défectueuse)

1.2.3. Les causes humaines relèvent de l'imperfection humaine et sont imputables à l'ignorance, à la négligence ou à la malveillance. Il faut d'ailleurs combattre la tendance de l'opinion publique qui indique trop souvent la malveillance comme cause d'incendie pour effacer les erreurs de ce qui ont mal conçu, réalisé ou utilise certaines constructions ou installations.

La connaissance de ses causes permet de les prévoir et, dès lors, d'en supprimer un bon nombre par l'observation de prescriptions particulières telles que la mise en conformité avec les des installations électriques, de gaz, de chauffage, l'interdiction de fumer dans les locaux dangereux, la ventilation de certains volumes présentant des vapeurs dangereuses, etc.....

Malheureusement, en consultant les statistiques on s'aperçoit qu'un grand nombre de sinistres par le feu sont imputables à la défaillance humaine sous des formes diverses telles que la négligence, l'imprudence ou les imprévisions lointaines.

Le fait de pouvoir déterminer le degré de sécurité incendie exige par les codes permet aux concepteurs d'élaborer des solutions qui peuvent différer des exigences du code tout en assurant un degré de sécurité semblable. Ces solutions de rechange sont appelées des (équivalents) et sont souvent utilisées dans les bâtiments complexes ou de grands dimensions, ou il est difficile sinon impossible d'appliquer le code à la lettre. Il revient au concepteur de démontrer que l'équivalent propose remplit les conditions de rendement exigées par le code, et aux autorités compétentes de l'évaluer. Cela s'effectue souvent par la présentation et l'évaluation d'une méthode intégrée d'analyse de la sécurité incendie.

Après ce rapide expose sur les causes de l'incendie il est plus facile de comprendre le pourquoi des mesures de préventions qui viseront un double objectif :

- la protection des personnes,
- la sauvegarde des biens

1.3. Les mesures

Cette classification est certes arbitraire, car il est évident que plus les biens seront préservés, plus la sécurité des personnes sera assurée ; par ailleurs si la préservation des biens peut supporter des degrés , des nuances, la sauvegarde des êtres humains ne saurait admettre aucune défaillance.

Les mesures essentielles, en la matière, résident dans l'existence de :

-Dégagements suffisants

En règle générale, tout établissement, tout bâtiment, tout immeuble doit être conçu, dispose ou construit de façon que l'évacuation des personnes puissent se faire en deux points différents au moins.

La sortie unique pressente en effet un très grave danger.

Elle peut être bloquée non seulement par les flammes mais plus souvent encore, quand il s'agit d'un escalier, par les fumées et les gaz chauds affolant les gens.

Il n'est pas rare de voir des occupants des étages supérieurs menacer de se jeter par les fenêtres alors que le sinistre n'intéresse que les étages inférieurs ou même les caves de l'immeuble.

B) La prévision

1.4 Généralité

Quelle que soit la perfection des mesures de prévention dictes, aussi vigilants que soient ceux qui sont chargés de les faire appliquer, certaines causes imprévisibles et de la part aléatoire qu'il convient d'apporter à tous les événements de la vie quotidienne feront qu'il y aura toujours des incendies.

Une surveillance constante des risques et l'élaboration des mesures à prendre en cas d'apparition d'un sinistre pour le combattre à peine clos et en enrayer la propagation, sont les principes essentiels de la prévision.

La prévision vise un double objectif :

- La découverte de l'incendie dès sa naissance,
- L'attaque immédiate du feu pour obtenir l'extinction rapide.

La prévision prend donc les relais de la prévention lorsque celle-ci mise en échec et son action est donc complémentaire de la sécurité tout en la renforçant.

1.4.1 Définition

La prévision comporte toutes les mesures préparatoires destinées à déceler un risque dès son origine et à assurer, le maximum de rapidité et d'efficacité, la mise en action des moyens d'interventions.

On voit à la lecture de cette définition, l'importance du facteur temps dans la découverte et l'extinction de l'incendie.

1.4.2 Mesures de prévision

Elles sont en nombre de deux :

- La prévision technique,
- La prévision tactique ou opérationnelle

.1.4.2.1 La prévision technique

Elle consiste à :

- déceler l'incendie (détection)
- avertir aussitôt (alarme)
- prévenir au tôt les sapeurs-pompiers (alerte)
- éteindre (mise en œuvre des moyens de secours)

. La détection

a) Humaine

Personnel de surveillance ou de ronde pendant ou après les heures de Travail.

b) Technique

Ce sont des détecteurs, surveillant une zone avec des systèmes

Adaptés aux locaux ou aux marchandises entreposés (sensibles aux Gaz de combustion, ioniques, thermiques, optiques, etc.....)
Tous ces appareils automatiques sont reliés à des centrales de Visualisation permettant de sectoriser très rapidement un début de Sinistre.

Ces dispositifs nécessitent la présence d'un gardiennage ou d'équipes De secours susceptibles d'intervenir immédiatement.

L'alarme.

C'est l'avertissement donné à l'intérieur de l'établissement par toute Personne découvrant un sinistre. Un signal doit pouvoir reprendre L'information et la transmettre à l'ensemble de l'établissement afin Le personnel se conforme aux consignes établies : rassemblement de des Équipes de sécurité, ouverture des portes, coupure de courant, évacuation, etc.....

L'extinction

C'est la mise en œuvre immédiate des moyens de secours propres à L'établissement.

- moyens de première et deuxième interventions
- mise en œuvre du signal d'alarme,
- manœuvre des exutoires de fumées,

De la rapidité d'intervention des secours intérieurs et extérieurs dépendra l'issue de l'opération, en se méfiant du grand défaut de nos concitoyens qui accordent à l'improvisation le soin de faire face à toutes situations, y compris les plus traumatisantes. Il faut au contraire que chacun sache ce qu'il doit faire en face d'un sinistre et pour ce faire, rien ne remplace les exercices périodiques prévus par l'entreprise.

1.4.2.2. La prévision tactique ou opérationnelle

Elle comprend :

- . La bonne connaissance du secteur d'intervention
 - les itinéraires avec mise à jour des sens uniques,
 - les ressources en eau (canalisation maîtresses, ressources locales naturelles ou artificielles),
 - les particularités de certains immeubles classes dangereux et répertoriés.

1.4.2.3. Vérification permanente des moyens d'intervention

- qualification du personnel (manœuvre de garde, contrôle des connaissances),
- bon état du matériel d'incendie (pompe, tuyaux, R.I.A)
- reconnaissance de tous les moyens mis à la disposition des services d'incendie et de secours (colonnes sèches ou humides, points

d'aspiration, R.I.A) au cours des visites ou des commissions communales de sécurité.

1.4.2.4. Etablissement des consignes d'alerte et d'appel

Pour la population des travailleurs des entreprises, il faut que le numéro de téléphone soit connu de tous et pour ce faire il existe des moyens très différents :

- papillons sur les postes téléphoniques
- tracts distribués (billets de tombola, calendriers),
- Périodicité d'annonce dans les journaux locaux

1.4.2.5 Liaison téléphonique

On s'attachera à ce que l'appel des secours extérieurs soit diffusé le plus rapidement possible, soit en créant le (réflexe 18), soit par la mise en place de lignes directes entre les établissements jugés dangereux et les centres de secours.

CHAPITRE 2.

2. PHYSIQUE DE L'INCENDIE.

2.1. Terminologie : feu et incendie

Pourquoi une flamme diffuse de la chaleur ?

Une flamme est le résultat de combustion. Lorsqu' il y'a une flamme, tous les atomes aux alentours s'agitent fortement, ils bougent très vite et provoque de la chaleur. Ces atomes, dits excités, bousculent en quelque sorte leurs voisins en leur transmettant une partie de leur mouvement. Ces atomes bousculés vont à leur tour aller bousculer d'autres, de moins en moins fortement. C'est pourquoi plus on s'éloigne d'une flamme, moins on ressent de la chaleur.

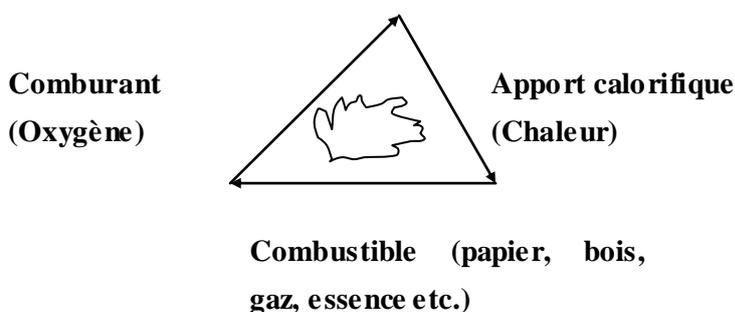
Un feu est une combustion. On le trouve dans les fours, sous forme de **combustion contrôlée**. Dans le domaine de l'incendie, il devient **une combustion incontrôlée**. Il prend alors une dimension telle qu'il peut provoquer un incendie.

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

2.2. Déroulement d'un incendie.

2.2.1. Le triangle du feu

Le mécanisme du feu est schématiquement représenté par le triangle du feu dont les trois côtes représentent respectivement le **combustible**, le **comburant** et l'**énergie d'activation**. La soustraction de seulement un de ses trois éléments entraîne l'extinction immédiate du feu.



Définition.

-Combustible : c'est une matière qui est capable de se consumer (bois, liquide inflammable, gaz.....)

-Comburant : Le seul paramètre à considérer dans la composition de l'air (78% d'azote, 21% d'oxygène, et 1% de gaz rare), c'est l'oxygène.

-Energie d'activation ou (apport calorifique): c'est l'énergie nécessaire au démarrage de la combustion.

L'apport calorifique.

a) température.

La combustion d'un corps dans l'air n'aura lieu que si la température de ce corps ou de l'air dépasse une valeur critique. La température d'une ambiance ou d'un corps est très difficile à déterminer et doit toujours être associée à un concept d'incertitude, de marge d'erreur. L'élément de mesure, par sa seule présence, perturbe la température qu'il est sensé mesurer. C'est ainsi qu'on peut dire qu'un thermomètre, un thermocouple mesure sa propre température.

La température se mesure en degrés centigrades ou en Kelvins ; la littérature anglo-saxonne utilise encore les degrés Fahrenheit du nom du verrier hollandais constructeur de thermomètres.

La mesure d'une température permet :

- 1) D'évaluer un risque de combustion : température d'inflammation, point d'éclair, température d'auto- inflammation, température de pyrolyse.... ;
- 2) De détecter un début d'incendie par les détecteurs d'incendie thermique Ou thermovélo- symétriques ;
- 3) D'initier l'extinction automatique d'un début d'incendie par des sprinklers ou autre installation automatique d'extinction.

Notons au passage quelques températures :

Cigarette 300° C, allumette 900°C, arc électrique 4000°C, surface du soleil 6000°C. Vu la température d'une allumette, il n'est pas raisonnable d'évaluer un incendie par une température. Un incendie est une combustion dont l'importance, comme pour une chaudière, s'exprime par sa puissance instantanée en MW.

Un incendie de logement pourra atteindre une moyenne de 10MW, un incendie de voiture 5MW, un incendie de bâtiment moyen 300MW et un grand incendie d'un complexe industriel, près de 1000MW soit la puissance d'une tranche de centrale nucléaire. Il y'a donc une différence fondamentale entre l'évolution d'un incendie exprime en MW et l'évolution du programme thermique d'un four d'essai, pour déterminer la résistance au feu d'un élément de construction qui s'exprime en °C. Dans le premier cas on a affaire à un incendie réel et, dans le second à un feu qui ne simule qu'un des aspects de l'incendie.

Cette simulation d'incendie dans un four de laboratoire d'essai est réalisée par un programme thermique dont l'évolution est connue sous la désignation internationale conventionnelle de courbes normalisées temps- température (courbes nominales) définies par différentes normes internationales et européennes. Certaines stimulent un feu normal (tel que défini dans l'essai selon la norme NBN 713.020 qui décrit un four et son programme thermique), d'autres simulent un feu d'hydrocarbure qui sert de référence aux pétroliers, d'autre un feu pour compteur de gaz utilisé par les gaziers (courbe standard ISO).

La température anormalement élevée d'un objet par rapport à son environnement peut être décelée par la détection de l'émission thermique de cet objet dont une application pratique qui est la thermographie, entre autres, pour localiser les points d'une installation électrique qui pressentent un échauffement d'un conducteur. Ces thermographies sont utilisées par certains assureurs pour localiser des défauts qui peuvent donner lieu à un incendie ou une explosion. Un principe similaire à la thermographie est exploité dans les caméras infrarouges utilisées par les services de secours pour localiser un corps humain, des animaux ou un foyer dans un incendie.

b) Energie calorifique

L'unité d'énergie, qu'elle soit mécanique, calorifique ou électrique est le Joule qui vaut un Watt. seconde ($1J = 1Ws$). Le joule a remplacé toutes les anciennes variantes de calories. Pour enflammer un mélange gazeux, il suffit d'une fraction de milli joule. Dans le domaine de l'incendie, les Allemands préfèrent utiliser le kWh au lieu du Joule. $1KWh = 3.6 MJ$ ($kWh = 1000W \times 3600s = 3.600.000 Ws = 3,6 MJ$)

c) Rayonnement

Une combustion peut également être initiée par un rayonnement qui s'exprimera en W/cm^2 .

Le rayonnement calorifique émis par un corps A peut être déterminé par la formule de Stefan- Boltzmann $E = e s T^4$

E= rayonnement calorifique émis par le corps A en W/cm^2

e= coefficient d'émission du corps A

s= constante de Stefan- Boltzmann égale à $5.67.10^{12} W / cm^2.K^4$

T= température du corps A en Kelvins

Cette formule est utilisée, par exemple, pour déterminer la distance entre bâtiments pour qu'un bâtiment A en feu transmette au bâtiment B un rayonnement inférieur eu nombre de W/cm^2 susceptible de provoquer une inflammation en B. On estime généralement cette valeur à $1,25W/cm^2$

Ordre de grandeur de quelques rayonnements exprimés en W/cm^2 .

E = 0,07 rayonnement moyen du soleil en été à la surface de la terre en Belgique.

E = 0,1 rayonnement maximum qui peut être supporté indéfiniment par l'homme.

E = 0,5 rayonnement maximum qui peut être supporté quelques secondes par l'homme (environ 8 secondes)

E = 1 rayonnement qui peut être supporté pendant un maximum de 3 secondes par l'homme.

E = 1,25 rayonnement qui porte le bois à une température de 350°C et provoque sa pyrolyse sous une exposition de longue durée. Les gaz de pyrolyse peuvent être enflammés par une flamme pilote.

E = 2,8 rayonnement qui, sous une exposition de longue durée enflamme spontanément le bois sans présence de flamme pilote.

E = 5 rayonnement minimum qui enflamme spontanément, sans présence de flamme pilote, tous les produits combustibles sous une exposition de plus ou moins de longue durée

Le combustible

a) La combustion

Lors d'un incendie, seul les gaz brûlent et non le corps enflammé.

C'est l'élévation de température de ce corps (solide, liquide ou gazeux) qui le fera passer de son état initial à celui de gazeux.

Ce sont précisément ces gaz qui s'enflamment lors de la combustion.

Pour qu'il y ait combustion il faut également que la concentration du mélange « gaz, oxygène, vapeurs (de combustible) » soit comprise entre certaines mesures.

La vitesse de combustion dépend du rapport « surface / volume »

b) gaz

La survenance d'un feu de gaz dépend des caractéristiques physiques du gaz et des caractéristiques de combustion du mélange gazeux. Ces dernières sont conventionnelles et dépendent grandement des appareils et condition d'essai.

Un gaz présente généralement un danger lors de conditions de fonctionnement anormales des installations et, particulièrement lors d'une fuite dans l'air ambiant quand il peut former un mélange gazeux. La fuite se dirigera-t-elle vers le bas (cas du propane) ou vers le haut (cas du gaz naturel, de l'hydrogène). Il faudra donc connaître la densité du gaz par rapport à l'air. Quelques valeurs à la température ambiante et à la pression atmosphérique : CO : 0,97 ; CO₂ : 1,5 ; C₄H₁₀ : 2 ; C₃H₈ : 1,6 ; CH₄ : 0,6.

Une caractéristique du mélange gazeux est la vitesse de diffusion du gaz dans l'air c'est-à-dire la vitesse avec laquelle le mélange gazeux se réalise. Une fuite de propane peut se propager le long du sol environnant sur de grandes distances parce qu'il lui faut un temps long pour que le propane se mélange à l'air. Par contre l'hydrogène se mélangera plus rapidement à l'air. La vitesse de diffusion d'un gaz dans l'air est inversement proportionnelle à la racine carrée de la masse moléculaire du gaz. Voici déjà deux éléments qui pourront caractériser la formation d'un mélange gazeux car ce sera ce mélange qui pourra s'enflammer et non le gaz à l'état pur.

Parmi les caractéristiques de combustion, on notera le pouvoir calorifique du gaz et plus particulièrement son pouvoir calorifique inférieur, l'eau de réac-

tion restant à l'état vapeur. Il s'exprime en MJ/m³. Le pouvoir comburant est défini par la quantité d'air nécessaire à la combustion. Par exemple la combustion d'un m³ de gaz naturel requiert 8 m³ d'air.

Les limites d'inflammation d'un mélange gazeux permettent de déterminer les concentrations de gaz qui, dans des mélanges gazeux, peuvent être enflammés avec ou sans présence d'une flamme pilote. Les valeurs qu'on trouvera dans la littérature différeront donc d'un ouvrage à l'autre selon les appareils et les conditions d'essai utilisés. Ces limites augmentent avec la température et la pression du mélange. Les limites d'inflammation ou limites d'inflammabilité peuvent, par exemple, s'exprimer en % de volume, g/cm³ ou en mg/litre d'air. En prévention incendie, c'est la limite inférieure d'inflammabilité qui est la plus importante.

Dans le cas où le gaz est un n-alcane (formule générale C_nH_{2n+2}) tels que le méthane, propane, butane.... la limite inférieure d'inflammabilité est pratiquement constante à une valeur de 40 à 50 g/m³ ou 37 à 45 mg/l tandis que la limite supérieure augmente sensiblement de 130 g/m³ pour n=1 (méthane) à 380 g/m³ pour n= 10 (décane). La limite inférieure d'un mélange gazeux peut être déterminé par le calcul. Par exemple, la limite inférieure d'inflammabilité d'un mélange gazeux, en volume, de 50% de propane (limite inférieure = 2.1% en volume) + 40% de n- butane (limite inférieure = 1.8% en volume + 10% d'éthane (limite inférieure = 3% en volume) vaut :

$$L = \frac{100}{50 / 2,1 + 40 / 1,8 + 10 / 3} = 2\% \text{ vol}$$

Lorsque la température atteint une valeur critique le mélange gazeux peut s'enflammer sans présence de flamme pilote. Cette température est appelée « température d'auto- inflammation ou point de combustion spontanée ». C'est la température à laquelle l'intérieur d'un réservoir conventionnel, contenant le mélange gazeux, doit être porté pour que ce mélange s'enflamme. On constate immédiatement que cette valeur est très conventionnelle et dépend de la forme du réservoir, du gradient de la température auquel le réservoir est soumis ainsi que la durée d'exposition.

Nous avons vu que l'apport calorifique pouvait également être fourni par une source d'énergie au lieu d'une augmentation de la température ambiante. Dans le cas des mélanges gazeux cette énergie d'inflammation est très faible. Par exemple pour enflammer un mélange propane- air, il suffit d'une étincelle de 0,25MJ. Pour un mélange propane- oxygène, 0,001MJ suffisent. L'augmentation de fréquence de répétition de ces apports énergétiques sous forme d'étincelle favorise également l'inflammation.

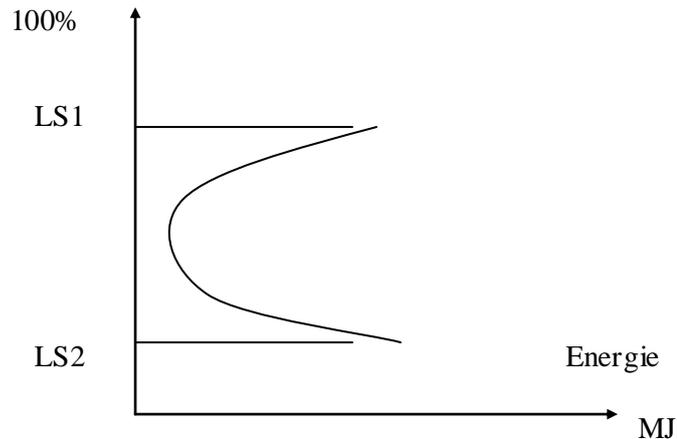


Figure 1 : limites d'inflammation en fonction de l'énergie en MJ.

La figure ci-dessus montre que cette énergie est minimale pour une concentration située à mi-chemin entre les deux limites d'inflammation LS1 et LS2 du mélange. Elle dépend également de la concentration d'oxygène dans l'air.

Les mesures de prévention associées à l'usage de gaz inflammables seront caractérisées par l'évitement de fuites, une ventilation qui évite que le mélange gazeux reste dans ses limites d'inflammabilité et la non présence de sources d'inflammation.

c) Liquides

Les combustibles liquides doivent généralement passer à l'état gazeux afin de brûler ; comme les vapeurs d'essence qui sont introduites dans le cylindre d'un moteur ou la combustion est provoquée par une étincelle. Ce n'est pas l'essence même qui brûle mais ses vapeurs mélangés à l'air. La combustion totale d'un kg de ces combustibles nécessite de 16 à 23 kg d'air.

Ce sont les gaz issus des liquides qui se dégradent qui vont brûler et non le liquide proprement dit.

Les caractéristiques physiques des liquides qui nous intéressent sont la densité par rapport à l'eau pour savoir si le liquide flotte ou non sur l'eau d'extinction, sa miscibilité dans l'eau qui nécessitera l'usage des mousses d'extinction qui ne se dissolvent pas dans l'eau, la densité des vapeurs qui est toujours supérieure à l'unité et conditionne donc leur propagation vers les parties basses, la température d'ébullition à laquelle l'entièreté du liquide passe de la phase liquide à la phase vapeur et la tension de vapeur qui conditionne la vitesse d'évaporation dans l'air car le mélange gazeux se forme d'autant plus, rapidement que la tension de vapeur du liquide est élevée.

Enfin une autre caractéristique des gaz et leur pouvoir calorifique qui s'exprime en MJ/m³ ou MJ/l et qui intervient plus particulièrement dans le chapitre suivant consacré au développement de l'incendie.

Un liquide, en soi et d'un point de vue purement physique, n'est pas inflammable. C'est le mélange des vapeurs du liquide dans l'air qui peut former un mélange gazeux inflammable et on en revient, pour les liquides, à ce qui a été dit pour les gaz en ce qui concerne les limites d'inflammabilité, les énergies d'inflammation et les températures d'auto-inflammation ou point de combustion spontanée. Il s'ensuit que pour qu'un liquide présente un danger immédiat, il faut qu'il s'évapore et que ses vapeurs forment, avec l'air ambiant, un mélange gazeux inflammable. Vu que la formation de ce mélange gazeux est tributaire de l'évaporation du liquide il serait intéressant de connaître la température la plus basse à laquelle le liquide fournit suffisamment de vapeurs pour former, avec l'air ambiant, un mélange gazeux qui s'enflamme sous l'effet d'une source d'énergie calorifique telle qu'une flamme pilote. C'est en fait la définition du point d'éclair. Le point d'éclair est un concept pétrolier et les premiers appareils, conventionnels une fois de plus, qui permettent de définir un point d'éclair ont été décrits dans les normes pétrolières. Il faut donc toujours préciser l'appareil qui a été utilisé quand on donne une valeur de point d'éclair. La valeur dépend non seulement de l'appareil mais également de la bonne vue de l'opérateur qui doit déceler le début d'inflammation.

Le point d'éclair (PE) : c'est la température à laquelle des vapeurs émises en quantité suffisante par un liquide inflammable, s'enflamme au contact d'une flamme ou d'une étincelle.

Exemple :

-PE gasoil : + 70°

-PE éther : - 45°

-PE essence : -38°

Le point d'auto-inflammation (AI) : c'est la température à laquelle des vapeurs émises en quantité suffisante par un liquide inflammable, s'enflamme spontanément. (Chauffe par exemple au contact d'une paroi chaude).

Exemple : Point AI de l'éther : +115° (brûle sans apport de flamme)

L'état de dispersion dans l'air intervient quand le liquide y est dispersé sous forme de fines gouttelettes pour former un brouillard. Cette propriété est utilisée dans les brûleurs à mazout. Elle est à l'origine du début d'incendie qui a provoqué la catastrophe minière de Marcinelle.

Dans la figure ci-dessous (concentration du liquide dans l'air par rapport à la température de l'air), considérons un mélange de $y\%$ ne volume de liquide dans l'air sous forme de brouillard (trait a) c'est-à-dire des fines gouttelettes de liquide réparties dans l'air.

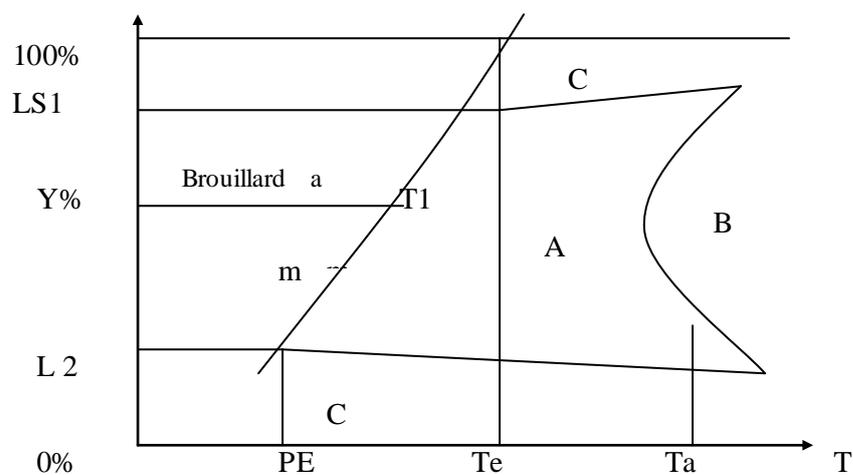


Figure 2 : Concentration du liquide dans l'air par rapport à la température de l'air.

En augmentant la température de ce mélange, on atteindra une température $T1$ à partir de laquelle les gouttelettes de liquide se vaporisent. On obtient un mélange

gazeux. En rejetant cette opération pour différentes concentrations liquide/air, on obtient la courbe m. Pour une concentration de 100% de liquide dans l'air le point m de la courbe représente la température d'ébullition T_e du liquide. Si on provoque une étincelle dans la zone « mélange gazeux » située à droite de la courbe m, on constate que le mélange gazeux s'enflamme pour tous les points situés dans la zone A et ne s'enflamme pas dans la zone C. Les séparations de ces zones constituent en fait les limites d'inflammabilité qui, on le voit, varient en fonction de la température du mélange.

L'utilité de cette figure est de mettre en évidence le point critique PE qui correspond à la température la plus basse à laquelle le mélange gazeux peut s'enflammer sous l'effet d'une source d'énergie (étincelle ou flamme) conventionnelle. Le point Y est le point d'éclair. Cette figure permet de définir :

- Les limites d'inflammabilité LS1 et L2 ;
- La variation de ces limites en fonction de la température ;
- Le point d'éclair PE,

Qui sont toutes des grandeurs conventionnelles dont la valeur est fortement influencée les appareils utilisés pour les définir. Ces appareils sont généralement décrits dans des normes ISO, EN ou NBN.

Mais la notion de point d'éclair ne satisfait pas toujours le praticien car l'inflammation constatée par l'opérateur ne se maintient pas dans le temps. Pour obtenir une combustion entretenue du mélange gazeux il faut que le liquide soit porté à une température légèrement supérieure au point d'éclair. C'est le point de feu situé à droite du point d'éclair. Concept très peu utilisé vu que sa valeur s'écarte de celle du point d'éclair de l'erreur de mesure de celui-ci.

Nous avons défini ci-dessus la zone A dans laquelle le mélange gazeux est inflammable en présence d'une source d'énergie calorifique. Quand la température augmente cette source d'énergie n'est plus nécessaire et on est dans la zone B où le mélange est réputé auto-inflammable. On constate que le point d'auto-inflammation T_a dépend de la concentration du gaz dans le mélange gazeux.

PREVENTION

Les mesures de prévention associées à l'usage de liquides inflammables seront caractérisés par la quantité de liquide, son mode de stockage ou conditionnement, son point d'éclair, les possibilités de ventilation aux points bas qui permettront d'éviter qu'un mélange gazeux, résultant d'une fuite éventuelle, reste dans les limites d'inflammabilité et la non présence de sources d'inflammation en particulier aux points bas vu que les vapeurs de liquides inflammables sont plus lourdes que l'air.

Il est intéressant de noter les valeurs du point d'éclair d'une solution eau- alcool en fonction de la concentration du mélange.

Concentration d'alcool	Point d'éclair
En % en poids	en °C
100	12
90	17

70	21
50	24
30	29
10	47
5	60

Et d'un mélange diesel-essence

Concentration d'essence Point d'éclair
En % en volume °C

0	70
1	60
5	35

L'eau étant le principal agent d'extinction d'un incendie, il n'est pas inutile de rappeler que la vapeur d'eau prend un volume égal à 1.700 fois le volume qu'elle a sous forme de liquide.

C'est ce qui explique que de l'eau jetée dans une friture à 160°C se vaporise immédiatement à l'intérieur de la graisse en prenant une expansion de 1700 fois transformant un feu d'une infinité de gouttelettes qui forme une impressionnante et énorme flamme. Dans le cas d'une friteuse domestique (graisse : 16MJ/l) la dispersion de la graisse due à la brusque évaporation d'un demi-verre d'eau peut provoquer la combustion brusque de ½ litre en une seconde soit une puissance de 8MJ/s ou 8.000.000 W.

d) Solides

La combustibilité d'un solide est une valeur physique qui se définit conventionnellement dans une bombe calorimétrique. Elle s'exprime par la quantité d'énergie thermique dégagée par la combustion complète du solide dans l'oxygène. C'est une valeur qui est prise en considération dans la législation Française. Dans les autres pays, on définit une combustibilité conventionnelle qui répond non pas à des principes de physique pure mais aux conditions rencontrées lors d'un incendie. Comme l'objectif est de rechercher des produits de construction non combustibles, l'essai est appelé essai de non combustibilité. Il consiste à placer un petit échantillon de solide cubique d'environ 5 cm de cote dans un four à une température de 750°C et à constater une augmentation de la température du four ou une présence de flamme.

Cet essai est décrit dans une ancienne norme internationale ISO 1182.

Suite à cet essai, le produit sera combustible ou non combustible. Son cote conventionnel sera illustré par le fait qu'un produit combustible dans une bombe calorimétrique pourra être classé comme étant non-combustible dans l'essai ISO1182.

L'inflammabilité est une autre caractéristique des solides. On devrait plutôt dire leur facilité d'inflammation car, dans ce cas, il existe une classification : un solide peut être plus au moins facilement inflammable. Il existe de très nombreux essais

conventionnels qui permettent de mesurer le degré d'inflammabilité. Chaque pays a son essai, exemple : essais Français, essais Britanniques etc.....

Ces deux concepts de combustibilité et d'inflammabilité font partie de ce qu'on appelle la réaction au feu des matériaux.

On ne perdra jamais de vue que la combustibilité et l'inflammabilité ne constituent pas des propriétés intrinsèques des matériaux. Certains chercheurs, qui pensaient « feu » au lieu de penser « incendie » avaient mis au point une sorte de boîte noire qui donnait un chiffre définissant la réaction au feu du matériau testé. Ce concept n'a jamais été reconnu par la profession. La facilité d'inflammation d'un matériau dépend de son mode de placement, de son support, de son orientation, du mode d'attaque thermique. Par exemple un textile combustible posé sur une paroi isolante s'enflammera moins facilement que s'il est posé sur une paroi métallique.

Chaque pays donne une définition différente de la réaction au feu. Exemple de la Belgique [Jean.F. (2006)] ;

La réaction au feu d'un matériau de construction est l'ensemble des propriétés d'un matériau de construction considérées en relation avec la naissance et le développement d'un incendie.

Cette définition est très restrictive et totalement inadaptée à une saine évaluation de la réaction des matériaux à l'incendie et non plus à un feu de faible puissance. La définition légale de la réaction au feu des matériaux de construction a été entièrement modifiée, au niveau européen, d'une façon beaucoup plus réaliste dans le cadre de l'application de la directive européenne sur les produits de construction. Elle tiendra compte de la densité et la toxicité des fumées qui est un élément fondamental que les législations de certains pays négligent totalement. Un classement particulier de la réaction au feu tiendra également compte de la formation de gouttes enflammées lors de la combustion des matériaux.

L'évaluation légale actuelle de la réaction au feu, dans l'unique cadre d'application des « Normes de base », s'énonce comme suit :

Comme pour le gaz et les liquides on retrouve pour les solides la notion de **pouvoir calorifique** qui s'exprime en MJ/kg et qui intervient, également, plus particulièrement dans le chapitre suivant consacré au développement de l'incendie. Retenons comme ordre de grandeur la valeur de 17 à 20MJ/kg pour le papier et le bois.

Nous devons toutefois ajouter d'autres caractéristiques physiques importantes des solides, dont l'état de division. L'acier massif n'est pas combustible tandis que la laine d'acier utilisée par la ménagère s'enflammera très rapidement au contact des pôles d'une pile de 4,5 V et de la poudre d'acier s'enflammera encore plus facilement et rapidement. L'état de division des solides intervient également pour le bois : poutre en bois massif, feuille de bois de recouvrement, copeaux de bois, sciures de bois. Un mélange de poussières de bois, farine, sucre, céréales.... Dans l'air s'enflammera très rapidement sous forme d'explosion.

PREVENTION

Les machines à bois seront toujours équipées de dispositifs d'évacuation des copeaux et poussières de bois.

Une inflammation spontanée pourra se produire quand un solide combustible est soumis à une action continue d'oxydation. Ce sera le cas de chiffon gras qui sera le siège d'une combustion dont la chaleur ne pourra pas s'évacuer ce qui aura pour conséquence une augmentation de la température de ces chiffons jusqu'à l'inflammation spontanée du corps gras.

PREVENTION

Les chiffons gras seront toujours contenus dans les récipients métalliques fermes par un couvercle.

La **conductibilité thermique** d'un solide conditionne les transferts de chaleur. Les isolants thermiques sont utilisés pour retarder l'échauffement de structures métalliques qui peuvent perdre leur stabilité au feu quand leur température dépasse les 500°C. Les conducteurs pourront favoriser la naissance d'un incendie. Ce sera le cas de travaux de soudure effectués sur une canalisation métallique sur le parcours de laquelle se trouvent des produits combustibles derrière une paroi qui cache ces produits au soudeur.

Le **coefficient de dilatation** peut intervenir pour disloquer les éléments supportés par des structures métalliques ou en béton armé soumis à l'incendie.

PREVENTION

Le danger des dilatations de charpentes est pris en compte dans le concept des murs coupe-feu des assureurs qui est beaucoup plus sérieux et plus complet que la seule référence légale de résistance au feu RF déterminée au laboratoire.

Dans le cas du bois, la teneur en eau a également son importance. Le risque d'incendie des bois et taillis augmente en période de sécheresse. On ne laissera jamais les herbes sèches ou buisson près d'un réservoir de propane ou d'installations de process thermiques

2.3. Développement de l'incendie.

Nous avons dit plus haut que le développement de l'incendie était conditionné par la facilité d'inflammation des produits combustibles entourant le point de naissance de l'incendie. En d'autres termes il faut que le feu initial se développe d'une façon incontrôlée pour donner naissance à l'incendie et, une fois ce stade atteint, que la chaleur dégagée par ce foyer d'incendie puisse enflammer les objets environnants qui alimentent l'incendie.

Cette réaction peut être évaluée conventionnellement une fois de plus par des essais en laboratoire appelés essais de réaction au feu. Elle intervient donc lors de la naissance et lors du développement de l'incendie. Elle concerne principalement les matériaux de construction et d'aménagement intérieur.

Le développement de l'incendie est donc conditionné par la combustibilité ou la non combustibilité des matériaux environnants ainsi que par leur facilité d'inflammation. Mais ces concepts ne suffisent pas.

Le concept le plus important qui conditionne le développement de l'incendie est la charge d'incendie ou charge calorifique (MJ). Elle permet d'évaluer la chaleur qui pourrait être dégagée par la combustion des produits qui entourent le foyer d'incendie. Cette charge calorifique est le principal élément chiffrable du risque d'incendie. Elle se calcule aisément : chaque produit a un pouvoir calorifique donné (MJ/m³, en MJ/l ou en MJ/kg) que nous avons défini ci-dessus pour les gaz, les liquides et les solides. Il suffit d'en définir la quantité en mètres cubes, en litres ou en kilogrammes et de les multiplier. On obtiendra ainsi la charge calorifique (MJ). En divisant ce nombre par la surface de plancher on obtiendra la densité de charge calorifique (MJ/m²) de plancher. Un nombre trop élevé de MJ/m² peut constituer un danger. On distingue la charge calorifique immobilière qui se rapporte à l'immeuble et la charge calorifique mobilière qui se rapporte au contenu. Et le législateur peut imposer des mesures de sécurité à partir d'une valeur donnée et, même, interdire le dépassement d'un certain seuil. C'est ce qui est réalisé dans de nombreuses prescriptions étrangères. En France, pour les immeubles de plus de 50 m de haut, le danger de développement du feu est limité en fixant la valeur maximale de la densité de charge calorifique à 25 MJ/m² pour les façades (ART GH12) et 255MJ/m² de charge calorifique immobilière (ART GH 16) .

Retenons les ordres de grandeur suivants de densités de charge calorifique par m² de plancher exprimées en MJ/m².

Habitations, bureaux	500 à 900
Fabrique de meubles	1300
Imprimerie	2800
Stockages en hauteur	8000 à 60.000

Il est intéressant d'évaluer la puissance de certaines combustions [Herid.A.] :

Allumette : 30 mg x 17 J/mg qui brûle pendant 30s : $30 \times 17 / 30 = 17 \text{ W}$

Logement de 20 m² : 20m² x 500MJ/m² qui brûle pendant 17 min soit environ 1000s : 10MW.

Entrepôt de 1000 tonnes de produits d'une charge calorifique moyenne de 17 MJ/kg qui brûle pendant 4 heures : $17.000.000 \text{ MJ} / (4 \times 3600) \text{ s} = \text{environ } 1.200\text{MW}$.

La configuration géométrique des objets peut influencer considérablement le développement du foyer initial.

Une allumette pourra difficilement enflammer une pièce de bois isolée mais elle enflammera deux pièces de bois placées à courte distance. On peut remplacer les pièces de bois par les chaises empilées ou des palettes d'un stockage et on obtiendra le même résultat d'activation du foyer initial. C'est ce qui incite les assureurs à demander le sprinklage des stockages en hauteur dont le développement de l'incendie ne peut être efficacement combattu par les seuls moyens humains.

L'incendie qui a ravagé un dépôt des usines Michelin à Clermont Ferrand en France début 2000 illustre ce risque particulier.

Le degré d'isolation thermique du local où l'incendie prend naissance conditionne sensiblement la vitesse de développement de cet incendie. Plus le local est isolé et moins la chaleur dégagée pourra être évacuée par les parois et plus la température du local augmentera rapidement.

Enfin, c'est au stade de développement de l'incendie que l'effet des fumées se fait sentir. Les fumées constituent une des principales gênes pour la mise en sécurité des occupants et l'intervention des secours. Cette gêne résulte de leur température, leur opacité, leur teneur en suies et leur toxicité (teneur en oxyde de carbone CO). La gestion de l'évacuation des fumées constitue un élément primordial dans la lutte contre l'incendie.

La législation actuelle n'est pas particulièrement loquace à ce sujet. Elle sera mieux prise en compte dans le cadre de l'application pratique de la directive « produits de construction »

2.4. PROPAGATION DE L'INCENDIE.

2.4.1 : Modes de propagation.

Un incendie passe par une phase de développement, puis de régression, entraînant une élévation suivie d'une baisse de température [Drysdale. D. (1996)]

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

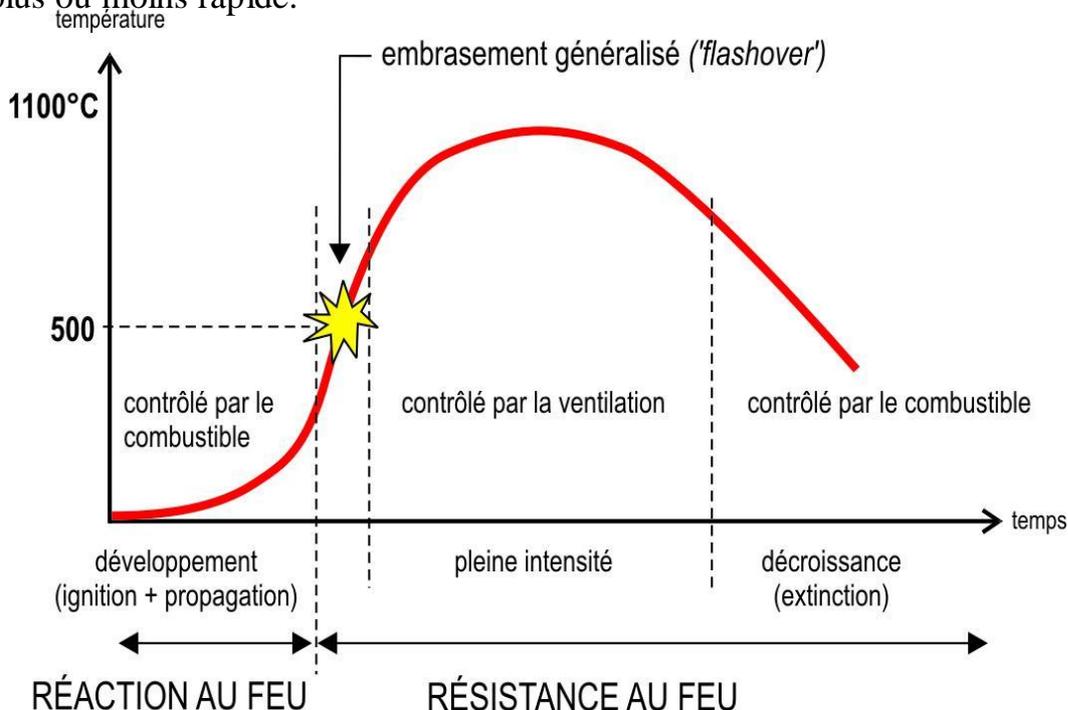


Figure :3 Propagation de l'incendie

La sévérité du feu et la durée de ses 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.

1ère PHASE : Développement (ignition + propagation)

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. Le rayonnement ou le contact des flammes atteint les matières proches, les gaz chauds se dégagent et emplissent le volume, annonçant la deuxième phase.

Faits	<ul style="list-style-type: none"> -Première manifestation du feu, le combustible commence à brûler, la température à l'intérieur du local varie d'un point à un autre -Propagation du feu
Moyens de sécurité (Mesures actives)	<ul style="list-style-type: none"> -Détection automatique -Gardiennage -Extincteurs -Signalisation -Désenfumage - Sprinklers -Compartimentage -Dispositions constructives, liaison entre matériaux -Limitation de la charge combustible
Actions	<ul style="list-style-type: none"> -Appel des pompiers -Evacuation des personnes avant que la température Atteigne 80-100°C -Lutte des pompiers à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment.

2ème PHASE : pleine intensité (ou embrasement général)

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.

Faits	<ul style="list-style-type: none"> -la température dans le local en feu augmente - les couches supérieures de gaz s'enflamment -le front des flammes qui se propage le long du plafond est le roll-over, il précède, aux environs de 500°C , un embrasement spontané appelé « embrasement généralisé » ou flash-over -le feu se développe complètement
Moyens de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> -compartimentage -lutte des pompiers à l'extérieur -dispositions constructives
Conséquences	<ul style="list-style-type: none"> -après l'embrasement généralisé, la température des gaz augmente rapidement depuis 500°C jusqu'à un pic pouvant dépasser 1000°C et devient quasi uniforme dans tout le volume -avec le plein développement du feu et au bout d'un certain temps, les structures porteuses pourront se déformer

3^{ème} PHASE : Décroissance (retombée du feu)

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

Faits	-quand le combustible est consommé à 70% , la température des gaz baisse
Conséquences	<ul style="list-style-type: none"> -l'acier après refroidissement, retrouve ses propriétés mécaniques d'origine et sa capacité portante s'il n'a pas été exagérément déformé -les ossatures métalliques peuvent être réparées ou remplacées partiellement, les parties les plus endommagées étant récupérées et recyclées.

2.4.2 : la modélisation d'un incendie

La variation de température avec le temps lors d'un incendie est modélisée dans les

exigences réglementaires actuelles par la **courbe ISO 834** (reconnue internationalement), dite d'incendie conventionnel. Cette courbe logarithmique est utilisée pour les essais en laboratoire.

La courbe ISO 834 matérialise le rapport temps/température suivant ;

5 min	576°C	90 min	1006°C
10 min	678°C	120 min	1049°C
30 min	842°C	240 min	1153°C
60 min	945°C		

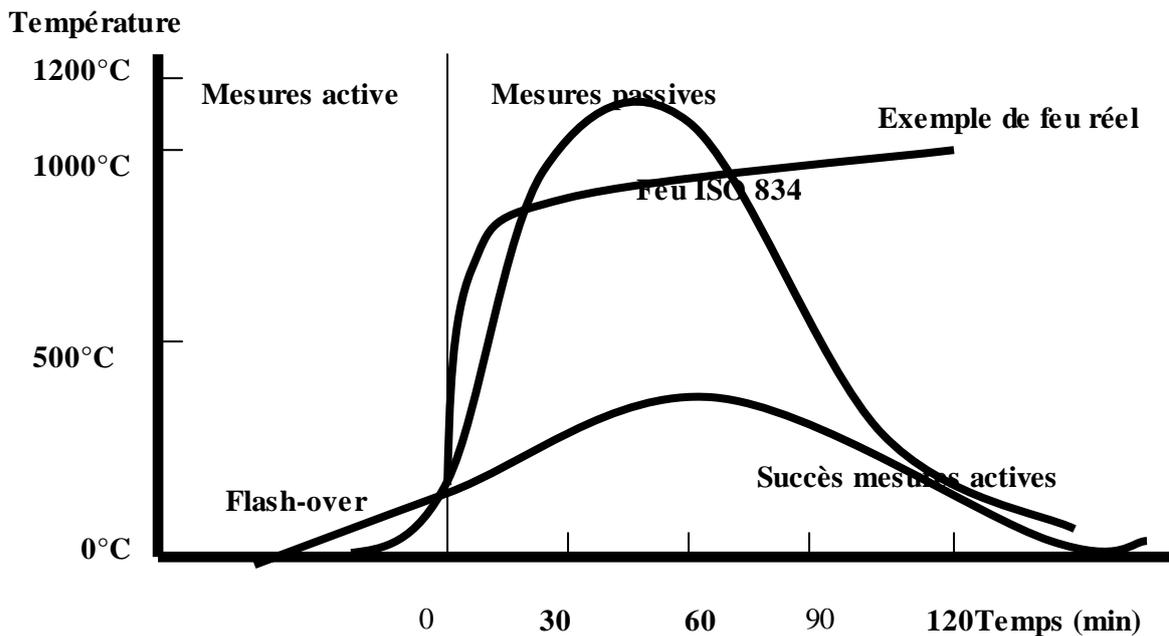


Figure : 4 Développement d'un feu réel par rapport à la courbe ISO 834 et influence des mesures de protection actives et passives

La courbe ISO 834 présente l'avantage de ne mettre en jeu directement qu'un seul paramètre (le débit combustible) et facilite la reproductibilité et la comparaison des résultats d'essais.

2.4.3 : Modélisation d'un incendie réel

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

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.

Les mesures actives doivent permettre aux occupants d'évacuer le local en feu bien avant l'embrassement généralisé (flash-over). Certaines d'entre elles comme les

sprinklers peuvent maîtriser ou éteindre un début d'incendie. Les effets des mesures passives seront utiles à partir du flash-over.

a) 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'ouvertures 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 qui exercent une influence décisive sur la sévérité du feu.

Destination du compartiment	Charge incendie (MJ/m ²)	Charge incendie (kg de bois /m ²)
Habitation	780	45
Hôpital (chambre)	230	13
Hôtel (chambre)	310	18
Bibliothèque	1500	86
Bureaux	420	24
Ecole (classes)	285	16
Centre commercial	600	34
Théâtre - cinéma	300	17
Transport (espace public)	100	6

2.4.4. Propagation dans un bâtiment.

Un des principes de prévention d'incendie consiste à limiter le développement de l'incendie dans le local où il a pris naissance et d'en limiter la puissance instantanée (MW). Le développement sera d'autant plus limité que la surface du local sera réduite et que les parois pourront résister à la propagation du feu à l'extérieur. Mais le développement de l'incendie peut être tel que la structure du bâtiment dans laquelle il s'est développé ne résiste pas à cet incendie. Cette résistance à l'incendie est évaluée par des essais en laboratoire en utilisant des feux conventionnels. C'est la résistance au feu des éléments structurels de la construction qui peuvent avoir une fonction séparative et éventuellement portante (murs, cloisons, parois) ou une fonction portante : charpente, poteau, poutre.

La résistance au feu d'un élément de construction, déterminée en laboratoire d'essai est le temps pendant lequel cet élément remplit sa fonction quand il est soumis à des sollicitations thermiques et mécaniques représentatives de l'incendie. Cette fonction est évaluée sur la base d'un certain nombre de critères conventionnels. Ce sont la stabilité, l'étanchéité aux flammes et l'isolation thermique. Pour des raisons de classement, ces temps sont définis par différents degrés de résistance au feu symbolisé par le sigle Rf. Ces degrés sont **6h, 4h, 3h, 2h, 1h, 1/2h et 1/4h.**

Les valeurs en gras sont les plus utilisés. Une résistance au feu mesurée de 55 min 32s donnera un classement Rf 1/2h.

- a) Une première conséquence est de définir la notion de compartiment qui est un local dont les parois présentent un certain degré de résistance au feu Rf.
- b) Une seconde conséquence est de limiter le risque (limiter la surface au sol des locaux).
- c) Une troisième conséquence est de limiter le développement de l'incendie en limitant le nombre de MJ/m² de la charge calorifique.

La résistance au feu d'un élément de construction est mesurée lors d'un essai réalisé dans un four soumis à un programme thermique de la courbe temps – température que nous allons définir ultérieurement. Cette courbe est universellement utilisée. Il n'en n'est pas de même des fours d'essai est des sollicitations mécaniques qui diffèrent d'un pays à l'autre. Une nouvelle définition de la résistance au feu des éléments de construction se met en place dans le cadre de la directive européenne des produits de construction. Les critères techniques sont déjà explicites dans les normes européennes EN. Mais les laboratoires renâclent à s'adapter et les pays n'acceptent actuellement que les essais réalisés suivant leurs propres normes et, souvent, dans leurs laboratoires nationaux. La commission européenne est néanmoins très active pour aboutir à une seule définition, évaluation et acceptation au niveau européen.

Il importe de bien distinguer deux notions différentes : la réaction au feu des matériaux de construction qui représente l'aliment qu'ils apportent à l'incendie et la résistance au feu des éléments de construction qui représente une fonction portante et/ ou séparante. Ces concepts seront maintenus dans les règles futures.

La référence actuelle au seul essai au feu en laboratoire annihile toute réflexion sur la résistance réelle des éléments de construction à l'incendie qui pourra mieux être évalué par des méthodes relevant de l'ingénierie de l'incendie ou « fire engineering »

2.4.5. Propagation d'un bâtiment a un autre

Un bâtiment en feu peut soumettre son environnement à un rayonnement thermique, à des retombées de brandons enflammés ou un contact direct avec les flammes [J. H. McGuire (1962)]

L'incendie peut se propager à la toiture des bâtiments voisins. D'où l'imposition d'un classement de réaction au feu A1. Une prescription complémentaire concerne la toiture des bâtiments de faible hauteur qui peut être incendié par des brandons enflammés.

2.4.5. 1. La propagation de l'incendie par déplacement des substances.

- a) Le déplacement des solides (projection de matières incandescentes) :

Les brandons sont des fragments de solides en ignition pouvant franchir suivant la force du vent des distances souvent importantes (projection de fragments de bois à 100 m), les escarbilles sont des petites particules incandescentes, leurs dangers se limitent à quelques mètres (idem mais 10 cm)

b) Le déplacement des liquides :

C'est l'épandage du liquide qui augmente la surface d'évaporation dont accroît le développement des flammes.

c) Le déplacement des gaz :

Déplacement d'une nappe de gaz qui sont imbrûlés (un apport en O² les brûlerait), c'est la convection

2.4.5.2. La propagation de l'incendie par transmission de la chaleur

a) par conduction :

Transfert de chaleur par la matière solide

b) Par convection :

Transfert de chaleur par les gaz chaud

d) Par rayonnement :

Déplacement de chaleur par rayon ultraviolet, infrarouge

2.5. Les différentes classement de feu

Les feux sont classés en trois catégories :

1°) Les feux de classe A (feux secs)

2°) Les feux de classe B (feux gras) et les feux de classe F (auxiliaires de cuisson)

3°) Les feux de classe C (feux de gaz)

4°) Les feux de classe D (feux de métaux spéciaux)

5°) Définitions

Cette classification est celle que l'on adopte en France.

A chaque type de feu correspond une catégorie spécifique d'extincteur.

1°- Les feux de « classe A » sont issus de combustibles ordinaires, généralement à base de cellulose tels que le bois, les vêtements ou le papier.

Le principal moyen d'extinction des feux de classe A est l'eau, que l'on utilise avec ou sans additifs.

L'eau, par absorption de la chaleur des matériaux en combustion, refroidit et éteint le feu. Le fait d'ajouter un additif à l'eau permet d'augmenter la tension superficielle.

cielle de l'eau. Ceci a pour effet de réduire la grosseur des gouttes d'eau ce qui facilite son imprégnation et augmente son pouvoir refroidissant.

Lorsque l'eau est mélangée à un additif elle est appelée « Eau mouillante »

2°- Les feux de « classe B et F » ont pour combustible des liquides inflammables ou solides liquéfiables, produits dérivés du Brut (pétrole), des huiles ou des graisses.

On éteint les feux de « classe B et F » par élimination de l'air et ralentissement de la libération des vapeurs inflammables ou par interruption de la réaction en chaîne de la combustion.

Il existe principalement trois sortes d'agents extincteurs :

- Les poudres (Produits chimiques utilisés pour rompre la réaction moléculaire du feu.)

- Le gaz (Ignifugation)

- Les mousses

Les poudres restent l'agent extincteur le plus utilisé pour les feux de « classe B ».

Les extincteurs polyvalents sont utilisables pour les feux de « classe B, C, ou F »

Le dioxyde de carbone que l'on utilise comprimé, isole le feu de l'oxygène présent dans l'air autour du feu. Les autres sortes d'agents extincteurs sont à base de bicarbonate de sodium ou de potassium.

La plupart des extincteurs chimiques utilisent des produits sous pression pour assurer l'éjection des produits, le feu s'éteint en général par interruption de la réaction en chaîne de la combustion.

Les extincteurs à mousse utilisent un agent aqueux moussant qui crée une barrière isolant l'oxygène du feu.

3°- Les feux de « classe C » sont les feux de Gaz (méthane, propane, butane, gaz de ville, etc.).

D'une façon générale, les produits efficaces pour l'extinction des feux de classe B sont également efficaces contre les feux de classe C.

Il existe aussi maintenant des poudres polyvalentes efficaces contre les feux de toutes natures : classe A, B, et C.

Contre les feux d'origine électrique le meilleur et le plus efficace des agents extincteurs est le CO² (la neige carbonique). Son avantage majeur est qu'il ne fait aucun dégât. Il est cependant totalement inefficace sur les feux de classe A.

Le CO² ne brûle pas et n'alimente pas la combustion.

L'extincteur à CO² est un cylindre en acier rempli dioxyde de carbone liquide. Lorsque ce dernier est pulvérisé, il se répand rapidement et provoque un important abaissement de la température qui le solidifie en neige carbonique. Cette neige se vaporise en contact des produits en feu en formant une couverture de gaz qui refroidit et étouffe les flammes.

Sa capacité de refroidissement est à peu près égale à deux fois celle de l'eau sous forme de glace.

Sa particularité est de passer directement de l'état solide (neige carbonique) à l'état gazeux sans passer par l'état liquide.

4°-Les feux de « classe D » sont les feux de métaux spéciaux (sodium, magnésium, phosphore...) pour lesquels il faut des moyens d'extinction particuliers.

5°- Définitions.

Inhibition : Principe qui consiste à rompre la réaction chimique du feu (Réaction Moléculaire) soit par un gaz soit par une autre molécule.

Ignifugation : Procédé qui permet de ralentir ou de stopper la combustion pendant un temps donné. L'ignifugation peut se faire par peinture, par trempage ou directement dans la masse. Selon le procédé utilisé la durée d'efficacité de l'ignifugation est plus ou moins longue.

Incombustible : Matériau dont la combustion n'est pas possible.

Ininflammable : matériau de combustion lente, sans flammes.

Inflammable : présence de flammes lors de la combustion.

Tension superficielle : « comportement des molécules constituant la couche superficielle d'un liquide (surface) »

Explication : La cohésion d'un liquide n'est pas soumise aux mêmes forces, qu'une molécule située à la surface d'un liquide :

- la résultante des forces agissant sur une molécule située au centre d'un liquide est nulle.
- En revanche, la résultante des forces s'exerçant sur une molécule située à la surface d'un liquide est non nulle et dirigée vers le haut (vers l'extérieur du liquide)

- Ce qui a pour conséquence de réduire la grosseur des gouttes d'eau.
- Donc d'augmenter son pouvoir d'imprégnation.
- Et donc finalement d'augmenter son pouvoir refroidissant.

Inertage : Substitution du comburant par un gaz inerte

2. 6 Les deux principes fondamentaux de la protection passive

2.6.1 : La réaction au feu

Elle classe et définit les matériaux de construction en fonction de leur combustibilité c'est-à-dire le comportement du matériau en tant qu'aliment au feu.

Il sera pris en compte le temps nécessaire avant le début de la combustion et la vitesse à laquelle la combustion se développe.

Plus les matériaux sont riches en oxygène, plus leur inflammation sera propice.

La réaction au feu prend en compte tous les événements qui se produisent à partir

de l'élévation en température jusqu'à la destruction complète du matériau.

Leur classification prend en compte :

- La combustibilité : la masse combustible, l'énergie apportée au feu
- l'inflammabilité : longueur et durée des flammes

Les Euroclasses sont la nouvelle définition européenne des classements des matériaux en matière de réaction au feu :

On distingue :

Les produits de constructions

Les produits d'aménagements

Produits de constructions : tout produit fabriqué en vue d'être incorporé, assemblé, utilisé ou installé de façon durable dans les ouvrages tant de bâtiment que de génie civil

Produits d'aménagements : tout produit non visé ci-dessus, mais dans les conditions d'emploi sont prescrites par les règlements de sécurité contre l'incendie.

1) Les produits de constructions

Ils sont séparés en deux grandes familles : celle des revêtements de sol et celle des autres produits.

2) Les produits d'aménagements

Ces produits n'étant pas pris en compte dans le classement européen, ils restent soumis au classement M.

a) Classification des matériaux

- M0 : Matériaux incombustibles (acier, pierre, béton armé, zinc etc)
- M1 : Matériaux non inflammables (bois ignifugé, plaques de plâtre etc)
- M2 : Matériaux difficilement inflammables (bois ignifugé, laine etc)
- M3 : Matériaux moyennement inflammables (bois , feutre etc)
- M4 : Matériaux facilement inflammables (bois, plastique, carton etc)
- Non classé : Matériaux qui ne peuvent être classés comme M4 et dont leurs caractéristiques sont au-delà de cette catégorie.

b) Nouvelle réglementation

Le nouvel arrêté du 21/11/2002 remplace l'arrêté du 30 juin 1983 modifié le 28 août 1991 et fixe les méthodes d'essais et les catégories de classification en ce qui concerne la réaction au feu des produits de construction et d'aménagement.

Les dispositions générales actuelles concernant la sécurité contre l'incendie pour les produits de construction reposant sur le classement M.

Ce classement M est au cœur du système de prévention national qui prévoit pour le bâtiment l'utilisation de matériaux dont le comportement au feu est déterminé et classifié. Les méthodes d'essais associées tels l'épiradiateur, le brûleur électrique ou encore le panneau pour revêtement de sols permettent d'apprécier ces classements.

L'échelonnement de M0 à M4 des classements en réaction, combiné à la réglemen-

tation incendie, permet d'établir les règles d'utilisation des matériaux et éléments de construction dans les Etablissements Recevant du Public (ERP).

Cependant dans la nouvelle réglementation (arrêté du 21/11/2002) , pour les produits de construction, les Euroclasses peuvent être utilisées dès maintenant comme mode de preuve de conformité des produits aux exigences de la réglementation Française au même titre que les classements M, grâce à un tableau de transposition qui donne les équivalences entre les Euroclasses et les classements M (voir les tableaux 3 et 4).

Seul un laboratoire agréé français comme le LNE peut délivrer ces Euroclasses tant que les normes harmonisées des produits ne sont pas publiées.

Ces Euroclasses se substitueront aux classements M au fur et à mesure que les normes des produits européennes harmonisées seront publiées. Elles seront reconnues dans tous les pays européens à partir du moment où elles seront délivrées par un laboratoire notifié comme le LNE.

c) Les produits de construction concernés

Vis-à-vis du scénario feu qui a sous tendu le choix des méthodes d'essais harmonisées l'ensemble des matériaux et éléments de construction se retrouvent sous le couvert de cette directive, à savoir :

- Les produits destinés aux murs ou aux plafonds, en y incluant les produits de finition.
- Les éléments de construction,
- Les produits intégrés aux éléments de construction,
- Les produits de façade et de murs extérieurs, en y incluant les couches d'isolation,
- Les systèmes de revêtement du sol.

c) Les Euroclasses

Celles-ci s'échelonnent de A à F en fonction du niveau de performance observé des produits.

L'Euroclasse A est destinée aux produits ne contribuant pas ou très peu au développement du feu. L'Euroclasse E couvrira les produits ayant une réaction au feu acceptable, tout juste capable de résister pendant une courte période à l'attaque d'une petite flamme. L'Euroclasse F destinée aux produits n'ayant démontré aucune performance au feu.

Les tableaux 1 et 2 joints à ce document et issus de la décision de la Commission Européenne du 8 février 2000 listent les Euroclasses ainsi que les limites de critères qui leur sont associées. Les méthodes d'essais sont codifiées par leur indice de normalisation.

e) Les méthodes d'essais harmonisées

Elles sont au nombre de cinq (5)

•Le four d'incombustibilité (NF EN ISO 1182).

Cet essai est destiné à identifier les produits qui ne contribueront pas, ou pas de

manière significative, au développement du feu. Cet essai couvre les Euroclasses A1, A2, A_{floor1}, A_{floor2}.

• **La bombe calorimétrique (NF EN ISO 1716).**

Le but de cet essai est de déterminer le pouvoir calorifique supérieur (PCS) d'un produit ou son énergie de combustion maximale dans les conditions d'une combustion vive et forcée reproduite dans une enceinte sous pression d'oxygène. Cet essai couvre les Euroclasses A1, A2, A_{floor1}, A_{floor2}.

• **L'essai SBI- Single Burning Item (NF EN ISO 13823).**

Cet essai semi- grandeur a pour but d'examiner la contribution d'un produit au développement d'un feu, dans un scénario simulant une combustion d'un objet isolé en feu dans le coin d'une pièce recréé avec des pans d'éprouvettes de 0,51 x1,50 m et 1,00x 1,50m du produit à tester . Cet essai couvre les Euroclasses A2, B, C et D.

• **L'allumabilité à la petite flamme (NF EN ISO 11925-2)**

Le but de cet essai est d'évaluer l'allumabilité d'un produit exposé à une sollicitation thermique faible et localisée simulée par une petite flamme. Cet essai qui sert de « screening test » couvre les Euroclasses B, C, D, E et F en cas d'échec, ainsi que les Euroclasses B_{floor}, C_{floor}, E_{floor}, et F_{floor} en cas d'échec.

• **Le panneau radiant revêtement de sol (NF EN ISO 9239-1)**

Cet essai a pour objectif de déterminer le flux radiant critique à partir duquel un front de flamme cesse de propager sur une surface horizontale constituée d'une éprouvette de revêtement du sol. Cet essai couvre les Euroclasses A2_{floor}, B_{floor}, C_{floor}, et D_{floor}.

f) Symboles et définitions :

• Symboles :

ΔT	=	Elévation de température
Δm	=	Perte de masse
T_f	=	Durée de l'inflammation
PCS	=	Pouvoir calorifique supérieur
FIGRA	=	Accélération de la production énergétique
THR _{600s}	=	Dégagement thermique total
LFS	=	Propagation de flamme latérale
SMOGRA	=	Accélération de la production de fumée
TSP _{600s}	=	Emission de fumée totale
F _s	=	Propagation de flamme

• Définitions :

« Matériaux » : substance de base unique ou dispersion uniforme de substances telles que le métal, la pierre, le bois, le béton, la laine minérale avec liant en dispersion uniformes, les polymères.

« Produit homogène » : produits consistant en un matériau unique, dont la densité et la composition sont partout uniformes.

« Produit non homogène » : produit ne répondant pas aux critères applicables à un produit homogène. Il s'agit d'un produit composé d'un ou de plusieurs composants substantiels et/ou non substantiels.

« Composant substantiel » : matériau qui constitue une partie significative d'un produit non homogène. Une couche d'une masse par unité de surface $\geq 1,0\text{kg/m}^2$ ou d'une épaisseur $\geq 1,0\text{mm}$ est considéré comme un composant substantiel.

« Composant non substantiel » : matériau qui ne constitue pas une partie significative d'un produit non homogène. Une couche d'une par unité de surface $< 1,0\text{kg/m}^2$ et d'une épaisseur $< 1,0\text{mm}$ est considérée comme un composant non substantiel.

Deux ou plusieurs couches non substantielles adjacentes (c'est-à-dire sans aucun composant substantiel entre les deux) sont considérées comme un seul composant non substantiel et doivent donc satisfaire toutes les deux aux exigences applicables à une couche constituant un composant non substantiel.

Pour les composants non substantiels, on établit une distinction entre les composants non substantiels internes et les composants non substantiels externes selon les définitions suivantes :

« Composant non substantiel interne » : composant non substantiel couvert des deux cotés par au moins un composant substantiel.

« Composant non substantiel externe » : composant non substantiel non couvert d'un côté par un composant substantiel.

TABLEAU N°1 : classification des caractéristiques de réaction au feu des produits de construction à l'exception des sols

Le tableau 1 ci-dessous indique les essais à effectuer, ainsi que les critères retenus, pour le classement des produits de construction à l'exception des sols. Les conditions dans lesquelles il est fait usage des résultats d'essais pour établir le classement sont précisées dans la norme NF EN 13 501-1. La liste des supports représentatifs de l'application finale de certains produits de revêtements est donnée dans la norme NF EN 13 238.

Classes	Méthode(s) d'essai	Critères de classification (valeurs moyennes)	Classification supplémentaires
A1	NF EN ISO 1182(1)	$\Delta T \leq 30^\circ \text{C}$ et $\Delta m \leq 50\%$ et $t_f = 0$ (pas d'inflammation prolongée)	-
A1	NF EN ISO 1716	$\text{PCS} \leq 2.0\text{MJ.kg}^{-1}$ (1) et $\text{PCS} \leq 2.0\text{MJ.kg}^{-1}$ (2) 2a et $\text{PCS} \leq 1.4\text{MJ.m}^{-2}$ (3) et $\text{PCS} \leq 2.0\text{MJ.kg}^{-1}$ (4) et	-
A2	NF EN ISO 1182 (1) ou	$\Delta T \leq 50^\circ \text{C}$ et $\Delta m \leq 50\%$ et $t_f \leq 20\text{s}$	-
	NF EN ISO 1716 et	$\text{PCS} \leq 3.0\text{MJ.kg}^{-1}$ (1) et $\text{PCS} \leq 4.0\text{MJ.m}^{-2}$ (2) et $\text{PCS} \leq 4.0\text{MJ.m}^{-2}$ (3) et $\text{PCS} \leq 3.0\text{MJ.kg}^{-1}$ (4)	-
	NF EN 13823 (SBI)	$\text{FIGRA} \leq 120\text{W.s}^{-1}$ et $\text{LFS} < \text{bord de l'éprouvette}$ et $\text{THR}_{600\text{s}} \leq 7,5\text{MJ}$	Production de fumée (5) et gouttelettes/particules enflammées (6)
B	NF EN 13823 (SBI) et	$\text{FIGRA} \leq 120 \text{ W.s}^{-1}$ et $\text{LFS} < \text{bord de l'éprouvette}$ et $\text{THR}_{600\text{s}} \leq 7,5\text{MJ}$	Production de fumée (5) et gouttelettes/particules
	NF EN ISO 11925-2 (8) Exposition = 30 s	$\text{FS} \leq 150 \text{ mm en } 60 \text{ s}$	enflammées (6)
C	NF EN 13823 (SBI) et	$\text{FIGRA} \leq 250 \text{ W.s}^{-1}$ et $\text{LFS} < \text{bord de l'éprouvette}$ et $\text{THR}_{600\text{s}} \leq 15\text{MJ}$	Production de fumée (5) et gouttelettes/particules
	NF EN ISO 11925-2 (8) Exposition = 30 s	$\text{FS} \leq 150 \text{ mm en } 60 \text{ s}$	Enflammées (6)
D	NF EN 13823 (SBI) et	$\text{FIGRA} \leq 750 \text{ W.s}^{-1}$	Production de fumée (5) et gouttelettes/particules
	NF EN ISO 11925-2 (8) Exposition = 30 s	$\text{FS} \leq 150 \text{ mm en } 60 \text{ s}$	enflammées (6)
E	NF EN ISO 11925-2 (8) Exposition = 30 s	$\text{FS} \leq 150 \text{ mm en } 20 \text{ s}$	Gouttelettes/particules Enflammées (7)
F			Aucune performance déterminée

- (1) Pour les produits homogènes et les composants substantiels des produits non homogène.
(2) Pour tout composant non substantiel externe des produits non homogènes.
(2a) Ou bien, pour tout composant externe non substantiel ayant un $\text{PCS} \leq 2,0\text{MJ.m}^{-2}$, pour autant que le produit remplisse les critères suivants de la NF EN 13823 (SBI) : $\text{FIGRA} \leq 20\text{W.s}^{-1}$, $\text{LFS} < \text{bord de l'éprouvette}$, et $\text{THR}_{600\text{s}} \leq 4,0\text{MJ}$ et s_1 et d_0 .
(3) pour tout composant non substantiel interne des produits non homogènes.
(4) Pour le produit dans son ensemble.
(5) $S_1 = \text{SMOGR} \leq 30\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$ et $\text{TSP}_{600\text{s}} \leq 50\text{m}^2$, $S_2 = \text{SMOGR} \leq 180\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$ et $\text{TSP}_{600\text{s}} \leq 200\text{m}^2$, $S_3 = \text{ni } S_1 \text{ ni } S_2$.
(6) $D_0 =$ pas de gouttelettes/particules enflammées dans la NF EN 13823 (SBI) en 600s
 $D_1 =$ pas de gouttelettes/particules enflammées persistant plus de 10s dans la NF EN 13823 (SBI) en 600s
 $D_2 = \text{ni } D_0 \text{ ni } D_1$; l'allumage du papier dans la NF EN ISO 11925-2 conduit à la classe D2.

(7) Accepté= pas d'allumage du papier(pas de classe) ;Refusé= allumage du papier (classe D2)
 (8) En cas d'attaque par la flamme en surface et, le cas échéant, compte tenu de l'application finale du produit, d'attaque par le bord.

TABLEAU N°2 : Classification des caractéristiques de réaction au feu pour les sols

Le tableau 2 ci-dessous indique les essais à effectuer, ainsi que les critères retenus, pour le classement des sols. Les conditions dans lesquelles il est fait usage Des résultats d'essais pour établir le classement sont précisés dans la norme NF EN 13501-1. Les supports représentatifs de l'application finale sont indiqués Dans la norme NF EN 13 238.

Classes	Méthode(s) d'essai	Critères de classification (valeurs moyennes)	Classification supplémentaire
A1FL	NF EN ISO 1182 (1) et	$\Delta T \leq 30^\circ \text{C}$ et $\Delta m \leq 50\%$ et $T_f = 0$ (pas d'inflammation prolongée)	-
	NF EN ISO 1716	$\text{PCS} \leq 2,0\text{MJ.kg}^{-1}$ (1) et $\text{PCS} \leq 2,0\text{MJ.kg}^{-1}$ (2) $\text{PCS} \leq 1,4\text{MJ.m}^{-2}$ (3) $\text{PCS} \leq 2,0\text{MJ.kg}^{-1}$ (4)	-
A2FL	NF EN ISO 1182 (1) ou	$\Delta T \leq 50^\circ \text{C}$ et $\Delta m \leq 50\%$ $t_f \leq 20\text{s}$	-
	NF EN ISO 1716 et	$\text{PCS} \leq 3,0\text{MJ.kg}^{-1}$ (1) et $\text{PCS} \leq 4,0\text{MJ.m}^{-2}$ (2) $\text{PCS} \leq 4,0\text{MJ.m}^{-2}$ (3) $\text{PCS} \leq 3,0\text{MJ.kg}^{-1}$ (4)	-
	NF EN ISO 9239-1 (5)	Flux critique (6) $\geq 8,0 \text{Kw.m}^{-2}$	Production de fumée (7)
BFL	NF EN ISO 9239-1 (5) et	Flux critique (6) $\geq 8,0 \text{Kw.m}^{-2}$	Production de fumée (7)
	NF EN ISO 11925-2 (8) Exposition= 15s	$F_s \leq 150 \text{mm}$ en 20s	-
CFL	NF EN ISO 9239-1 (5) et	Flux critique (6) $\geq 4,5 \text{Kw.m}^{-2}$	Production de fumée (7)
	NF EN ISO 11925-2 (8) Exposition= 15s	$F_s \leq 150 \text{mm}$ en 20s	-
DFL	NF EN ISO 9239-1 (5) et	Flux critique (6) $\geq 3,0 \text{Kw.m}^{-2}$	Production de fumée (7)
	NF EN ISO 11925-2 (8) Exposition= 15s	$F_s \leq 150 \text{mm}$ en 20s	
EFL	NF EN ISO 11925-2 (8) Exposition= 15s	$F_s \leq 150 \text{mm}$ en 20s	
FFL			Aucune performance déterminée

- (1) Pour les produits homogènes et les composants substantiels des produits non homogènes.
 (2) Pour tout composant non substantiel externe des produits non homogènes.
 (3) Pour tout composant non substantiel interne des produits non homogènes.
 (4) Pour le produit dans son ensemble.

(5)Durée de l'essai= 30 minutes.

(6) Le flux critique est défini comme le flux radiatif à partir duquel la flamme s'éteint ou le flux radiatif après une période d'essai de 30 minutes, selon la valeur qui est la moins élevée (c'est-à-dire le flux correspondant à la propagation de flamme la plus étendue).

(7) S1= Fumée ≤ 750% .min ; S2= pas S1.

(8) En cas d'attaque par la flamme en surface et, le cas échéant, compte tenu de l'application finale du produit, d'attaque par le bord.

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

- s1, s2 ou s3 pour la production de fumée (s = smoke = fumée : plus le chiffre est élevé, plus l'émission de fumée est importante) :

- s3 : aucune limitation pour l'émission de fumées ;
- s2 : l'émission totale de fumée et la vitesse d'émission de la fumée
Sont limitées
- s1 : exigences plus sévères que pour s2

-d0, d1 ou d2 pour le comportement face aux retombées de gouttelettes et particules enflammées : (d = drop =goutte : plus le chiffre est élevé, plus la production de gouttes est importante) ;

- d2 : pas de limitation ;
- d1 : production de gouttelettes/particules incandescentes pendant un
Temps déterminé ;
- d0 : pas de production de gouttelettes/particules incandescentes

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

TABLEAU N°3 : Classes admissibles au regard des catégories M
Mentionnées dans les règlements de sécurité contre
L'incendie.

Produits de construction autres que les sols

EUROCLASSES SELON NF EN 13 501-1			EXIGENCES
A1	-	-	Incombustibles
A2	s1	d0	M0
A2	s1	d1 (1)	M1
A2	s2 s3	d0 d1 (1)	M1
B	s1 s2 s3	d0 d1 (1)	M1
C (3)	s1 (2) (3) s2 (3) s3 (3)	d0 d1 (1)	M2
D	s1 (2) s2 s3	d0 d1 (1)	M3 M4 (non gouttant)
Toutes classes (2) autres que E- d2 et F			M4

- (1) Le niveau de performance d1 est accepté uniquement pour les produits qui ne sont pas thermo fusibles dans les conditions de l'essai.
- (2) Le niveau de performance s1 dispense de fournir les informations prévues par l'arrêté du 4 novembre 1975 modifié portant réglementation de l'utilisation de certains matériaux et produits dans les établissements recevant du public et l'instruction du 1 décembre 1976 s'y rapportant.
- (3) Admissible pour M1 si non substantiel au sens de la définition de l'annexe 1.

**TABLEAU N° 4 : Classes admissibles au regard des catégories M
Mentionnées dans les règlements de sécurité contre
l'incendie.**

SOLS

EUROCLASSES SELON NF EN 13 501-1		EXIGENCES
A1FL	-	Incombustible
A2FL	s1	M0
A2FL	s2	M3
BFL	s1 s2	M3
CFL	s1 s2	M3
DFL	s1(1) s2	M4

(1)Le niveau de performance s1 dispense de fournir les informations prévues par l'arrêté du 4 novembre 1975 modifié portant réglementation de l'utilisation de certains matériaux et produits dans les établissements recevant du public et l'instruction du 1 décembre 1976 s'y rapportant.

f) Classification des matériaux d'aménagement

Les matériaux sont répartis dans les catégories suivantes :

M1, M2, M3, M4, et , le cas échéant, M0.

Pour les besoins de la classification, on distingue :

- Les matériaux d'épaisseur inférieure ou égale à 5mm
- Les matériaux rigides de toute épaisseur et les matériaux souples d'épaisseur supérieure à 5mm.

Lorsqu'il existe un doute sur le caractère rigide ou souple du matériau, les deux types de classification sont réalisés et le résultat le plus défavorable est retenu.

L'évaluation de gamme permet de classer un même matériau, dans les limites de variation d'un seul paramètre influent en matière de réaction au feu (épaisseur, grammage, aspect de surface...). En tel cas, le classement est prononcé à partir d'un nombre réduit d'épreuves, laissé à l'appréciation du laboratoire, à condition que les résultats obtenus sur les différentes éprouvettes conduisent à un même classement.

Les revêtements de sol, lorsqu'ils sont employés, pour un usage temporaire, comme matériaux d'aménagement, peuvent être classés conformément aux dispositions les concernant de la norme NF P 92- 507.

TABLEAU N°5 : Classement des matériaux souples d'épaisseur inférieure ou égale à 5 mm

Le tableau 5 ci-dessous indique les essais à effectuer, ainsi que les critères retenus pour le classement, des matériaux souples d'épaisseur inférieure ou égale à 5 millimètres.

Les symboles suivants sont utilisés (les caractéristiques sont définies par rapport à la méthode d'essai appropriée)

tf	Durée d'inflammation ou de l'ignition
Ld	Longueur détruite
Id	Largeur détruite
Vp	Vitesse de propagation de flamme

Les conditions dans lesquelles il est fait usage des résultats d'essais pour établir le classement sont précisées dans la norme NF P 92-507

ESSAIS	CRITERES DE CLASSEMENT			
NF P 92 505		Pas d'inflammation de la ouate		Inflammation de la ouate
NF P 92 503	Pas de gouttes	Gouttes non Enflammées	Gouttes ou débris enflammés	M4
tf ≤ 5 secondes(1)	M1	M1	M2	
Ld < 35 cm	M2	M2	M3	
Ld < 60cm et Id < 9cm	M3	M3	M4	
NF P 92 504	Matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes et Vp < 2mm.s ⁻¹			M4

(1) Si le matériau perce sans inflammation effective, se reporter au tableau 7.

TABLEAU N°6 : Classement des matériaux rigides de toute épaisseur et des matériaux souples d'épaisseur supérieure à 5 mm.

Il indique les essais à effectuer, ainsi que les critères retenus pour le classement, des matériaux rigides de toute épaisseur et des matériaux souples d'épaisseur supérieure à 5 mm.

Les symboles suivants sont utilisés (les caractéristiques sont définies par rapport à la méthode d'essai appropriée) :

ti	Délag d'inflammation
h	Longueur maximale de flamme au cours de chaque période de 30 secondes
$\sum h$	Somme des valeurs de h
ΔT	Durée totale de la combustion vive
q	$q = \frac{100 \sum h}{ti \sqrt{\Delta T}}$
\bar{q}	Indice de classement (moyenne, sur le nombre d'épreuves, de q)
Vp	Vitesse de propagation de la flamme.

Les conditions dans lesquelles il est fait usage des résultats d'essais pour établir le classement sont dans la norme NF P 92-507.

ESSAIS	CRITERES DE CLASSEMENT (1)	CLASSEME NT
NF P 92 501 (2)	$\bar{q} < 2,5$ $\bar{q} < 15$ $\bar{q} < 50$	M1 M2 M3
NF P92 504	Matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes et $V_p < 2\text{mm.s}^{-1}$	M4

(1)Pour les matériaux multicouches, se reporter à la norme NF P 92-507.

(2)Si le matériau perce sans inflammation effective (y compris les matériaux colles sur support qui se rétractent et qui présentent simultanément une masse volumique inférieure à 200kg/m³ et une épaisseur supérieure à 5mm), se rapporter au tableau n°7.

TABLEAU N°7 : Matériaux présentant un comportement particulier.

Les matériaux qui percent sans inflammation lors des essais décrits dans les normes NF P92 501 et NF P 92 503 sont classés comme indiqué dans le tableau n°7 ci-dessous et en suivant les modalités de la norme NF P 92-507.

ESSAIS	CRITERES DE CLASSEMENT			
	Pas d'inflammation de la ouate			Inflammation de la ouate
NF P 92 505				
NF P 92 504	Pas de gouttes	Gouttes non enflammées	Gouttes ou débris enflammées	M4
Pas de persistances > 2sec	M1	M1	M2	M4
Persistances ≤ 5sec	M2	M2	M3	
Persistances > 5sec sans propagation	M3	M3	M4	
$V_p < 2\text{mm.s}^{-1}$	M4			

TABLEAU N°8 : Classement en catégorie M0.

Le classement en catégorie M0 intervient comme indiqué dans le tableau n°8 ci-dessous et dans la norme NF P 92-507.

MATERIAUX	ESSAIS	CRITERES
Souples d'épaisseur ≤ 5mm	NF EN ISO 1716 Et NF P 92 503	PCS ≤ 2,5 MJ.kg (1) M1
Rigides et souples d'épaisseur > 5mm	NF EN ISO 1716 Et NF P 92 501	PCS ≤ 2,5 MJ.kg (1) $\bar{q} = 0$ et $\Delta t < 5 \text{ sec}$
En vrac	NF EN ISO 1716	PCS ≤ 2,5 MJ.kg

(1)Pour les matériaux multicouches, cette condition est à respecter pour chacune des couches, sauf cas prévus par la norme NF P 92-507.

2.6.2 : La résistance au feu

La résistance au feu classe les éléments de construction en fonction de leur durée de résistance avant détérioration lors d'un incendie (début de combustion)

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

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

$E_{d,fi,(t)}$ est la valeur calculée de l'effet des actions, des sollicitations, au moment (t) de l'incendie

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

Définition :

Le temps pendant lequel un élément de construction joue le rôle qui lui est dévolu malgré l'action de l'incendie.

Les matériaux de construction englobent tout ce qui a permis de construire les locaux, les murs, le sol, le plafond, les portes, les gaines et fils électriques.

Le classement s'effectue suivant le degré d'étanchéité du matériau à la chaleur, aux flammes et aux gaz inflammables.

Il existe trois degrés de résistance au feu ; les matériaux Stables au Feu, Pare Feu et Coupe Feu.

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

1. R (Stable au Feu) ; Les matériaux Stables au Feu gardent leurs qualités mécaniques lors d'un incendie. Ils n'ont pas de propriété propre à lutter efficacement contre un feu.

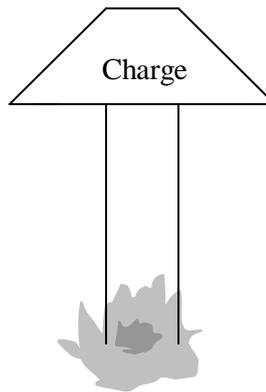


Figure : 5 SF Stable au Feu
(Résistance mécanique)

2. E (Pare- Feu) : les matériaux Pare- Feu ont la propriété de stopper les flammes et les gaz inflammables lors d'un incendie. Par ailleurs il laisse passer la chaleur.
3. I (Coupe- Feu) : Les matériaux Coupe- Feu sont une barrière efficace aussi bien contre la chaleur, les flammes et les gaz inflammables.

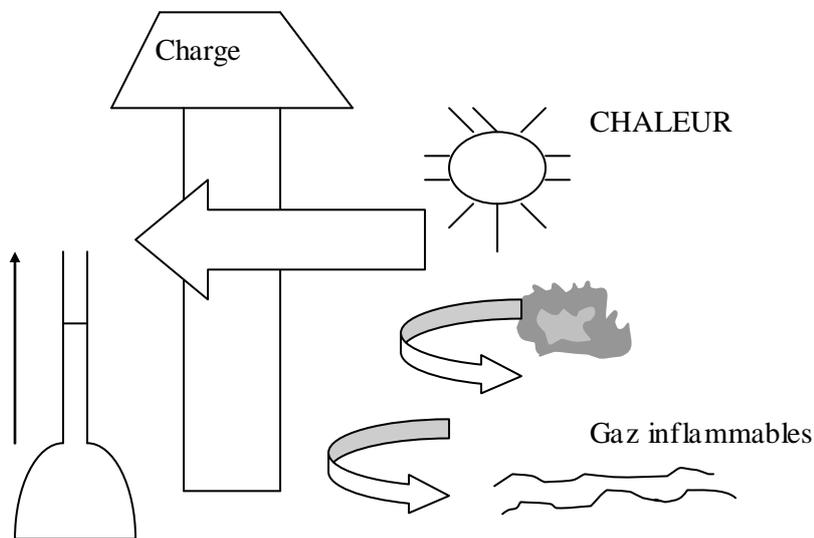


Figure : 6 PF : Pare-Feu

Ces trois degrés de stabilité sont assujettis à un temps défini quant à leur résistance au feu avant détérioration et sont exprimés en mn : 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240,360minutes.

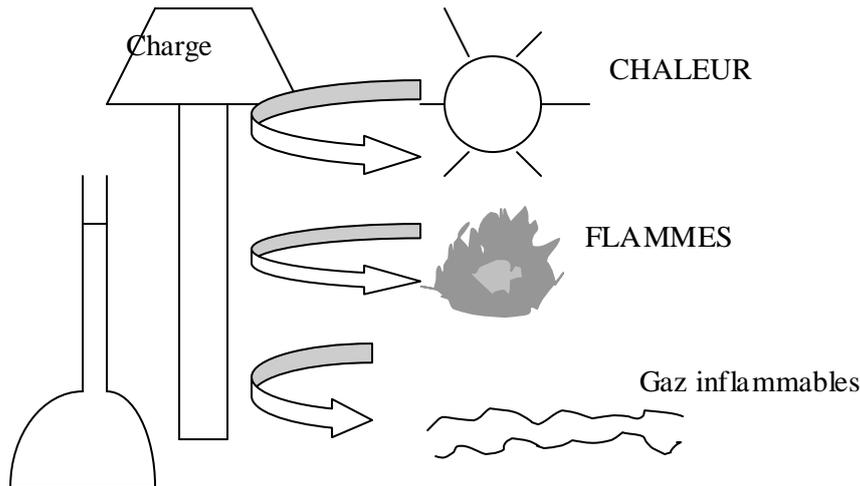


Figure : 7 CF : COUPE-FEU

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

	Temps	Classement
Capacité portante	130 mn	R120
Étanchéité au feu	92 mn	RE90
Isolation thermique	46mn	REI45

CADRE REGLEMENTAIRE.

Les sept Euroclasses

- Euroclasse F : aucune performance de réaction déterminée
- Euroclasse E : produits capables de résister à l'attaque d'une petite flamme. Capable de subir l'attaque thermique issue d'un objet isolé en feu avec un dégagement calorifique retardé et limité.
- Euroclasse C : idem D, avec critères plus stricts
- Euroclasse B : idem C, avec critères plus stricts
- Euroclasse A2 : classe B plus faible contribution à la charge d'un incendie et au développement du feu dans le cas où celui-ci est très développé.
- Euroclasse A1 : aucune contribution à la charge d'un incendie, y compris entièrement développé. Censé satisfaire automatiquement aux autres classes inférieures.

F	■ produits non classés ou non testés
E	■ produit très inflammable et propageur de flammes
D	■ produit très combustible
C	■ produit combustible

- B ■ produit faiblement combustible
- A1 et A2 ■ produits non combustibles

La classification additionnelle pour la production de fumée et de gouttes enflammées.

Production de fumée

s3 : aucune limite requise

s2 : production totale de fumée et débit d'augmentation de la production de fumée limitée.

s1 : critères plus stricts que pour S2

Gouttes et débris enflammés

d0 : pas de gouttes / débris enflammés

d1 : pas de gouttes / débris enflammés persistants plus de 10s

d2 : ni d0 ni d1, inflammation du papier à l'allumabilité

L'expression totale de la classification est :

Pour les produits non combustibles : A1 ou A2 d0 s1

Pour les produits classes de B à E + gouttes + fumées

Principes et critères des Euroclasses.

NORMES

EUROCLASSES

Trois niveaux de sollicitation thermique à simuler par des essais.	Attaque ponctuelle Par une petite Flamme	NF en ISO 11925-2 petite flamme	E
	Sollicitation par un objet isolé en feu	NF en 13823 objets isolés en feu SBI	B, C, & D
	Feu pleinement développe dans la pièce.	NF en ISO 1182 Petit four NF en ISO 1716 Bombe calorifique	A1 & A2

Le système des euroclasses, entériné le 08 février 2000, intègre la troisième notion précitée qui n'était pas considérée dans le (classement M) M0 à M4 en vigueur jusqu'à cette date en France.

Le système des euroclasses est destiné à remplacer graduellement le « classement M » .La coexistence des systèmes national et européens se terminera lorsque seront

retirées de la réglementation les prescriptions fondées sur le « classement M » et que seules subsisteront celles formulées sur la base européenne.

La décision des euroclasses partage en deux ensembles l'univers des produits sur lequel pèse une existence de réaction au feu :

- Les revêtements de sol Al_{fl} à F_{fl} (fl pour floor)
- Les autres produits Al à F.

La décision de la commission de 1994 vient d'être remplacée par la décision du 08 février 2000 qui entérine le système des euroclasses qui va, petit à petit, remplacer le système antérieur.

Le tableau N° 9 donne le type d'essais par euroclasses :

Classes	Autres produits	Classes	Revêtements de sol
F	Aucune performance de réaction au feu déclarée	FFL	Idem classe F
E	-Essai à la petite flamme avec observation de la chute se gouttes enflammées qui fait l'objet d'une Classification additionnelle.	EFL	- Essai à la petite flamme.
D	-Essai à la petite flamme avec les seuils plus sévères que pour E. -Essai SBI	DFL	-Petite flamme -Panneau radiant (éclairage supérieur ou = à 3KW m ⁻²)
C	-Essai à la petite flamme avec les mêmes seuils que pour la classe D. -Essai SBI : seuils plus sévères que pour la classe D.	CFL	-Petite flamme -Panneau radiant (éclairage critique supérieur ou = à 4,5 KWm ⁻²)
B	-Essai à la petite flamme avec les mêmes seuils que pour les classes D et C -Essai SBI	BFL	-Petite flamme -Panneau radiant (éclairage critique supérieur ou = à 8KWm ⁻²)
A2	-Essai SBI, performances permettant un classement en B. -Bombe calorimétrique ou petit four réel. (Le choix réel entre ces essais dépend de la composition du produit).	A2FL	Même esprit que la classe A2 -Panneau radiant -Bombe calorimétrique ou petit four.
A1	-Bombe calorimétrique et petit four. -Dans certains cas, SBI en variante, avec des seuils plus exigeants que pour B. Pas de classification additionnelle.	A1FL	Deux essais : -Bombe calorimétrique -Petit four Pas de classification additionnelle

Normes d'essais :
Pr en ISO 1716, bombe calorimétrique.
Pr en ISO 1182, petit four.
Pr en SBI, objet isolé en feu.
Pr en ISO 9239-1, panneau radiant.
Pr en ISO 11925-2, petite flamme.

2.7 : Protections et risques

2.7.1 : L'incendie : risques, facteurs, origine de propagation.

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

Les facteurs à considérer dans le développement d'un incendie sont :

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

La probabilité de naissance d'un incendie est fonction :

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

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

L'origine du danger incendie peut être :

-interne, lié :

- au bâtiment lui-même et à son contenu
- aux activités qui s'y déroulent (activités industrielles)
- aux personnes occupant le bâtiment (fumeurs, déchets)

-externe, lié :

- aux bâtiments adjacents (par les fenêtres par exemple) ;
- aux installations voisines (gaz liquéfié) ;
- à des conduites de gaz sous la voirie.

Son développement dans le compartiment est limité par :

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

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

2.7.2 Protection passive et active...et comportement humain.

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

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

2.7.3 : Mesures de protection passives – le compartimentage

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

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

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

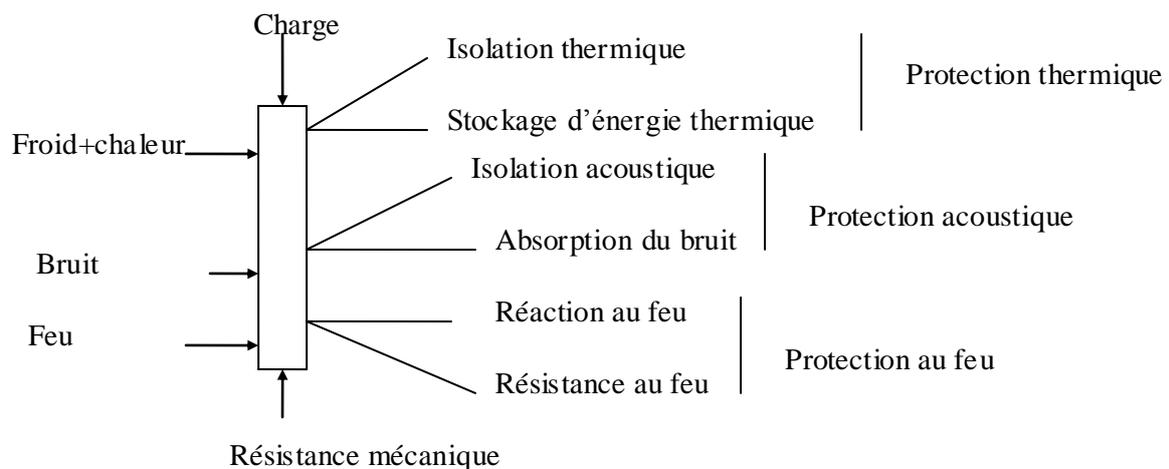
Dans les entrepôts, hôtels, halls industriels, complexes de bureaux, centres de distribution, les feux interrompent non seulement le fonctionnement des entreprises qui les exploitent mais interrompent également :

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

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

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

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



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

Matériau incombustible.....	protection au feu
Résistance élevée +bonne... Stabilité dimensionnelle	protection au feu et acoustique
Conductivité thermique...	protection au feu et thermique
Faible diffusivité thermique	protection au feu et thermique
Haute résistance à l'eau.....	protection au feu et thermique
Masse volumique élevée ...	protection au feu, thermique et acoustique
Haute rigidité flexionnelle....	protection au feu et acoustique
Forte absorption du bruit.....	protection acoustique

La prévention incendie est basée sur

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

Les points faibles du compartimentage ne peuvent être détaillés ici. Ils concernent d'abord les portes, les traversées pour conduites et gaines, les défoncements locaux (interrupteurs...), les sous-sols (apport d'air), les façades (linteaux + balcons), ainsi que les toitures.

La BS 7974-PD7 fournit d'ailleurs des valeurs repères relatives à la fiabilité des portes coupe-feu : la probabilité que celles-ci soient bloquées en position ouverte est de 30%. La probabilité que des portes automatiques ne se referment pas correctement est de 20%.

« L'utilisation de dispositifs de fermeture, couplés à un système de détection, permet d'éviter cette situation qui met en péril tout l'effet recherché par le compartimentage »

2.7.4 : Mesures de protection actives

Les mesures de protection actives, prises en compte par le « fire safety engineering » permettent la lutte contre l'incendie par :

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

Distinction entre annonce, alerte et alarme

Relatif aux normes de base incendie, on distingue en Europe l'annonce, l'alerte et l'alarme :

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

La performance des sprinklers

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

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

L' « area of opération », la surface d'action ou de calcul des sprinklers varie en fonction du risque. Des classes de risques sont définies pour les risques légers, ordinaires (OH) ou élevés. A chaque classe est associée une surface sprinklée qui doit être maintenue sous contrôle. Ceci signifie que le feu ne doit pas s'étendre au delà de cette surface. Le tableau suivant de la NBN EN 12845 reprend la définition de ces surfaces d'action, associées avec un nombre de tête de sprinklers et un débit minimum par tête de sprinkler ;

Classes de Risque	Nombre de Têtes de sprinkler	Surface D'action (m²)	Débit minimum par têtes de Sprinkler (l/m²/min)
Légers	1/21 m ²	84	2,25
Ordinaires	1/12 m ²	72 à 360	5
Elevés sauf HHP4	1/9 m ²	260	7,5 à 12,5

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

Le choix de murs et planchers en béton pour une résistance élevée au feu constitue un maître choix. Ces éléments permettent en outre de réduire la transmission du bruit à travers les murs et les sols (moins de planchers ou de cloisons légères). Ils améliorent le confort thermique, réduisent les frais d'entretien du propriétaire, augmentent la durabilité. Ces caractéristiques se traduisent par une meilleure valeur de revente pour les propriétaires, un gain financier lié à une prime d'assurance in-

incendie plus faible tout en diminuant le risque d'exposition au danger des services de secours ainsi que les frais indirects encourus après incendie.

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

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

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

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

2.7.5 : COMPORTEMENT HUMAIN

Le comportement des occupants des immeubles et celui des visiteurs intervient d'une façon non négligeable dans l'occurrence des incendies et le fonctionnement des protections [V.V.Kholshnikov ,T. J. Shields ,K . E. Boyce et D.A.Samoshin]

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 bases Européenne 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 : 2/3 pour les protections passives, 1/9 pour les protections actives et 2/9 pour les comportements des occupants et des responsables des immeubles.

L'importance notoire du comportement humain est confirmée par l'expérience Ca-

nadienne ou, grâce à une vaste campagne d'information, le nombre d'incendie 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 prise en prévention incendie.

La sécurité active ne compense t'elle pas les points faibles des structures en acier ?
« La sécurité active prend en compte la présence des sprinklers, la détection automatique, la disponibilité d'une réserve d'eau suffisante, la proximité des services d'interventions, le type d'activité exercée dans l'immeuble. Ces éléments sont utilisés dans l'ingénierie du feu pour diminuer artificiellement les exigences en matière de résistance au feu. Il serait téméraire de ne pas conserver au bâtiment une sécurité structurale intrinsèque minimale raisonnable (c'est la sécurité passive) pour parer à des défaillances extérieures [Maohua Zhong, Congling Shi, Xuwei Tu, Tairan. Fu et Litte.]

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

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

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

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

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

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

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

Cette deuxième caractéristique commune montre l'importance de l'entretien régulier de ses systèmes (Alan.R.). Ces systèmes craignent l'influence néfaste du couple

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

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

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

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

C'est l'être humain qui a conçu tous les systèmes dont nous venons de parler. C'est lui qui devra les installer pour qu'ils aient leur efficacité maximale, qui les testera dans toutes les configurations possibles, qui devra les entretenir.

C'est surtout lui qui ira prendre les informations et déterminera les suites à donner pour combattre efficacement l'incendie.

L'être humain est primordial. Dans une intervention incendie le rôle de l'équipier de 1^{ère} intervention est fondamental, lorsqu'il pose les premiers gestes, lorsqu'il renseigne correctement et avec détail les services extérieurs de secours

CHAPITRE : 3 Mécanismes thermiques.

Introduction

En cas d'exposition au feu, un bâtiment est soumis aux actions à la fois mécaniques (déjà présentes) et thermiques (venant du feu). Les actions mécaniques correspondent aux charges permanentes et aux charges d'exploitation, s'exerçant sur les structures au moment du départ de l'incendie. Les actions thermiques correspondent à la montée de température des gaz chauds au sein du local et sont dominées par les conditions de transfert de chaleur à la surface des éléments de construction. Sous l'impact des actions thermiques, les températures des structures augmentent. Ce phénomène est appelé « transfert thermique » et conduit potentiellement à la dilatation thermique et la détérioration des propriétés mécaniques dans les parties échauffées de la construction. Selon la situation, la dilatation thermique (partiellement) empêchée, créant des contraintes thermiques. En combinaison avec les actions thermiques, des déformations significatives peuvent se produire et dans certains cas le bâtiment ou une partie, peut éventuellement s'effondrer. Cet événement est appelé « comportement mécanique ».

3.1 METHODOLOGIE

La détermination du développement du feu dans un compartiment nécessite de connaître de nombreux paramètres. Un certain nombre de ces paramètres sont déterminés par les caractéristiques du bâtiment. Néanmoins, la caractéristique principale, « la charge calorifique », dépend généralement de l'activité et peut ne pas être une constante pendant la durée de vie du bâtiment. La charge calorifique peut être définie comme une distribution statistique.

De la même manière, la sécurité au feu d'un bâtiment a été déterminée grâce à une approche probabiliste. Dans le concept de sécurité incendie basé sur le feu naturel, l'objectif est défini par une valeur cible de ruine. L'objectif n'est pas de changer le niveau de sécurité existant actuellement dans les règlements, mais de le quantifier grâce à des probabilités de ruine réalistes ou à un indice de niveau de sécurité acceptable.

La méthode générale de mesure de la sécurité est basée sur la méthode utilisée pour le dimensionnement des structures à température normale et définit une charge calorifique de calcul prenant en compte la probabilité d'un incendie et l'influence des mesures actives de lutte contre l'incendie.

La charge calorifique est alors utilisée dans les modèles de calcul du développement du feu pour évaluer le comportement des structures en cas d'incendie.

Les modèles pour déterminer la température à l'intérieur du compartiment sont décrits ci-après.

3.2 : Objectifs

L'objectif est d'atteindre un niveau de sécurité acceptable. Ce niveau peut être défini par comparaison avec les autres risques existants, incluant l'effondrement de la structure du bâtiment dans des conditions normales. La probabilité cible qu'un effondrement de la structure du bâtiment dans des conditions normales. La probabilité cible qu'un effondrement de la structure se produise dans des conditions normales est de $7,23 \cdot 10^{-5}$ par bâtiment. L'objectif est : P_f (probabilité de ruine) \leq P (probabilité cible)

Comme cela est spécifié dans les Eurocodes, le feu est une action accidentelle. Une grande étude statistique a été réalisée dans le but de déterminer les probabilités d'incendie. L'occurrence du feu dépend de l'activité du bâtiment. Une bonne corrélation entre des statistiques provenant de différents pays Européens a pu être constatée. Lorsqu'un incendie démarre, un effondrement ne peut avoir lieu que si le feu devient suffisamment important. Pendant cette phase, les mesures actives de lutte contre l'incendie, les occupants et les pompiers ont un rôle important à jouer. Cela signifie que dans un grand nombre de cas, l'incendie sera stoppé très rapidement, et ne se développera pas. Selon les statistiques, les mesures de protection actives et l'intervention des pompiers mises en œuvre dans le bâtiment ont été évaluées pour déterminer la probabilité d'un incendie important. C'est pourquoi selon les mesures de protection actives (sprinklers, détection...) et passives (compartimentage) mises en œuvre dans le bâtiment, l'activité dans le bâtiment et l'intervention des pompiers, une charge calorifique est déterminée à partir d'une probabilité cible. Cette procédure est développée et détaillée ci-après.

3.3. Transfert thermique

Le transfert thermique aux éléments de bâtiment est exprimé par l'équation différentielle suivante (équation différentielle de Fourier) en combinaison avec les conditions aux limites initiales appropriées :

$$\frac{\delta(\rho c \theta)}{\delta t} + \frac{\delta(\lambda \frac{\delta \theta}{\delta x})}{\delta x} + \frac{\delta(\lambda \frac{\delta \theta}{\delta y})}{\delta y} + \frac{\delta(\lambda \frac{\delta \theta}{\delta z})}{\delta z} = 0$$

Où :

x, y, z sont les coordonnées en m

Θ est la température du point x, y, z en °C

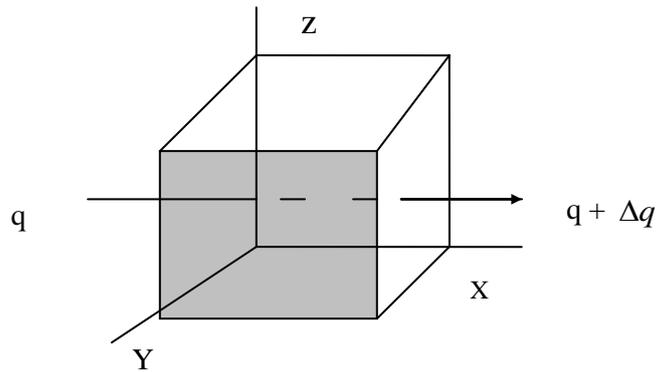
ρ est la masse volumique en kg/m³

C est la chaleur spécifique en j/kg

λ est la conductivité thermique en W /m°K

$$\frac{\delta(\rho c p T)}{\delta t} + \frac{\delta(\lambda \frac{\delta T}{\delta x})}{\delta x} = 0$$

Dans une direction seulement
 $\rho \cdot c_p$ = capacité thermique



$$\Delta q / \Delta x + \Delta(\rho c_p T) / \Delta t = 0 \quad \text{Equilibre de la chaleur}$$

$$q = \lambda \Delta T / \Delta x \quad \text{Loi de Fourier}$$

Conditions aux limites : flux entrant et sortant par unité de surface $h_{net,tot}$

Condition initiale : température du local

Considérant le flux de chaleur (q [W/m²]) à l'élément volumique avec ρ [kg/m³], c_p [J/kg], λ [W/mk] et les dimensions $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ [m] dans la direction x . Θ est la température [°C] ; t est le temps [s].

L'équilibre de la chaleur : (pas de génération de chaleur à l'intérieur de l'élément)

$$\Delta q \cdot \Delta y \cdot \Delta z + \Delta(\rho \cdot c_p \cdot \Theta) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = 0$$

$$\dots \Delta q / \Delta x + \Delta(\rho \cdot c_p \cdot \Theta) / \Delta t = 0$$

Loi de Fourier

$$q = \lambda \Delta \Theta / \Delta x \quad \text{ainsi} \quad \Delta(\lambda \Delta \Theta / \Delta x) / \Delta x + \Delta(\rho \cdot c_p \cdot \Theta) / \Delta t = 0$$

Lorsque Δ tend vers 0, l'équation différentielle ci-dessus en résulte, qui peut par ailleurs facilement s'étendre dans les directions y et z . Cette équation est à résoudre (de manière numérique) en combinaison avec les conditions aux limites (vers les actions thermiques) et les conditions initiales (vers la température normale).

Il y'a trois mécanismes de base de transfert de la chaleur :

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

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

Rayonnement

Il s'agit d'un mode de propagation à distance qui peut se faire dans le vide. C'est le phénomène qui fait que lorsque l'on est en face à un feu, le côté exposé est chaud alors que le côté opposé est froid. Le rayonnement est un transfert d'énergie par ondes électromagnétiques et ne requiert la présence d'aucun milieu entre la source de chaleur et le receveur. Ce mécanisme est prédominant lors de l'extension de l'incendie et lorsque le feu est en pleine intensité. La puissance du rayonnement est fonction de :

- La température (le rayonnement augmente avec la puissance quatrième de la température) ;
- La distance (le rayonnement diminue avec le carré de la distance) ;
- La nature des particules constituant les fumées, notamment les suies.

Le flux de chaleur q_r , échangé entre l'environnement (parois + gaz) à une température T_g et 1 m^2 de paroi à une température T_p vaut :

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

où

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

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

σ_0 = constante de Stefan- Boltzmann = $5,68 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

T_g et T_p sont les températures exprimées en Kelvins

Convection

La convection est un transport de gaz chaud. Un gaz chaud monte : la densité d'un gaz diminue avec la chaleur, la poussée d'Archimède provoque donc l'élévation de cette masse. Lorsque cette masse atteint un obstacle froid (par exemple un plafond), elle lui transfère sa chaleur, refroidit et retombe, il a donc un mouvement de « roulement », similaire au mouvement de l'eau portée à ébullition dans une casserole.

Dans le cas d'un incendie, les fumées suivent le même comportement ascendant. Elles peuvent parcourir des distances importantes et transférer leur chaleur à un matériau combustible qui serait sur leur trajet. On cite fréquemment le cas de cave dont les fumées empruntent la cage d'escalier, épargnent les étages intermédiaires et s'accumulent dans les combles avant de les embraser. Dans le cas où les fumées

contiennent des particules imbrûlées du fait d'une combustion incomplète, leur accumulation en un point distant peut conduire à une reprise explosive du foyer.

Pour lutter contre l'accumulation des fumées et limiter leur caractère dangereux, des systèmes de désenfumage (trappes, ouvrants ou extracteurs) peuvent être implantés dans un bâtiment. A défaut, une des premières actions des sapeurs pompiers sera de pratiquer une ouverture haute, au besoin en cassant le toit, une vitre ou bien un mur. Les portes coupe-feu limitent la propagation des fumées et dont celle de l'incendie. Elles protègent les personnes contre l'intoxication par les fumées. Le flux de la chaleur q_c exprimé en W échangé entre le gaz à une température T_g et 1 m² de paroi à une température T_p vaut :

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

Où :

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

Conduction :

C'est le mode de transfert de chaleur dans les solides. Elle est provoquée par une différence de température entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact sans déplacement appréciable de molécules. Ce transfert de chaleur spontané d'une région de température élevée vers une région de température plus basse obéit à la loi de Fourier.

Ainsi, le manche d'une cuillère métallique qui dépasse d'un plat bouillant va s'échauffer jusqu'à devenir brûlant. Lors d'un incendie, ce même phénomène peut transporter d'importantes quantités d'énergie d'une pièce à l'autre d'un bâtiment. Les matériaux métalliques (éléments de charpentes, rails, conduites, fers à béton) ont une conductivité λ particulièrement élevées. Dans le cas d'un écoulement thermique unidimensionnel, le flux de chaleur q_λ qui traverse une surface de 1 m² perpendiculaire à la direction de l'écoulement vaut :

$$q_\lambda = \lambda \cdot (\delta T / \delta X)$$

Où :

λ Varie de 2,0 à 0,6 W/m°C pour le béton en fonction de la température.

$\frac{\delta T}{\delta X}$ représente le gradient thermique à l'intérieur de la paroi.

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

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

Où

c =chaleur massique (J/kg) qui varie en fonction de la température.

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

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

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

$$q_m = - q_\lambda \quad \text{c'est-à-dire} \quad \rho.c.(\delta T / \delta t) = -\lambda.(\delta T / \delta x) \quad (\text{équation 1})$$

exprimant le bilan thermique à l'intérieur des parois.

3.3.1. Puissance thermique.

Plusieurs valeurs permettent d'approcher la quantité d'énergie libérée au cours d'un incendie :

- le **pouvoir calorifique** d'un combustible : exprimé en kJ/kg ou kJ/m³, c'est la quantité maximale de chaleur que peut dégager l'unité de masse ou de volume pour une combustion complète ;
- la **charge calorifique** : exprimé en kJ pour une zone, c'est la quantité totale de chaleur que peuvent dégager l'ensemble des combustibles présents dans un espace déterminé (une pièce par exemple)
- le **potentiel calorifique** : en kJ/m² (pour une zone), c'est la charge calorifique rapportée à la surface du sol de l'espace considéré ;
- le **débit calorifique** : en kJ/kg/s ou W/kg, c'est la quantité de chaleur produite par une unité de temps pour la combustion de l'unité de masse d'un combustible.

La chaleur dégagée par seconde (puissance thermique) lors d'un incendie dépend essentiellement du **potentiel calorifique** des objets. Voici à titre indicatif quelques puissances :

- une chaise capitonnée : 500 kW (0.5MW) ;
- une petite commode : 1.8 MW ;
- un canapé trois places : 3.5 MW ;
- deux lits jumeaux en pin : 4,5 MW ;
- puissance dégagée lors d'un embrasement généralisée éclair : 3 à 10MW (7 MW en moyenne).

Ceci est à comparer avec la puissance thermique absorbable par un jet d'eau diffusé :

- 0,5 MW à 40l/mn ;

- 2MW à 150 l/mn ;
- 6MW à 500l/mn.

Les vêtements de protection (textiles ignifuges) des pompiers, quant à eux, garantissent en 2005 une protection contre un flux de chaleur de 40 kW/m² soit 0,04 MW/m².

3.4. Les mouvements de fumée.

Fumée : Aérosol de nature variable et dynamique, formé d'un mélange de gaz, de vapeur, des particules liquides et solides, produits par une combustion et en suspension dans l'air.

« Il n'y a pas de fumée sans feu », selon un ancien proverbe français, plusieurs scientifiques et spécialistes en incendie considèrent même que les problèmes engendrés par la fumée sont aussi considérables que ceux apportés par le feu. Une des premières causes expliquant les dangers de la fumée, outre sa composition toxique, est certainement son déplacement rapide, sournois et difficile à prévoir dans un bâtiment incendié. Contournant les obstacles, la fumée transmet sa chaleur et endommage les matériaux qu'elle effleure, elle diminue la visibilité, asphyxie et intoxique les occupants d'un bâtiment, en bref : elle altère tout ce qui se trouve sur son passage. Ceci est sans compter les nouveaux matériaux synthétiques utilisés dans la construction ajoutent à l'importance de contrôler les déplacements de fumée, puisqu'ils ont augmenté la charge combustible des édifices, de même que la toxicité des fumées produites dans les incendies modernes. La compréhension des mouvements de fumée est donc essentielle pour les intervenants qui doivent combattre un incendie, effectuer une ventilation efficace et sauver des occupants pris au piège. La fumée est une entité dynamique, puisqu'elle est constamment en mouvement, sa composition et sa température change à tous les instants et elle se déplace au gré des conditions de son environnement. Pour prédire approximativement sa propagation dans un bâtiment, il faut tenir compte principalement :

- des ouvertures présentes : portes ouvertes, fenêtres ouvertes ou éclatées,.... ;
- du type d'affectation : disposition des pièces, types de plafonds ouvertures verticales,.... ;
- des pertes d'étanchéité : fentes, joints, conduits, matériaux poreux,.... ;
- des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation ;
- des conditions climatiques extérieures : vent, température, humidité.

Comme tous les fluides, la fumée s'écoule sous l'action des forces extérieures. En absence de courant d'air, son écoulement est laminaire jusqu'à une hauteur critique, au-delà de laquelle son écoulement devient turbulent. Dans le cas d'un incendie, l'écoulement de la fumée est toujours turbulent, en raison de l'ampleur du feu et de

l'énorme pression engendrée. Les forces en cause dans les déplacements de la fumée sont essentiellement :

1. La poussée d'Archimède et la gravité (mouvements de convection) ;
2. La surpression causée par le feu ;
3. La dilatation thermique ;
4. Les différences de pression entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment ;
5. Les différences de pression en fonction de la hauteur d'un bâtiment ;
6. La présence de vents, d'ouvertures, de systèmes de circulation d'air, etc. ;
7. La densité et la composition de la fumée.

3.4.1. Mouvements de convection

Lorsqu'un feu prend naissance, la chaleur qu'il dégage réchauffe l'air ambiant et crée un courant ascendant d'air chaud ; des gaz inertes (azote, argon..), un gaz oxydant (oxygène) et des produits de combustion (fumée). En montant, ce courant d'air chaud entraîne un courant d'air frais qui alimente la base du feu. La différence de densité entre l'air chaud et l'air froid engendre des mouvements de convection, c'est-à-dire des déplacements d'air causés par des différences de températures. Etant plus léger que l'air frais, l'air chaud monte par la poussée d'Archimède, qui est une force permettant d'élever les objets dont la densité est plus faible que celle de l'air. Au contraire, l'air frais est plus dense que l'air chaud et la gravité provoque sa descente. En résumé, plus la température ambiante est élevée, plus la fumée monte.

Les mouvements de convection engendrés par ces deux forces opposées expliquent des phénomènes comme la forme « pointue » des flammes, la forme en « V » d'un panache de fumée, la propagation d'un incendie aux étages supérieurs d'un bâtiment en laissant le milieu intact, de même que « l'effet de roulement 'roll-over' de la fumée au plafond. Cet effet est obtenu surtout au début d'un incendie, lorsque la fumée transmet sa chaleur au plafond par diffusion, provoquant ainsi son refroidissement et sa descente. En descendant, la fumée refroidie se mélange encore par diffusion avec les gaz chauds qui montent, ce qui la fait monter à nouveau. Ce mouvement de montée/descente continue jusqu'à ce que le plafond ait atteint la même température que la fumée. Ensuite, la fumée forme une couche au plafond et descend.

3.4.2. La surpression causée par le feu.

Dans un incendie, la fumée s'accumule au plafond pour former une couche de fumée et une hausse de pression (pression positive ou surpression), expliquée par la loi des gaz parfaits (ou la loi de Gay-Lussac). Cette loi stipule que l'augmentation de température (T) d'un volume (V) de gaz engendre directement une élévation de sa pression (P), d'où la formule : $PV = nRT$. Cette surpression en hauteur engendre une baisse de pression au niveau du sol (pression négative ou dépression), créant ainsi un

mouvement d'air qui entraîne l'air frais vers le haut. En milieu fermé, l'air frais est aspiré par les ouvertures à des niveaux inférieurs, comme le bas des portes, les fentes du plancher, ou par les pertes d'étanchéité d'un bâtiment. On appelle ce mouvement d'aspiration de l'air frais un **appel d'air**. Lorsqu'un équilibre de pression est atteint, c'est-à-dire lorsqu'il y a autant de fumée qui quitte la pièce que d'air frais qui entre, le niveau de la couche de fumée se stabilise.

3.4.3 Principaux mouvements de fumée au début d'un incendie en milieu fermé.

Développement du panache de fumée, mixage avec l'air frais, transfert de chaleur au plafond avec effet de « roll-over » de la fumée.

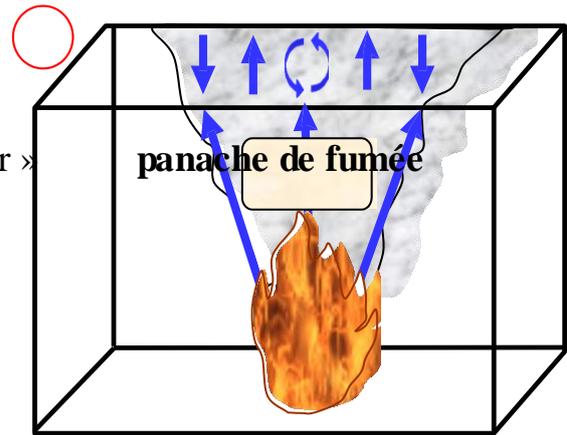


FIGURE 8.

Accumulation et développement d'une mince couche de fumée au plafond lorsque ce dernier est devenu à la même température.

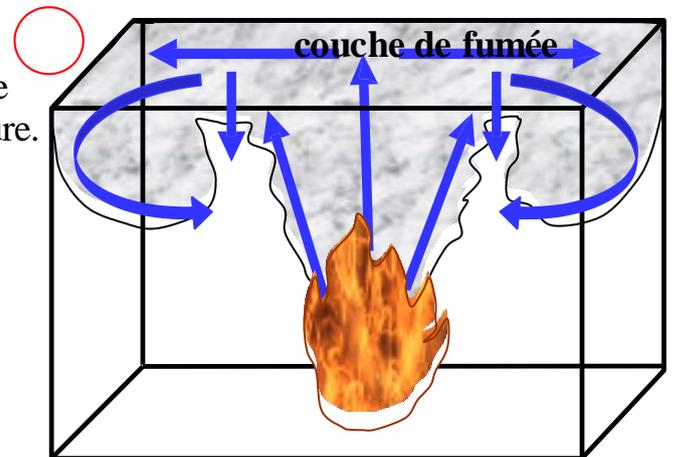


FIGURE 9.

La surpression exercée au plafond par les gaz chauds pousse la fumée vers le bas et sur les côtés.

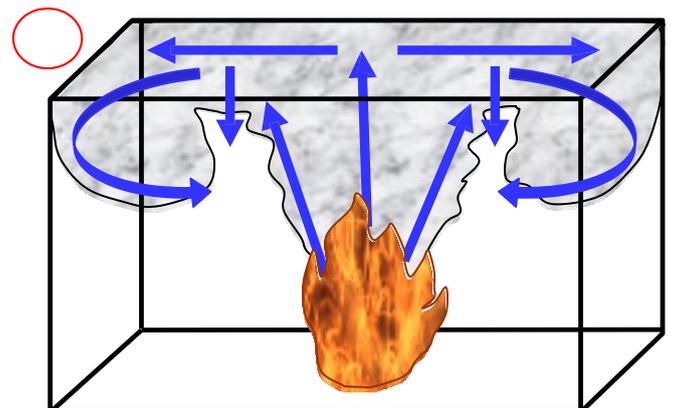


FIGURE 10.

La hauteur de la couche de fumée diminue. Elle se stabilise si l'entrée d'air frais devient égale à la sortie de fumée engendrée par la surpression.

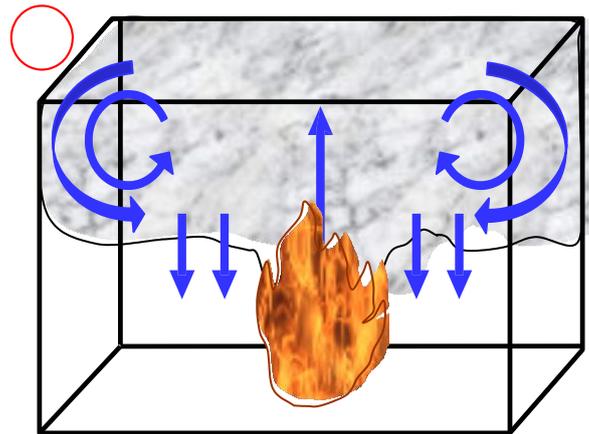


Figure 11.

3.4.4. La dilatation thermique.

La chaleur engendrée par un incendie augmente la température de l'air ambiant. Ainsi réchauffées, les molécules gazeuses de l'air et de la fumée s'agitent et leurs collisions créent une dilatation de leur volume. Cette expansion des gaz chauds s'explique également par la loi des gaz parfaits (ou la loi de Charles), qui précise que le volume d'un gaz est directement proportionnel à sa température, à pression constante.

Toujours selon la loi des gaz parfaits, à chaque élévation de température de 1 K (Kelvin), un gaz se dilaterait à $1/273$ de son volume initial. Donc, si on prend par exemple un incendie provoquant une élévation de température de 800°C (1073K) dans l'air ambiant, cela voudrait dire que l'air se dilaterait jusqu'à environ 4 fois par rapport à son volume initial. De façon générale, on pourrait supposer que dans la plupart des incendies, le volume des gaz chauds devrait au moins tripler par rapport au volume de l'air frais du départ.

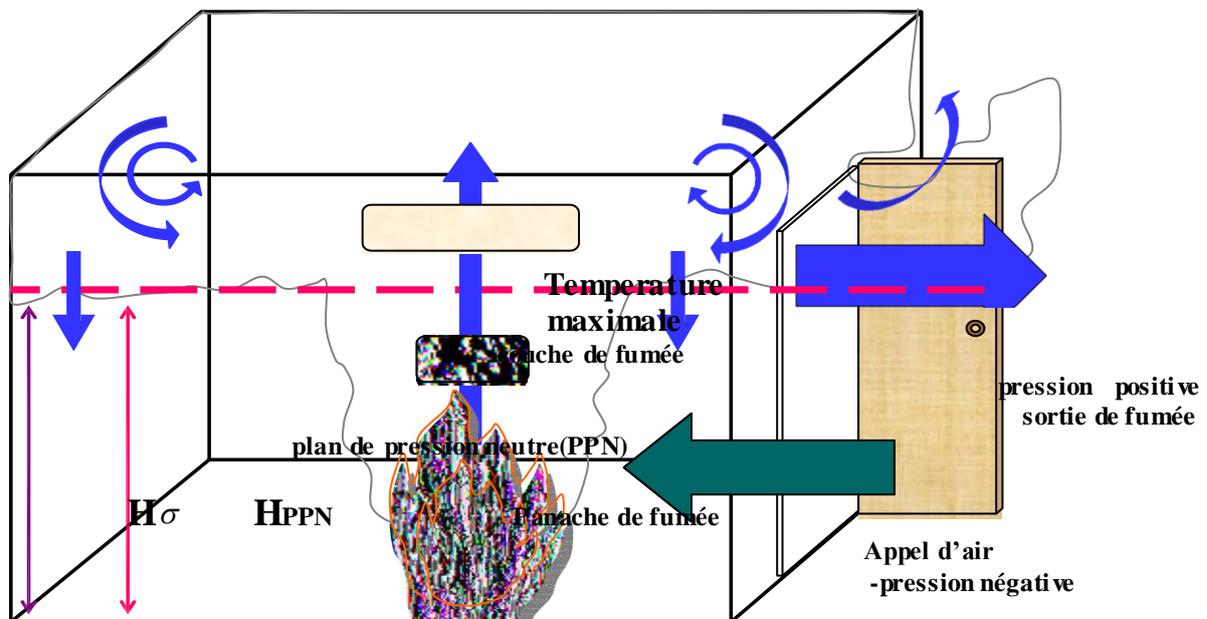
Cette augmentation importante du volume des gaz chauds provoque ainsi l'expulsion des autres gaz présents au début de l'incendie et elle continue aussi longtemps que la température augmente. Le phénomène de dilatation thermique explique en partie la rapidité de propagation de la fumée, de même que l'abaissement de la couche de fumée dans un milieu fermé.

3.4.4.1. Les différences de pression entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment.

La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment crée une différence de pression puisque, toujours selon la loi des gaz parfaits, une augmentation de température engendre directement une augmentation de pression. Lorsqu'il fait plus chaud à l'intérieur qu'à l'extérieur, comme par exemple en hiver, la pression devient alors plus positive dans le haut d'un bâtiment. Un appel d'air est alors créé dans la partie inférieure et l'air est aspiré vers

l'intérieur. Dans une pièce ou un bâtiment, le **plan de pression neutre (PPN)** Ou « zone neutre » correspond à la hauteur à laquelle la pression est la même en dehors qu'en dedans, lorsqu'il n'y a pas de vent. Au dessous du PPN d'un édifice, l'écart de pression fait pénétrer l'air à l'intérieur et la pression devient donc positive. Lors d'un incendie, la chaleur intense et la pression engendrée font déplacer le PPN vers le bas et il se promène ensuite vers le haut ou vers le bas en fonction des baisses et des hausses de chaleur.

Les variations de hauteur du PPN peuvent servir d'indication visuelle des phases d'un incendie. Par exemple un PPN très bas dans une pièce peut indiquer qu'un incendie est dans une phase très avancée et qu'il risque d'engendrer une explosion de fumée. Un PPN très haut peut au contraire indiquer le début d'un incendie. La vitesse de déplacement du PPN peut également donner des indices sur les variations d'intensité de l'incendie.



$H\sigma$ Hauteur de la couche de fumée

H_{PPN} Hauteur du PPN

FIGURE 12. Mouvements d'air et différences de pression lors d'une phase de développement d'un incendie, dans un milieu fermé ayant une porte ouverte

3.4.4.2. Les différences de pression en fonction de la hauteur d'un bâtiment.

Lorsqu'un incendie prend naissance aux niveaux inférieurs d'un bâtiment de grande hauteur (BGH), la fumée a tendance à se propager rapidement vers les étages supérieurs par les ouvertures verticales telles les cages d'escaliers. Ce mouvement général de la fumée vers le haut est d'autant plus rapide que l'édifice est élevé, car un autre phénomène se superpose à celui de l'ascendance normale des fluides : l'**effet de cheminée**, appelé aussi l'**effet de tirage**.

En effet, un appel d'air est créé du bas vers le haut en raison d'une décroissance de la pression en fonction de la hauteur, elle-même causée par une diminution du poids total de l'air par surface. On compare cet appel d'air dans les cages ouvertes à celui d'un effet de tirage dans une cheminée, c'est pourquoi il est nommé

« effet de cheminée ». Cet effet dépend essentiellement de deux facteurs : la hauteur d'un bâtiment, de même que la différence de température entre l'air intérieur et extérieur. Dans le cas d'un incendie dans un BGH en hiver, la différence de température entre la fumée et l'air extérieur étant plus grande, l'appel d'air devient donc plus important. Durant l'été, on peut observer le phénomène inverse lorsqu'il fait très chaud : la fumée a tendance à s'écouler vers le bas au début de l'incendie.

3.4.4.3. La présence des vents, d'ouvertures, de systèmes de circulation d'air.

Le vent constitue un système de ventilation naturelle de l'air et de la fumée dans un bâtiment. Un vent qui frappe un mur externe crée une pression négative à l'intérieur d'un édifice, obligeant l'air à s'infiltrer du même côté. Du côté opposé au vent, une pression positive est induite à l'intérieur, puisque l'air a tendance à fuir par les interstices de la structure vers l'extérieur. D'autres systèmes naturels et artificiels de ventilation modifient les mouvements d'air dans un bâtiment. Le chauffage, la climatisation et les systèmes d'aération influencent tous la température et aussi les niveaux de pression interne d'un bâtiment. Il faut donc en tenir compte lors d'une intervention de sauvetage ou de ventilation lors d'un incendie.

3.4.4.4. La densité et la composition de la fumée.

Lorsqu'un combustible organique (contenant du carbone) est suffisamment chauffé, comme par exemple du bois, il se déshydrate et se décompose à sa surface en milliers de fragments minuscules par un phénomène appelé **pyrolyse**. Ces fragments légers composés d'acétylène, de méthane, de benzène, de radicaux H, OH ? etc., s'élèvent sous l'action de la poussée d'Archimède et s'écoulent dans l'air. Les produits qui n'ont pas réussi à brûler complètement et les produits de combustion s'échappent alors dans l'air ambiant en produisant un aérosol appelé fumée. Lorsque ces fragments gazeux s'éloignent de leur zone de combustion, ils ont tendance à se regrouper et à grossir au fur et à mesure que la température diminue. En s'agglomérant de la sorte, les fragments forment des

particules solides carbonées de composition diverse appelées **suies**, les constituants majeurs de la fumée. Les suies jouent un rôle non négligeable dans la propagation de la fumée, puisque leur taille influence la densité de la fumée. Plus une fumée contient de suie, plus elle est lourde et elle aura tendance à s'écouler vers le sol. Voici quelques caractéristiques physico-chimiques des suies :

- Particules combustibles (oxydables) plus ou moins sphériques ;
- Leurs dimensions varient ; lorsque la température diminue, elles se regroupent jusqu'à l'obtention d'un diamètre d'environ 20 nm par un processus d'agglomération ;
- Leur composition chimique varie : elles sont formées principalement de carbone (d'où leur couleur noire) et d'hydrogène, comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques « HAP » ;
- Peuvent se lier par adsorption grâce à des liaisons chimiques ou physiques et transporter d'autres molécules présentes dans l'air, comme des gaz toxiques ;
- Deviennent lumineuses lorsqu'elles sont suffisamment chauffées (ex : flamme de bougie) ;
- Leur production et leur composition varie selon la nature et la quantité de combustible d'origine (bois, produit pétrolier,...), de même que selon les conditions de combustion ;
- Leur production croît avec la richesse du mélange combustible ; les combustibles riches en carbone et faibles en oxygènes (ex : diesel) produisent plus de suie que ceux qui sont plus pauvres en carbone ou riches en oxygène (ex : méthanol CH_3OH) ;
- Plus de particules sont petites, plus elles risquent d'être toxiques pour les poumons.

En résumé, il y a plusieurs facteurs qui influencent les mouvements de la fumée lors d'un incendie et certains mécanismes sont encore mal élucidés. Prévoir les déplacements de la fumée demeure donc un art pour un intervenant en incendie. Il est donc nécessaire de maîtriser plusieurs concepts de physique et de chimie, additionnés à une bonne compréhension des bases de la combustion et de l'environnement de l'incendie.

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

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

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

Avec

S = surface du compartiment (en m^2)

M_i = masse du matériau i (en kg)

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

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

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

En réalité, la valeur de la charge incendie définie ci- avant doit être affectée d'un coefficient d'utilisation qui tient compte du fait que la majorité des matériaux ne se consomment pas entièrement et ne libèrent donc pas la totalité de l'énergie qu'ils contiennent.

Ceci est lié au matériau lui-même, à sa géométrie, à sa surface, exposée aux flammes, etc. La charge incendie contribuant réellement à la combustion se situe entre 50 et 90 % de la charge incendie théorique définie ci-dessus. Dans le cas des matériaux principalement cellulósiques selon NBN EN 1991-1-2 [106], il est admis de supposer un coefficient de combustion $m = 0,8$.

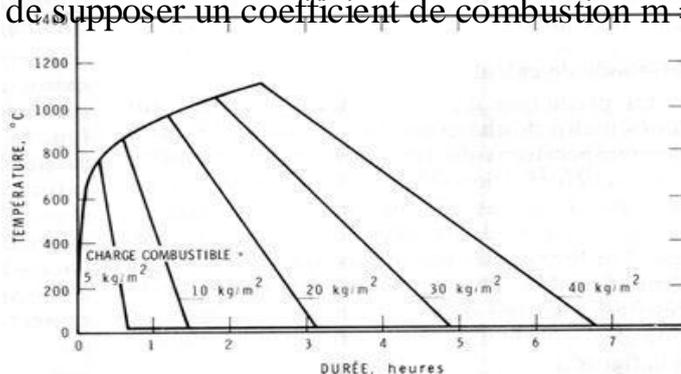


Figure 13 : Effet de la charge combustible sur la courbe de température du feu.

Pour fixer les idées, cette norme précise, des valeurs de densité de charges calorifiques converties en équivalent de kg de bois par m^2 , les charges combustibles moyennes sont déterminées pour les bâtiments, suivant les différents types d'occupation :

Tableau 10 : densité de charge calorifique.

Types d'occupation	Charges combustibles moyennes (kg de bois/ m^2)
Bibliothèque	86
Habitation	45
Centre commercial	34
Bureau	24
Hôtel	18

Théâtre cinéma	17
Ecole (classe)	16
Hôpital	13
Transport	6

La charge calorifique théorique ne peut pas être utilisée comme critère absolu pour le danger incendie. En effet, les matériaux diffèrent entre par la facilité avec laquelle ils peuvent être enflammés et par la vitesse à laquelle ils brûlent, c'est-à-dire par la quantité de chaleur qu'ils peuvent libérer par unité de temps.

La première caractéristique influence la fréquence avec laquelle des incendies peuvent survenir, alors que la seconde détermine l'intensité d'un incendie éventuel.

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

Le mode de stockage des matériaux conditionne la vitesse de combustion. Par exemple, les rouleaux de papier s'effeuillent : il est nécessaire de les stocker horizontalement.

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

t_{α} = le temps nécessaire pour atteindre un débit calorifique de 1MW

$RHR_f = RHR$ pour « rate of heat release » : le débit calorifique maximal produit par 1 m² de feu dans le cas d'un feu contrôlé par le combustible. A titre indicatif voir le tableau suivant :

Type de stockage – d'occupation	RHR_f (Kw/m ²)	t_{α} (s)
Palettes de bois empilées sur une hauteur de 0,5 m	1250	
Palettes de bois empilées sur une hauteur de 3.0 m	6000	
Bouteilles en plastique dans des cartons empilés sur une hauteur de 4.6m	4320	
P anneaux rigides en mousse de polystyrène empilés sur une hauteur de 4.3m	2900	
Magasins de détail, bibliothèque, centre commercial, salle de théâtre et de cinéma	500	150
Bureaux, logements, hôpitaux, chambre d'hôtel, classe d'école..	250	300

Tableau 11 : débit calorifique maximal produit par m² de feu.

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

Le débit calorifique RHR peut être limité par la ventilation. Ceci est déterminé par un programme « une zone », l'EC1 feu donne une expression simplifiée de ce débit calorifique maximum limité.

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

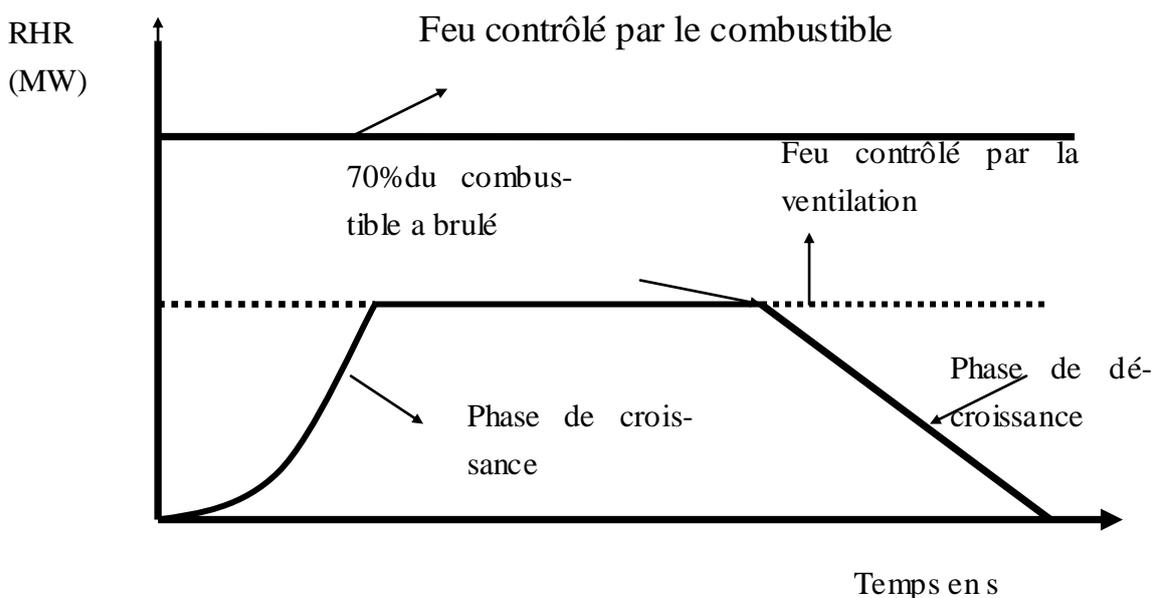


Figure 14 : débit calorifique en fonction du temps

3.5.1. La ventilation.

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

$$D = C^{te} \cdot O = C^{te} \cdot (A_v/A_t) \cdot (h_{eq})^{1/2}$$

Où

A_v = surface totale des ouvertures sur tous les murs (m^2)

A_t = surface totale du compartiment (murs, plafond et plancher, y compris les ouvertures) (m^2)

h_{eq} = moyenne pondérée des hauteurs de fenêtre sur tous les murs (m)

O = ouverture (en $m^{1/2}$),

D est exprimé en kg d'air/s

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

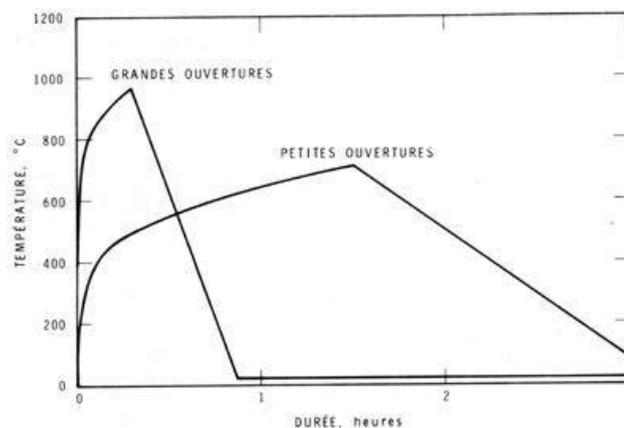


Figure 15. Effet des ouvertures comme facteur sur Courbe de température du feu

Lorsqu'il est fait usage de bouches d'évacuation des fumées, actionnées automatiquement par des éléments sensibles à la température, l'amenée d'air complémentaire qui en résulte active l'incendie. La pratique a montré que l'effet est très positif : en effet une meilleure visibilité offre la possibilité d'une intervention plus rapide des services de secours. De plus, grâce à l'extension moindre des fumées, les dégâts des fumées ainsi que le risque d'intoxication des occupants sont réduits.

3.5.2. Caractéristiques thermiques des parois.

Pour appliquer une méthodologie de calcul, les caractéristiques du bâtiment doivent être connues. Celle-ci est appliquée compartiment par compartiment. Le compartiment doit être défini non seulement en termes de géométrie, mais aussi en termes de caractéristiques thermiques des murs qui peuvent accumuler et transférer une

grande partie de l'énergie dégagée par le feu, et encore en termes d'ouvertures qui permettent l'échange d'air avec l'extérieur du compartiment.

Dans l'approche de la sécurité incendie basée sur le feu naturel, les calculs concernant la sécurité incendie sont basés sur des actions thermiques déterminés physiquement. Contrairement au calcul conventionnel, les paramètres comme l'importance de la charge calorifique, le taux de dégagement de chaleur et le degré de ventilation jouent un rôle important dans le calcul basé sur le feu naturel. Dans la plupart des bâtiments le nombre de scénarios possibles d'incendie est infini et doit être réduit. Seuls des scénarios d'incendie de calcul sont choisis, un certain nombre de modèle incendie sont disponibles pour calculer les actions thermiques.

Dans le concept de sécurité incendie basé sur le feu naturel, le développement du feu est décrit dans le compartiment. On part de l'hypothèse que le feu ne s'étendra pas aux autres compartiments. Cela dépend du comportement du feu des constructions voisines (planchers, murs – y compris les portes -, etc.).

Il est nécessaire de comprendre ce comportement pour évaluer leur capacité à agir comme des obstacles à la propagation du feu.

Les options suivantes sont disponibles :

- Essais ad-hoc : l'élément peut être exposé dans un four à une courbe température- temps calculée avec des modèles de feu basés sur les scénarios de feu les plus défavorables ;
- Jugement expert : cette approche utilise les données d'essais disponibles résultant d'essais de résistance au feu conventionnel ISO sur les éléments séparatifs ;
- Utilisation directe d'exigences ISO : Les règlements Européens courants exigent une certaine résistance au feu conventionnel ISO pour les murs, les plafonds, les portes et les planchers, dépendant de l'utilisation et de la géométrie du bâtiment.

Les deux premières options peuvent être utilisées pour un nombre limité d'éléments séparatifs et entraînent des coûts élevés. Dans la pratique, c'est la troisième option qui est le plus souvent utilisée.

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 perte de chaleur hors du compartiment est un facteur important pour la détermination de la température. Les pertes de chaleur aux frontières du compartiment se produisent par convection et rayonnement. Les caractéristiques thermiques des parois doivent être connues. 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 (inertie thermique).

Les trois paramètres principaux caractérisant les propriétés thermiques d'un matériau sont.

- la chaleur spécifique c ;
- la densité ρ
- la conductivité λ

La conductivité et la chaleur spécifique dépendent de la nature.

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

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

Pour le calcul E_{ff} , la densité, la chaleur spécifique et la conductivité thermique de la frontière du compartiment peuvent être prises à température ambiante.

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 :

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

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

L'**effusivité thermique** élevée des parois en béton se relève dès lors intéressante autant pour le confort thermique que pour le retardement du flash over.

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. Cette grandeur apparaît dans l'équation. Cette grandeur apparaît dans l'équation (rayonnement, convection et conduction). 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 :

$$L_{diff} = (a.t)^{0,5}$$

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

Le tableau 12 donne un aperçu des propriétés thermiques pour quelques types de matériaux :

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

Le transfert de chaleur dans le matériau est, en régime permanent, directement proportionnel à la conductivité thermique alors qu'en régime transitoire, il est, comme montré ci-dessus, directement proportionnel à l'effusivité thermique. Dans le domaine de l'incendie, c'est donc l'effusivité thermique $E_{ff} = (\lambda \cdot \rho \cdot c)^{1/2}$

Elevée, 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.

3.5.3. La sévérité de l'incendie

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

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

Chapitre : 4

La résistance au feu des constructions et les Eurocodes.

La sécurité en cas d'incendie constitue une des six exigences essentielles applicables aux éléments de construction, reprises dans la directive européenne sur les produits de construction (DPC). Les éléments de construction doivent ainsi être conçus et construits afin qu'en cas d'incendie,

- . leur capacité portante soit garantie pendant un certain temps
- . la naissance et la propagation de l'incendie soit limitée
- . l'extension au feu des bâtiments voisins soit limitée
- . l'évacuation des occupants du bâtiment soit assurée
- . la sécurité des équipes d'intervention soit prise en compte.

Selon le document interprétatif, cette exigence peut être concrétisée au moyen de différentes stratégies de sécurité contre l'incendie, à savoir :

- . par des règles actives (détection automatique, système d'extinction, etc.)
- . et des règles passives (compartimentage, dimensionnement des éléments structuraux etc.). [Brúls. A. et Vanderelde. P.]

Certaines parties des Eurocodes traitent des mesures passives de prévention incendie et, plus précisément, de la résistance au feu d'une structure soumise à un incendie. En effet, afin d'éviter qu'un essai de résistance au feu ne soit nécessaire pour chaque produit de construction, des méthodes ont été mises au point pour calculer la résistance au feu des structures en béton, en acier et béton, en bois, en maçonnerie et en aluminium. Ces méthodes de calcul se retrouvent dans les Eurocodes (partie relative au comportement au feu).

4.1 Eurocodes structuraux

Ils regroupent un ensemble de normes pour le calcul des structures et fondations des ouvrages de bâtiment et génie civil. Ils sont destinés d'une part, à constituer un document normatif en application notamment de la directive Européenne sur la coordination des procédures de marchés publics, et d'autre part, à servir de documents de référence pour justifier la conformité des ouvrages aux exigences essentielles de la directive Européennes 89/106/CEE sur les produits de construction et servir de cadre pour établir des spécifications techniques harmonisées de ces produits. L'exécution et le contrôle y sont évoqués dans la mesure où il est nécessaire de préciser la qualité des produits de construction et le niveau de réalisation à satisfaire pour être conforme aux hypothèses adoptées dans les règles de calcul.

Au nombre de neuf, les Eurocodes visent chacun un aspect spécifique de la con-

ception ou un type particulier de construction (structures en béton, métalliques, en bois,)

Les intitulés de ces Eurocodes sont les suivants :

- Eurocode 1 : Bases de calcul et actions des structures (ENV 1991),
- Eurocode 2 : Calcul des structures en béton (ENV 1992),
- Eurocode 3 : Calcul des structures en acier (ENV 1993),
- Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier- béton (ENV 1994),
- Eurocode 5 : Calcul des structures en bois (ENV 1995),
- Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie (ENV 1996),
- Eurocode 7 : Calcul géotechnique (ENV 1997) ?
- Eurocode 8 : Calcul des dispositions de résistance des structures aux séismes (ENV 1998),
- Eurocode 9 : Calcul des structures en alliage d'aluminium (ENV 1999).

De façon générale, l'Eurocode 1, publié par le CEN (Comité Européen de normalisation), définit des bases de calcul et les actions sur les structures. Les Eurocodes 2 à 6 et 9 concernent le calcul des structures. Les Eurocodes 7 et 8, quand à eux, abordent respectivement le calcul géotechnique des bâtiments et ouvrages en génie civil et le comportement des structures soumises à des séismes.

Les neuf Eurocodes susmentionnés ont été subdivisés en plusieurs parties. Le programme comprend au total 57 sujets. A titre d'exemple, les parties 1-2 de ces Eurocodes concernent le calcul du comportement des structures soumises à un incendie. Elles définissent les sollicitations thermiques ainsi que les méthodes d'évaluation du comportement au feu des ouvrages à prendre en compte. Elles constituent des compléments aux parties 1-1 qui concernent le calcul des structures à la température ambiante.

4.1.1 Eurocode feu [INERIS (DRA -03)]

Pour répondre aux exigences formulées dans les textes réglementaires, la résistance au feu des structures est justifiée généralement par des méthodes de calcul simplifiées. Ces méthodes sont contenues dans les Documents Techniques Unifiés (DTU), et leur but est de grouper, d'unifier et d'harmoniser, en les précisant, les principales prescriptions techniques et fonctionnelles concernant les travaux de bâtiment.

Les règles de calculs concernant la prévention et la protection contre l'incendie sont :

- Règles FB (DTU P92-701) : Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton,
- Règles FA (DTU P92-702) : Méthode de prévision par le calcul du comporte-

ment au feu des structures en acier,

- Règles BF 88 (DTU P92-703) : Méthode de justification par le calcul de la résistance au feu des structures en bois,

- Règles FPM 88 (DTU P92-704) : Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des poteaux mixtes (acier + béton).

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

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 - 1996 et de l'ENV 1999 qui fixent des règles de calcul de comportement au feu des structures. Les actions thermiques mentionnés dans le corps du document sont principalement limitées thermiques nominales. Des annexes informatives jointes à ces Eurocodes présentent des données et des modèles pour des actions thermiques ayant une base physique.

Pour les structures métalliques, l'Eurocode 3, partie 1-2, décrit les propriétés de l'acier à température élevée, et les différentes méthodes de vérification de la résistance au feu conventionnel d'éléments tels que les tirants, les poutres et les poteaux.

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 calculs avancés 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.

Il peut être également noté que les Eurocodes, dans leurs ensembles, sont basés sur une approche semi probabiliste de la sécurité. Cette approche, décrite dans l'annexe A de l'Eurocode 1, permet de quantifier la sécurité d'une structure. Elle fait appel à des facteurs de sécurité γ pour les actions et les propriétés des matériaux. Les actions caractéristiques sont majorées et les résistances caractéristiques diminuées afin de dimensionner avec une sécurité suffisante. Cette approche de l'Eurocode 1 considère enfin implicitement une probabilité de ruine de la structure extrêmement faible et égale à environ $1 \cdot 10^{-6}$ par année.

Par ailleurs pour information, concernant le phénomène d'explosion, il peut être noté que la partie 2-7 de l'Eurocode 1 permet de définir les actions de calcul dans le cadre de toute action accidentelle possible d'impact ou d'explosion.

4.2 Méthodes de calcul

Le calcul des structures au feu implique d'une part, la prise en compte des actions thermiques (ENV- 1991-2-2) et des autres actions mécaniques (autres parties de l'ENV 1991) 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.

4.2.1. Actions mécaniques

Concernant les actions mécaniques à prendre en considération en cas d'incendie, il est admis que la probabilité d'existence simultanée d'un incendie et d'un niveau de charge extrêmement désavantageux est très faible : un incendie doit ainsi être considéré comme une situation accidentelle. Ce principe, défini dans la partie 2-2 de l'Eurocode 1, constitue une première différence de taille entre le calcul en cas d'incendie et le calcul à température ordinaire : il faut employer la combinaison accidentelle des actions, c'est-à-dire la valeur de calcul de l'action permanente agissant simultanément avec la valeur fréquente de l'action variable principale, les valeurs quasi permanentes des autres actions variables et la valeur de calcul de l'action du feu soit :

$$\Sigma \gamma_{GA} \cdot G_{k,j} + \Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + A_{d,(t)}$$

Dans cette formule, on a :

$G_{k,j}$ = la valeur caractéristique des actions permanentes (poids propre, précontrainte)

$Q_{k,1}$ = la valeur caractéristique de l'action variable principale

$Q_{k,i}$ = la valeur caractéristique des autres actions variables

γ_{GA} = le coefficient partiel de sécurité pour les actions permanentes en situation accidentelle, soit 1.0

$\Psi_{1,1}$ = le coefficient donnant la valeur fréquente d'une action variable (tableau 9.3 de l'ENV 1991-1)

$\Psi_{2,i}$ = le coefficient donnant la valeur quasi permanente d'une action variable (tableau 9.3 de l'ENV 1991-1)

$A_{d,(t)}$ = la valeur de calcul de l'action accidentelle induite par l'incendie.

Exemple de calcul :

Soit une poutre de plancher isostatique dans un immeuble de bureau, soumise à une charge permanente G_k de 3 KN/m² et à une charge utile $Q_{k,1}$ de 2 KN/m² comme action variable principale.

Dimensionnement à température ordinaire :

$$1.35 G_k + 1.5 Q_{k,1} = 1.35 \times 3 + 1.5 \times 2 = 7.05 \text{ KN/m}^2$$

Situation accidentelle :

$$1.0 G_k + 0.5 Q_{k,1} = 4 \text{ KN/m}^2$$

En général, cela conduit à une charge en situation d'incendie de l'ordre de 50 à 70% de celle prise en compte lors du calcul à la température ordinaire.

Le taux de chargement à chaud η_i le plus élevé qui soit est de 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.

4.2.2. Les différents modèles de l'action thermique

Il y a plusieurs façons de modéliser l'incendie [L. G. Cajot , M. Haller et M. Pierre] à l'intérieur d'un bâtiment. Dans un ordre croissant de complexité, les modèles utilisés les plus couramment sont :

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

Et enfin les modèles de feux localisés qui eux n'affectent pas uniformément la surface du compartiment .Tous ces modèles sont décrits dans l'Eurocode 1, partie 2-2.

4.2.3 Courbes normalisées

La façon la plus simple de représenter un incendie est d'utiliser une courbe normalisée, c'est-à-dire une relation donnant la température des gaz ambiants en fonction du temps.

Ces relations ont été développées, à l'origine, pour tester le comportement au feu des éléments de construction en laboratoire. Pour établir un classement d'éléments testés dans des fours différents, il est en effet nécessaire que la même action thermique leur soit appliquée

Bien que les courbes existantes ne puissent refléter toutes les situations de la réalité, elles restent la représentation de loin la plus utilisée en pratique et permettent de classer la résistance au feu des éléments de construction.

La partie 2-2 de l'Eurocode 1 donne trois exemples de courbes normalisées (Fig. 7)

- 1- la courbe standard
- 2- la courbe de feu extérieur
- 3- la courbe de feu d'hydrocarbures

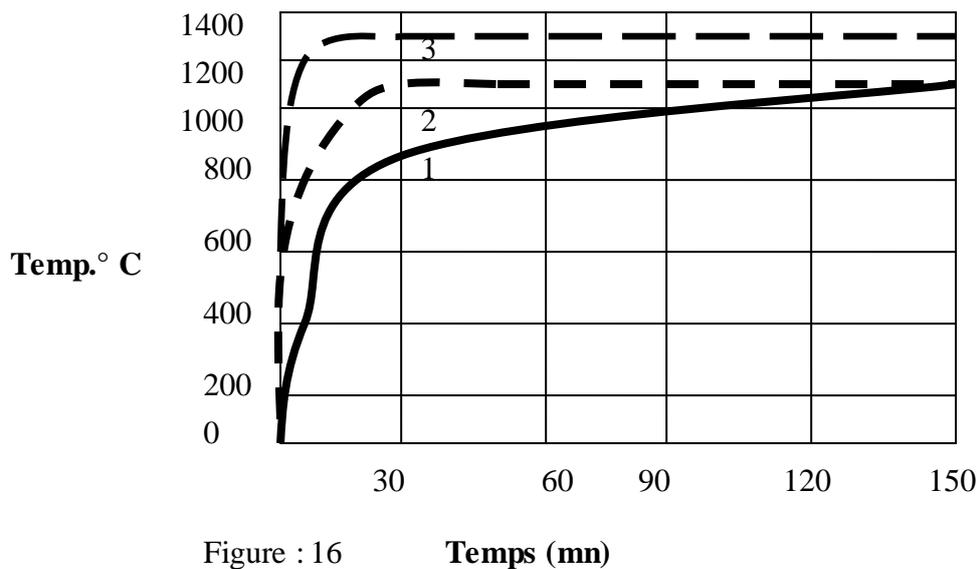


Figure : 16 Temps (mn)

- 1- courbe standard : ou courbe ISO R834 est la courbe à laquelle toutes les réglementations européennes se réfèrent. De façon simplifiée, il peut être retenu que cette courbe atteint environ 500 °C après seulement 3 minutes, 800 °C après 30 minutes et plus de 1000 °C après 90 minutes. La courbe standard (courbe température/ temps normalisé)

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

θ_g : Température des gaz dans le compartiment en feu en °C ou température des gaz à proximité de l'élément.

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

L'équation caractérisant la courbe standard met en évidence deux phases distinctes lors d'un incendie : d'une part, la période d'embrassement généralisé durant laquelle se produit une augmentation très rapide de la température ou un choc thermique (jusqu'à une température d'environ 800 °C), suivie d'autre part, de la période où l'incendie est entièrement développé, caractérisée par une augmentation moins rapide de la température pouvant aller jusqu'à 1200 °C. Cette courbe a plutôt comme vocation de représenter les feux de produits cellulosiques.

Les conditions de température ainsi définies reproduisent l'élévation de la température des gaz chauds de combustion et non l'agression directe des flammes. Ainsi les flammes des brûleurs sont disposées dans les fours de façon à éviter les attaques directes.

La courbe ISO, dont l'avantage pratique est certain, présente des écarts par rapport à un incendie naturel. En effet les éléments suivants peuvent être notés :

- la courbe ISO est une courbe théorique, qui peut être dépassée du-

- rant un temps limité dans un incendie réel ;
- la courbe ISO doit être prise en considération pour tout le compartiment, même si celui-ci est très grand. En réalité, lors d'un incendie, la température varie sensiblement selon l'endroit ;
- la courbe ISO ne tient pas compte de la phase de « pré-flashover » d'un incendie réel ;
- la courbe ISO implique une température toujours croissante. Dans la pratique, il est prouvé que la température commence à diminuer après que la plus grande partie des combustions ait brûlé ;
- il n'existe qu'une seule courbe ISO pour tous les types de bâtiment, quelles que soient les conditions de charge calorifique et de ventilation.

2- La courbe de feu extérieur.

$$\theta_g = 20 + 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32t} - 0,313 \cdot e^{-3,8t})$$

C'est une courbe plafonnée à une élévation de la température égale à 20 + 660 °C, c'est-à-dire à une température nettement inférieure à la courbe standard. Elle s'applique à la face des murs externes 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.

3- La courbe hydrocarbure :

$$\theta_g = 20 + 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t})$$

La courbe hydrocarbure augmente plus rapidement que la courbe standard. De plus, elle est plafonnée à 20 + 1080 °C. Cette courbe est utilisée pour les feux de liquides de types hydrocarbures.

4.2.4 : courbes paramétriques.

Une courbe paramétrique est, comme la courbe normalisée, une relation donnant l'évolution de la température en fonction du temps en cas d'incendie. Toutefois, elles constituent un moyen simple pour tenir compte d'importants phénomènes physiques pouvant influencer le développement d'un feu dans un bâtiment particulier. Ces courbes contiennent certains paramètres physiques influençant le développement de l'incendie dans un compartiment :

- la géométrie du compartiment
- la charge calorifique présente dans le compartiment,
- les ouvertures dans les murs et / ou dans le toit,
- le type et la nature des différents éléments de construction constituant les limites du compartiment.

L'annexe B de l'ENV 1991-2-2 fournit des exemples de courbes paramétriques censées reproduire au mieux les conditions réelles d'un incendie.

4.3. Les modèles à zones

Les modèles consistent à décomposer le système en sous-éléments ou zones. Pour chacune des zones, des lois globales et semi-empiriques sont utilisées pour décrire ce qui s'y passe, y compris les échanges de masse et chaleur avec les zones voisines. Les propriétés physiques et quantités calculées, telles la température, concentration des fumées, sont supposées uniformes dans une zone.

Pour la plupart des modèles, une zone correspond à une pièce d'un bâtiment, un bureau ou un hall industriel. Toutefois, certains modèles décomposent une pièce en zones dont les frontières ne correspondent à aucune barrière réelle mais essaient de prendre en compte les phénomènes physiques de façon à ce que chaque zone ait des propriétés homogènes. Ces modèles ne donnent pas seulement l'évolution de la température des gaz dans un compartiment, mais aussi des informations supplémentaires comme la température dans les murs ou la vitesse des gaz à travers les ouvertures.

4.3.1. Modèles à une zone.

Le modèle à une zone est basé sur l'hypothèse fondamentale que, pendant le feu, la température des gaz chauds est uniforme dans le compartiment. Les modèles à une zone sont adaptés pour les conditions de post-flashover. Les données nécessaires doivent être plus précises que pour les courbes paramétriques et sont les mêmes que celles requises pour un modèle à deux zones.

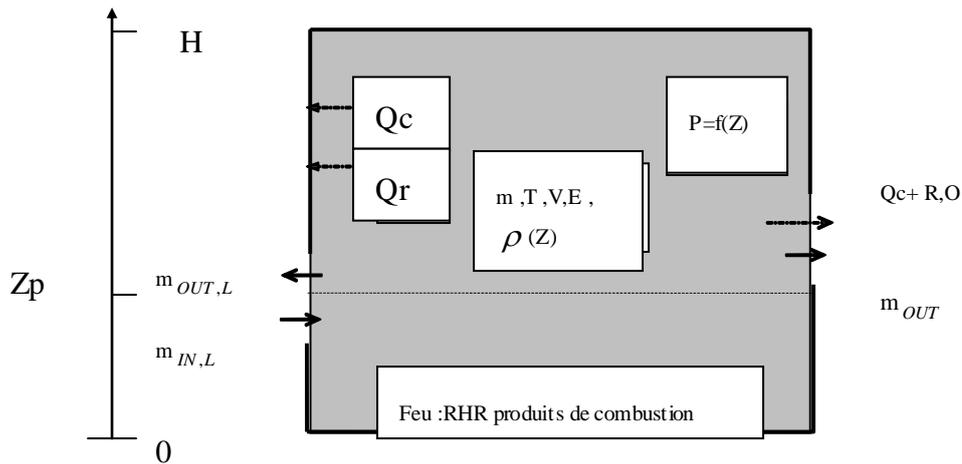


Figure :17 : Un compartiment dans un modèle à une zone

4.3.2. Modèles à deux zones

Les modèles à deux zones sont des modèles numériques qui calculent l'évolution de la température des gaz en fonction du temps dans la couche inférieure et supérieure, à l'aide des bilans massique et énergétique écrits pour chacune des deux couches au sein desquelles la température est supposée uniforme. Un incendie peut être appréhendé par un modèle à deux zones qui lui-même basculera vers un modèle à une zone au moment du flashover. Ces modèles ont été développés plus particulièrement par l'UNIVERSITE de Liège, notamment au sein du programme OZONE. [J.F.Candorin, D. Pinteau, J.C.Dotreppe et J.M. Franssen]

La question est comment et quand la transition de l'application du « modèle à deux zones » à celle du « modèle à une zone » se produit.

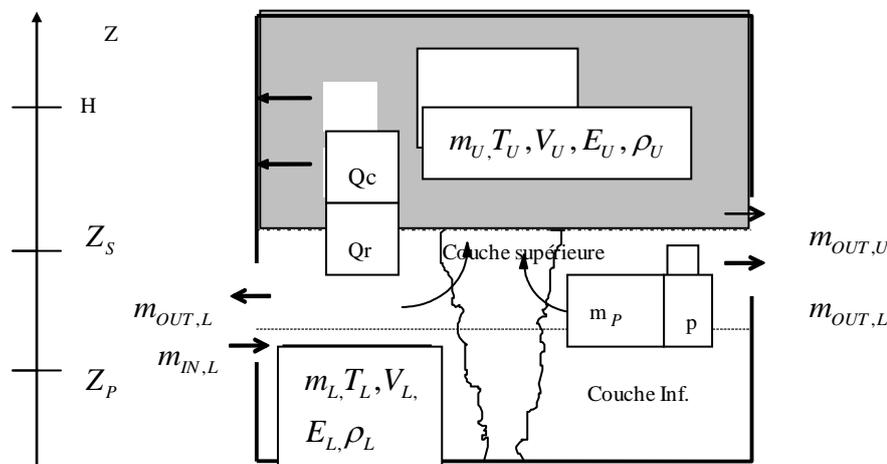


Figure 18 : Un compartiment dans un modèle à deux zones

Les résultats d'un « modèle à deux zones » sont donnés sous la forme de deux variables principales :

- température de la zone supérieure T_U ;
- hauteur de l'interface des deux zones H_i .

Ces deux variables vont conditionner la simulation avec le modèle de zone.

Les quatre conditions suivantes peuvent limiter l'application d'un « modèle à deux zones »

-condition (C1) : $T_U > 500^\circ\text{C}$

La température importante des produits de combustion (plus élevée que 500°C) conduit à un flashover par une pyrolyse de l'ensemble de la charge calorifique du compartiment ;

-condition 2 (C2) : $H_i < H_q \text{ et } T_U > T_{\text{ignition}}$

La diminution de la hauteur d'interface (H_i) est telle que le matériau combustible se trouve dans la couche de fumée (hauteur maximale avec combustible H_q) et si la couche de fumée présente une température élevée (plus élevée que T_{ignition} qui est supposée à 300°C), cela conduit à la propagation du feu dans tout le compartiment par l'inflammation du combustible ;

-condition 3 (C3) : $H_i < 0,1 H$

La hauteur d'interface diminue et conduit à une très faible épaisseur de la couche inférieure, ce qui n'est pas représentatif d'un phénomène à deux zones ;

-condition 4 (C4) : $A_f > 0,5 A_f$

La surface touchée par le feu est trop importante par rapport à la surface du sol du compartiment pour considérer un feu localisé.

En fait, les conditions 1 ou 2 conduisent à une modification du taux initial de dégagement de chaleur (simulation avec un modèle à deux zones) lors de la transition vers un modèle à une zone. Cette modification est réalisée comme indiqué dans la figure 19.

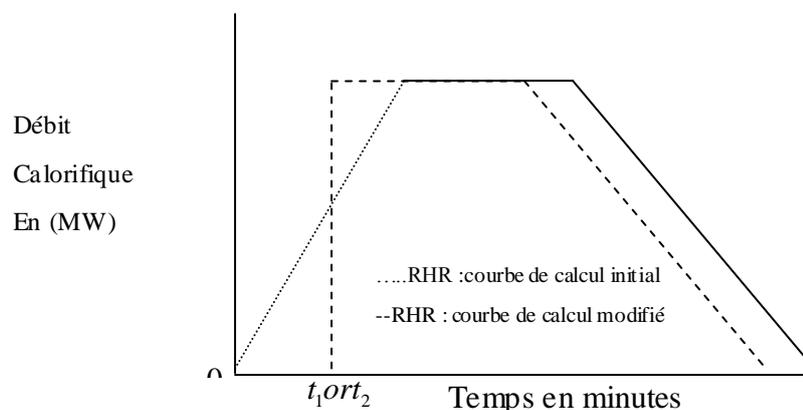


Figure 19 : courbe de débit calorifique

L'approche décrite ci-dessous est présentée dans le schéma de la figure 20. Ce schéma montre dans quelles conditions (modélisation à deux zones ou à une zone) les courbes de température de calcul doivent être déterminées

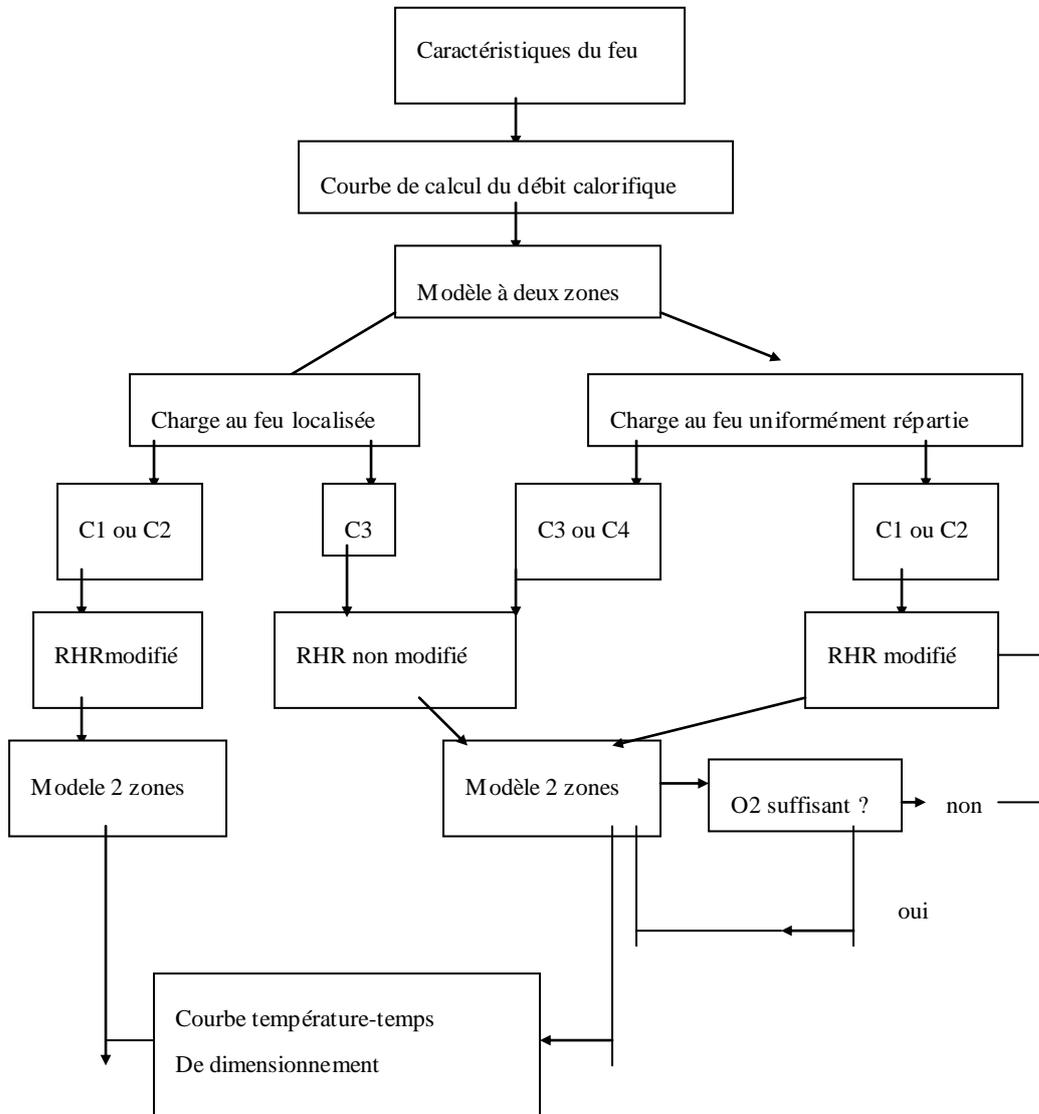


Figure 20 : Combinaison de modèles à une zone et à deux zones.

Dans un modèle de zones, les équations exprimant les bilans de masses et d'énergie sont écrites pour chacune des deux couches et les échanges entre les deux couches sont pris en compte par des modèles d'entraînement d'air.

Comme résultat de la simulation, la température des gaz est donnée pour chacune des deux couches, ainsi que des informations sur les températures des murs et le flux passant par les ouvertures. L'évolution, en fonction du temps et de l'épaisseur de chaque couche, constitue un résultat très important. L'épaisseur de la couche inférieure, qui conserve une température relativement basse et ne contient pas de produits de combustion, est très importante pour estimer

La tenabilité du compartiment pour les occupants. La figure 18 montre comment

un compartiment est modélisé par un modèle à deux zones et représente différents termes d'équilibre d'énergie et de masse.

La figure 17 est typique d'une situation simple où le compartiment échange la masse et l'énergie uniquement avec l'environnement extérieur. Ces types de modèles permettent d'analyser des bâtiments plus complexes dans lesquels le compartiment d'origine a des échanges de masse et d'énergie avec l'environnement extérieur mais aussi avec les autres compartiments dans le bâtiment. Cela présente un intérêt particulier pour analyser la propagation de fumée du compartiment d'origine vers d'autres compartiments adjacents. Une telle situation, analysée par un modèle multi-compartiment à deux zones est décrite sur la figure 21.

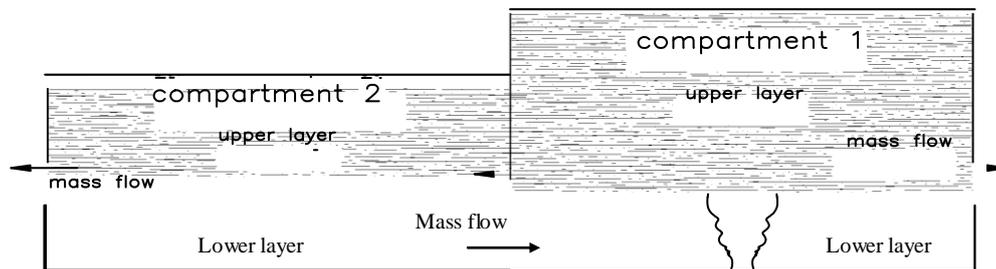


Figure 21 : Un compartiment dans un modèle multi-compartiments à deux zones.

4.3.3. La méthode Heskestad

L'action thermique d'un feu localisé peut être évaluée en utilisant la méthode Heskestad [G.Heskestad, Peter K.Wu et John L.De Ris.] Des différences sont constatées concernant la hauteur relative des flammes par rapport au plafond.

La longueur de flamme L_f d'un feu localisé (voir figure 22) est donnée par :

$$L_f = 1,02D + 0,0148Q^{2/5}$$

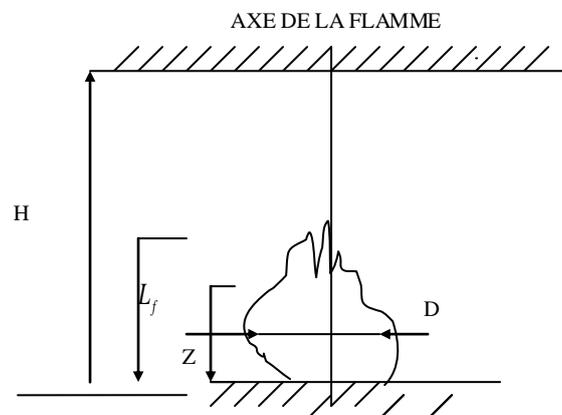


Figure 22. : Modèle de feu localisé pour des flammes n'atteignant pas le plafond.

Quand les flammes n'atteignent pas le plafond du compartiment ($L_f < H$; voir figure 8.5) où dans le cas d'un feu à l'air libre, la température $\Theta(Z)$ dans le panache le long de l'axe symétrique vertical de la flamme est donnée par :

$$\Theta_{(Z)} = 20 + 0,25 Q_C^{2/5} (Z - Z_0)^{-5/3}$$

Où :

D est le diamètre du feu (m) voir figure 22.

Q est le débit calorifique (W) du feu

Q_C est la partie convective du débit calorifique (W), avec $Q_C = 0,8 Q$ par défaut

Z est la hauteur (m) le long de l'axe de la flamme, voir figure 8.5.

H est la distance en (m) entre la source du feu et le plafond, voir figure 8.5.

4.3.4 La méthode Hasemi [Hasemi Y et Tokunaga T.]

La méthode Hasemi est un outil simple pour l'évaluation des effets d'un feu localisé sur des éléments de structure horizontaux situés au dessus du feu. Elle est basée sur les résultats d'essais réalisés à l'institut de recherches du bâtiment Tsukuba au Japon.

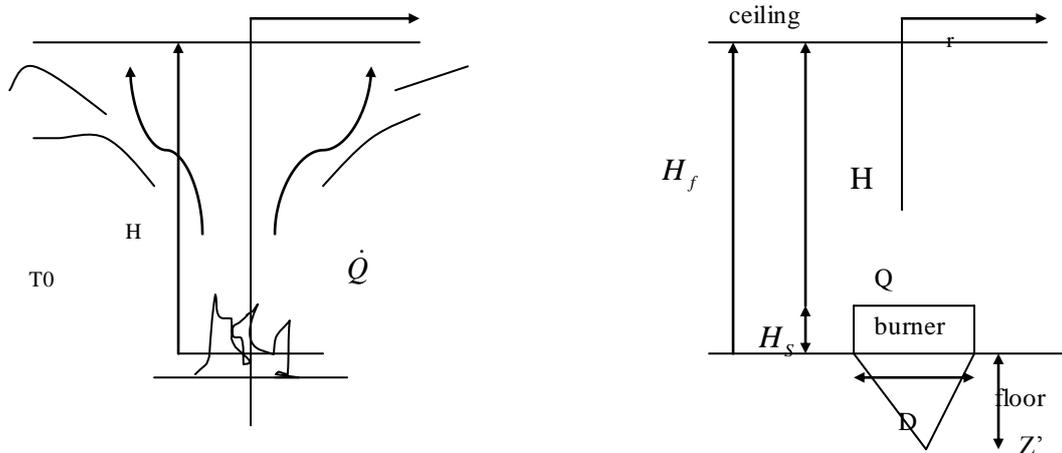


Figure 23 :Schéma de feu localisé et description d'un feu de Hasemi.

Les données pour l'application de la méthode sont :

Q Débit calorifique du feu

H_f Hauteur entre le plancher et le plafond en (m)

D Diamètre (ou la longueur caractéristique) du feu en (m)

H_s Distance verticale entre le plancher et la source du feu (m)

Les variables sont :

H Distance entre la source du feu et le plafond (m)

Q^* Taux adimensionnel de dégagement de chaleur [-]

Q_H^* Taux adimensionnel de dégagement de chaleur [-]

Z' Position verticale de la source de chaleur virtuelle, par rapport à la source du Feu (m)

L_H Longueur horizontale de la flamme sur le plafond (m)

R Distance horizontale, au plafond, à partir du centre du feu (m)

La procédure est :

Calculer H $H = H_f - H_s$

Calculer Q^* $Q^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 D^{2,5}}$

Calculer Q_H^* $Q_H^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 H^{2,5}}$

Calculer Z' $Z' = 2,4D(Q^{*2/5} - Q^{*2/3})$ $Q^* < 1,00$

$Z' = 2,4D(1,00 - Q^{*2/5})$ $Q^* \geq 1,00$

Calculer $(L_H + H)/H$ $\frac{L_H + H}{H} = 2,90 Q_H^{*0,33}$

4.4. Combinaison entre un modèle à deux zones et un modèle de feu Localisé.

Dans un feu localisé, la distribution de la température des gaz dans le compartiment peut être estimée par un modèle à deux zones. Dans ce monde, la température des gaz dans chaque couche est calculée avec l'hypothèse qu'elle est uniforme dans chaque couche. Cette température moyenne dans la zone chaude est généralement suffisamment précise tant que des phénomènes globaux sont considérés : quantité de fumée à extraire du bâtiment, probabilité de flashover, écroulement total du toit ou du plafond, etc.

Pour l'évaluation du comportement local d'un élément de structure situé au dessus du feu, l'hypothèse d'une température uniforme peut être insuffisante et le modèle à deux zones doit être combiné avec la méthode du feu localisé.

La norme EC1 feu donne également la possibilité d'effectuer un calcul de l'échauffement local des gaz au droit du feu localisé qui pourrait se développer. Ce type de feu peut entraîner, au titre qu'un feu généralisé, la ruine d'un bâtiment

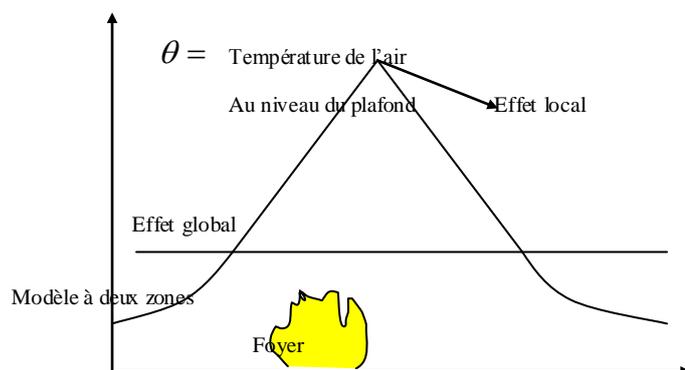


Figure 24. Combinaison entre un modèle à deux zones et un modèle de feu localisé.

4.4.1 Modèle CFD. [INERIS 2007]

Les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics), dits aussi modèles à champs, permettent d'obtenir une solution approchée des équations tridimensionnelles, stationnaires ou transitoires, de Navier Stokes qui régissent le comportement des fluides. Comme ces dernières ne peuvent pas être résolues directement car ce sont des équations différentielles non linéaires et couplées, elles sont tout d'abord discrétisées. Pour ce faire, le volume du domaine de calcul est subdivisé en un nombre d'éléments de volume beaucoup plus petit. Le nombre de ces éléments dépend du scénario et des modèles physiques et numériques utilisés mais son ordre de grandeur est de quelques dizaines de milliers pour une pièce de 10 m^3 . Les équations sont discrétisées pour chacun de ses éléments. Ainsi est obtenu un large système d'équations algébriques fortement couplées. Une solution est calculée grâce à l'emploi de méthodes numérique itératives.

La solution obtenue consiste en la valeur des variables sélectionnées pour chacun des éléments. Pour les incendies, des variables qui sont considérées sont la température de l'air, les composantes de la vitesse de l'air et les concentrations des produits toxiques émis lors de la combustion. La visibilité à travers les fumées peut aussi être déduite de la concentration des fumées.

Les modèles CFD permettent donc de prédire en détail ce qui se passe dans une enceinte, y compris lorsque celle-ci a une géométrie compliquée, et de prendre en compte les effets tridimensionnels. Par contre, ils nécessitent beaucoup plus de puissances de calcul que les modèles à zones. Il est donc souvent nécessaire de trouver un compromis quant au degré de sophistication de la modélisation des phénomènes physiques afin d'avoir des temps de calcul qui restent raisonnables.

4.4.2 Différentes approches

Pour construire, un modèle CFD il y a plusieurs étapes :

- La construction de la géométrie
- La construction du maillage
- La sélection des modèles physiques
- La prescription des conditions aux limites
- La sélection de méthodes numériques pour obtenir une solution approchée
- Le traitement des résultats

Pour chacune des étapes, différentes méthodologies apparaissent dans les outils CFD existants. Ces différentes approches sont revues et discutées pour l'application au calcul des conséquences d'un incendie. Ceci permettra ainsi d'évaluer un outil CFD en fonction du type de problème étudié et des modèles physiques et numériques disponibles dans l'outil.

4.4.3 Géométrie et maillage

La géométrie tridimensionnelle du scénario modélisé est tout d'abord construite : elle est représentée par un ensemble de surfaces qui correspondent au confinement de l'espace, c'est-à-dire qui représentent les murs des pièces, les sols, les plafonds, les escaliers, mais aussi les objets ou obstacles dans les pièces comme les meubles.

Il existe différents types de maillage qui correspondent à des mailles ou éléments de formes différentes. D'une part, il y a des maillages structurés composés d'éléments hexagonaux qui forment des lignes continues à travers le domaine. Parmi ceux-ci, on trouve des maillages rectilignes pour lesquels les formes curvilignes de la géométrie sont représentées approximativement par des 'escaliers' et des maillages 'body-fitted' qui suivent au mieux le contour des surfaces définissant la géométrie.

Les maillages non structurés sont d'usage plus flexible : ils peuvent suivre les courbures des surfaces définissant la géométrie et donc être appliqués à tout type de bâtiment ; aussi, il est possible de diminuer la taille des mailles à certains endroits, comme par exemple où se trouve l'incendie, sans trop augmenter le nombre des mailles dans le reste du domaine. A l'inverse, les maillages structurés conviennent plutôt aux bâtiments à géométrie rectiligne et la réduction en taille des mailles à un endroit particulier se répercute sur l'ensemble du maillage, ce qui au final peut augmenter significativement le nombre de mailles et par conséquent le temps de calcul.

4.5. Sélection des modèles physiques

En fait, ce sont rarement les équations exactes de Navier-Stokes qui sont à l'origine des modèles CFD parce que la résolution des équations exactes serait trop coûteuse en temps de calcul comme c'est le cas pour la turbulence et la combustion. Ce sont donc des équations approchées qui sont proposées pour dé-

crire les phénomènes physiques et l'ensemble de ces équations constitue un 'modèle'

4.5.1. Modèles de turbulence

Les incendies en milieu confiné génèrent de la turbulence qui interagit sur le mélange air- fuel et air- produits de combustion, donc influence la combustion et la dispersion des fumées. Les écoulements turbulents contiennent des tourbillons ayant une large gamme d'échelles de longueur et de temps. Pour un incendie confiné, ces échelles dépendent de la puissance de l'incendie et des dimensions du confinement mais la taille des tourbillons est typiquement comprise entre quelques millimètres et plusieurs mètres pour un même scénario [Cox.G (1995)]. Ceci rend la modélisation difficile.

Il existe trois grandes catégories de modèles de turbulence qui sont revues ci-dessous : Direct Numerical Simulation (D.N.S) ; Large Eddy Simulation (L.E.S) et modèles moyennés de Reynolds.

Direct Numerical Simulation (D.N.S)

Les équations de Navier-Stokes sont résolues pour obtenir tous les tourbillons turbulents au sein de l'écoulement.

Toutefois, les mailles dans le domaine de calcul doivent être au moins de la taille du plus petit tourbillon et le pas de temps au maximum de la plus petite échelle de temps des tourbillons ce qui génèrent de grands nombres de mailles et pas de temps et donc des temps de calcul très longs, en particulier pour les écoulements fortement turbulents. Ceci rend l'application de la D.N.S aux incendies dans les bâtiments impossible au vu de la performance actuelle des ordinateurs. Pour l'instant, ce modèle est essentiellement utilisé comme outil académique pour comprendre les phénomènes turbulents et proposer des modèles plus simples.

Large Eddy Simulation (L.E.S.)

Seuls les tourbillons de grande échelle sont prédits par un modèle L.E.S. L'effet des tourbillons de plus petite taille est pris en compte par un terme de fermeture dans les équations ou il est tout simplement ignoré.

La taille des mailles ainsi que le pas de temps doit être de l'ordre de grandeur du plus petit tourbillon résolu et donc cette technique, bien que relativement coûteuse en temps de calcul, l'est beaucoup moins qu'un modèle D.N.S. Il est donc possible de l'appliquer à des incendies en milieu confiné. Cette approche est d'ailleurs de plus en plus utilisée d'une façon générale et en particulier dans le domaine des incendies. Ceci est sans doute lié à la mise à disposition gratuite par l'institut Américain National institute of standards and technology d'un outil CFD spécifique aux incendies, Fire Dynamics Simulator (FDS), basé sur la L.E.S.

La méthode L.E.S. représente a priori le meilleur compromis actuellement pour prédire un écoulement turbulent ; moins coûteuse qu'une approche D.N.S., elle

reste plus précise qu'un modèle moyenné de Reynolds. Au final, il n'est pas évident que les résultats obtenus avec un modèle de turbulence L.E.S. seront meilleurs que ceux obtenus avec un modèle de turbulence moyenné de Reynolds.[Pope. S.B. (2004)]

Modèles moyennés de Reynolds.

Pour ce type de modèles, les équations exactes de Navier-Stokes sont moyennées. Les équations ainsi obtenues ne résolvent pas les mouvements turbulents au sein de l'écoulement mais permettent d'obtenir les caractéristiques moyennées de l'écoulement : vitesse, température, concentration en produits de combustion, ainsi que les corrélations de fluctuations moyennées.

Comme les mouvements turbulents ne sont pas résolus, il suffit que le maillage soit suffisamment fin pour permettre de capturer les phénomènes transitoires des valeurs moyennées. Le nombre de mailles nécessaire est donc beaucoup moindre que pour les méthodes L.E.S. et D.N.S., ce qui donne des temps de calcul très raisonnables. Ces modèles peuvent donc être appliqués à des espaces confinés complexes et ayant un large volume.

Les modèles moyennés apportent moins d'information que les modèles L.E.S. et D.N.S. mais ces informations sont dans la grande majorité des cas suffisantes pour estimer la tenue des structures et des personnes en cas d'incendie. Seulement lorsque l'incendie génère des produits de combustion hautement toxiques, il pourra être nécessaire d'employer la méthode L.E.S. afin de pouvoir identifier les pics de concentration locaux et de courte durée qui font apparaître les tourbillons turbulents et qui pourraient éventuellement correspondre aux conditions létales.

4.5.2. Modèles de combustion

Modèle de source volumique de chaleur

La méthode la plus simple pour modéliser les conséquences d'un incendie consiste à employer un modèle de source volumique de chaleur.

Dans ce modèle, le phénomène de combustion n'est en fait pas modélisé. Sont pris en compte seulement les effets thermiques et toxiques qui proviennent de la combustion. Une source de chaleur et de produits toxiques est imposée dans un volume prédéfini. Les caractéristiques de ce volume, taille et forme, correspondent à la zone de flamme de l'incendie dans laquelle se produit la combustion. La chaleur et les produits de combustion produits sont répartis uniformément au sein de ce volume. Il est possible de représenter le développement de l'incendie en faisant varier en fonction du temps les flux de chaleur et de produits de combustion ainsi que le volume au sein duquel ces valeurs sont prescrites. Ceci nécessite toutefois de connaître au préalable la cinétique de combustion. Il existe des situations pour lesquelles il est plus difficile de définir au préalable la géométrie de la flamme. C'est le cas, par exemple, lorsque l'incendie est proche des

parois ce qui va modifier l'entraînement d'air frais par la flamme et donc son approvisionnement en oxygène, ou lorsque l'incendie est soumis à une ventilation qui va influencer la combustion. Un modèle de source volumique de chaleur n'est alors pas recommandé.

Modèle de combustion rapide.

D'autres modèles ont été développés pour prédire la distribution de chaleur dans la flamme au lieu de l'imposer uniformément sur un volume prédéfini. Ces modèles sont capables de calculer la distribution de chaleur de la flamme, et donc de prédire la forme et le volume occupés par celle-ci, d'après les conditions de l'écoulement et les quantités respectives de combustible et air présentes qui sont évalués lors du calcul CFD.

Les modèles les plus simples sont basés sur l'hypothèse que la réaction de combustion se produit instantanément entre le combustible et l'air dans la limite des concentrations présentes et dans les conditions stoechiométrique.

Cette hypothèse est valable lorsque le temps de combustion est très inférieur au temps de la turbulence caractérisant le temps de mélange combustible comburant. Le modèle de ce type le plus courant est le modèle 'Eddy-Break-up' proposé initialement par [Spalding. D.B. (1971)]. Il suppose qu'une seule réaction se produit, qu'elle est instantanée et que tout le combustible est oxydé. Il fait intervenir une échelle de temps turbulent qui caractérise le mélange entre le combustible et l'air ambiant et qui est calculé d'après l'intensité de la turbulence présente dans l'écoulement et évaluée lors du calcul CFD.

Modèle de combustion limitée par la cinétique chimique.

En réalité, le processus de combustion n'est pas instantané mais il est limité par la cinétique des diverses réactions chimiques qui se produisent et qui sont de plus compétitives entre elles. Aussi les temps caractéristiques de ces réactions chimiques sont du même ordre de grandeur ou supérieurs au temps caractéristique de turbulence, l'hypothèse de réaction instantanée n'est plus valable.

Plusieurs modèles ont été développés pour essayer de prendre en compte la cinétique chimique des réactions. Le modèle de ce type le plus courant est le modèle dit 'laminar flamellet'. Pour sélectionner le modèle de combustion le plus approprié pour un scénario donné, se référer par exemple à [Williams.F.E (1985)] ou [Borghini.R et Destriau. M. (1998)].

Modèles de pyrolyse.

Des modèles de pyrolyse permettent de simuler la dégradation thermique et la pyrolyse de combustibles solides ou liquides. Ceux-ci évaluent les flux thermiques à la surface du combustible en prenant en compte la conduction de la chaleur au sein du combustible transformé en gaz. Un modèle de combustion décrit plus haut est employé pour prédire la combustion des gaz ainsi formé. La propagation de l'incendie au sein des combustibles solides ou liquides peut ainsi être prédite.

4.5.3. Modèles de radiation

Vu les températures élevées atteintes par les incendies en milieu confiné, des échanges radiatifs ont lieu entre les sources de radiation qui sont principalement le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau et les suies, et les receveurs, soit les parois solides, les mélanges de gaz et produits de combustion, et les particules de fumées.

Plusieurs types de modèles existent pour prendre en compte les effets des échanges de chaleur par radiation.

Méthode de perte de chaleur.

Cette méthode se contente d'éliminer à la source la fraction de chaleur qui sera perdue par radiation. Celle-ci est généralement estimée à 25-30%. Ainsi le flux de chaleur émis par l'incendie est fixé à la puissance de l'incendie moins les 25-30% perdus par radiation.

Le plus souvent la chaleur ainsi transformée par radiation est complètement négligée dans la suite des calculs CFD, c'est-à-dire qu'elle n'est pas transmise aux receveurs. [Glynn. D.R, Eckford. D.C et Pope. C.W.(1996)] ont toutefois essayé d'améliorer ce modèle en augmentant la température de l'air dans les mailles touchant les parois d'après la quantité de chaleur retirée de la source incendie afin de reproduire, bien que sommairement, l'effet des échanges radiatifs entre l'incendie et les parois. Les effets radiatifs ne sont malgré tout pas prédits puisque de nombreux paramètres doivent être spécifiés.

Méthode de transfert radiatif aux parois.

Cette méthode évalue les transferts de chaleur par radiation aux parois d'après la température des parois, la température des gaz dans les mailles juxtaposant les parois, la concentration en fumées dans ses mailles et l'émissivité de la fumée. Cette méthode peut être employée avec la méthode précédente.

Méthode des six flux.

Cette méthode qui ne peut être appliquée qu'aux maillages structurées, fait l'hypothèse que le flux radiatif est uniforme à travers les six faces de chacune des mailles de calcul. Cette hypothèse permet de simplifier les équations différentielles intégrales qui régissent les transferts radiatifs. Une solution de ces équations peut alors être obtenue par les mêmes méthodes numériques que celles employées pour résoudre les autres équations du modèle CFD pour le calcul des vitesses, température et concentrations en produits toxiques.

La principale limitation de cette technique est qu'elle ne prend pas en compte les transferts radiatifs qui sont obliques au maillage structuré sur lequel elle est appliquée.

Modèle de transfert discret

Cette méthode suit un certain nombre représentatif de rayons de radiation à travers le domaine de calcul et résout une équation pour obtenir l'intensité de radiation le long de chacune de ces rayons. Ces rayons suivent des directions fixées à priori mais qui sont indépendantes du maillage pour le calcul des variables hydrodynamiques. En général, les rayons ne sont suivis qu'entre les parois : ils ne se réfléchissent pas contre les parois pour être suivis jusqu'à leur extinction. Le bilan entre la chaleur absorbée et perdue par radiation est estimé pour chaque maille hydrodynamique d'après le nombre de rayons traversant la maille et l'intensité le long de celles-ci. Le bilan ainsi évalué est inclus dans l'équation d'énergie pour obtenir la température des gaz dans la maille. Cette méthode représente néanmoins un compromis acceptable entre précision et temps de calcul. Elle peut être coûteuse pour les espaces à géométrie complexe et/ou un grand volume à cause du grand nombre de rayons qu'il faut alors considérer.

Modèles de Monte Carlo.

Cette technique émet un nombre de rayons dans des directions relativement arbitraires. Celles-ci sont suivies jusqu'à ce qu'elles atteignent un obstacle ou bien disparaissent du domaine de calcul. Là encore, la fiabilité des résultats dépend du nombre de rayons suivis. La méthode est la plus coûteuse en temps de calcul mais c'est la plus flexible et la plus facile : elle peut être appliquée à tout type de géométrie et tout type de maillage.

Les trois dernières méthodes nécessitent le calcul des pouvoirs émissifs et absorbants locaux qui dépendent de la composition du gaz. Le calcul de ces valeurs peut se faire selon différentes approches. La plus simple consiste à supposer que les fumées sont un gaz isotherme gris avec des coefficients d'absorption constants. Cette méthode donne de bons résultats pour des incendies de petites à moyenne puissance, mais est moins fiable pour de larges incendies.

4.5.4. Modèles de transport de fumées

Les fumées sont constituées de gaz chauds toxiques et de particules de suie. La constitution des fumées, nature et quantité des produits émis, dépendent des matières combustibles et du mode de combustion.

Elles représentent un réel danger pour plusieurs raisons :

- L'émission de gaz toxiques, en particulier de CO, est la principale cause de mortalité d'un incendie [Lee. A.S et Mellius. R.B (2006)]
- Les gaz irritent les yeux et peuvent donc gêner l'évacuation des personnes ;
- Les fumées chaudes peuvent causer des brûlures ;
- Les fumées réduisent la visibilité rendant ainsi plus difficile l'évacuation ;

Le mouvement de fumées est en général suivi en résolvant une équation de transport pour un scalaire passif, c'est-à-dire en supposant que les fumées suivent le même trajet que les molécules d'air. Ce sera le cas pour les gaz et les

particules de suie de petites tailles. On peut ainsi espérer capturer relativement bien le comportement des particules qui peuvent être inhalées, soit les particules de diamètre inférieur à 5 à 10 μm . Pour les particules les plus grosses, des modèles de suivi Lagrangien ont été développés, comme par exemple le modèle proposé par [Chow. W.K et Yin. R (2004)]. Ceux-ci prédisent les trajectoires individuelles des particules en résolvant une équation de transport Lagrangienne pour chaque particule qui prend en compte notamment leur densité contrairement à l'approche de scalaire passif.

Des modèles plus complexes tentent de mieux décrire la nature et les quantités de produits de combustion, en prenant en compte les différentes réactions chimiques qui interviennent de façon assez similaire aux modèles de combustion incluant la chimie de combustion. [Haynes. B.S et Wagner. H.G (1981)] présentent une revue de ces modèles.

Toxicité

L'évaluation de la dose de fumées qu'a reçue une personne dépend de nombreux facteurs : la concentration des fumées dans l'espace, le temps d'exposition de la personne, le taux d'absorption par les organes de la personne. L'exposition d'une personne dépend non seulement de la concentration en fumées dans le bâtiment mais aussi du trajet qu'a suivi la personne et du temps qu'elle a mis à faire ce trajet.

Les concentrations en fumées et la température des gaz fournis par la CFD dans tout l'espace permet toutefois d'apprécier le danger et d'évaluer l'efficacité de moyen de prévention et/ou d'intervention : ventilation, confinement de certaines zones, etc...

Visibilité

Là aussi un grand nombre de facteurs influencent la visibilité : la concentration, la luminance et clarté des objets, les conditions de luminosité dans l'espace (éclairage électrique ou naturel, etc..) la distance entre l'individu et l'objet, ainsi que l'acuité visuelle de la personne.

Des données expérimentales sur la visibilité ont été collectées [Jagger. S.F(1991). Ouellette. M.J (1993)]. Des corrélations ont été établies qui peuvent permettre de déduire la visibilité des valeurs de concentration.

4.5.5. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont définies pour prendre en compte les événements qui sont extérieurs au domaine ou se produisent à la frontière du domaine mais qui influencent ce qui se passe dedans.

Ainsi, les conditions aux limites pour le calcul d'un incendie incluent :

- Les écoulements d'air, gaz et fumées qui entrent ou sortent du domaine par les portes, fenêtres ou d'autres ouvertures. Il peut même être d'ailleurs important d'identifier toute fuite susceptible

de modifier le comportement de l'incendie et d'influencer le mouvement des fumées au sein du bâtiment. Leur influence peut être particulièrement marquée pour un incendie sous-ventilé [Sinai. Y.L (1999)]

- Les transferts de masse, quantité de mouvement et chaleur au niveau des parois. Pour spécifier les transferts de chaleur aux parois, en général soit la température des parois, soit le flux de chaleur aux parois est fixée. Il est aussi parfois possible de fixer une température extérieure au domaine et un coefficient de transfert de chaleur du matériau qui constitue la paroi pour permettre une représentation plus réaliste. Les propriétés thermiques des matériaux ne sont toutefois pas toujours connues. Il est à noter que si un modèle moyenné de turbulence est utilisé, des lois de paroi sont appliquées pour prendre en compte les effets de la turbulence près des parois qui ne sont pas résolus par le modèle.
- Les événements qui se déclenchent à l'intérieur du domaine, tels l'incendie lui-même ou bien un moyen de le supprimer (sprinklers) ou encore la présence de radiateurs.

4.6. Méthodes numériques

Les schémas numériques qui permettent de discrétiser les équations physiques sur le maillage peuvent avoir une influence sur les résultats. Ainsi, un schéma numérique de premier ordre cause ce qu'on appelle de la diffusion numérique, c'est-à-dire qu'il produit un effet artificiel similaire au phénomène physique de diffusion. Le mélange se trouve surestimé ce qui conduit à des distributions de température et de concentrations en fumées et gaz plus uniformes. Cet effet est d'autant plus important que la taille des mailles est grande. Des schémas numériques d'ordre plus élevé permettent d'éviter ce problème. Toutefois ses schémas sont plus instables numériquement et il peut donc être difficile d'obtenir une solution. En général plus l'ordre du schéma numérique est élevé, plus les résultats seront précis mais aussi plus le schéma sera instable numériquement ce qui peut rendre l'obtention d'une solution difficile. Certains outils CFD laissent le choix du schéma numérique à l'utilisateur, en général jusqu'à l'ordre 2.

Une discrétisation temporelle est aussi nécessaire si le problème est transitoire, ce qui est généralement le cas pour un incendie si l'on s'intéresse à la propagation de l'incendie et/ou on souhaite évaluer le temps disponible pour évacuer les occupants. Il s'agit de fixer un pas de temps qui soit compatible avec le maillage et avec les modèles physiques choisis et permettre de résoudre les mécanismes physiques auquel on s'intéresse.

4.6.1. Le traitement des résultats

Un nombre très important de valeurs est obtenu par un calcul CFD puisqu'en général le maillage d'une seule pièce de taille standard contient plusieurs di-

zaines de milliers d'éléments et pour chacun de ces éléments sont obtenues dans le cas d'un incendie au moins les valeurs de température, les trois composantes de vitesse et la concentration des fumées. D'autres variables peuvent aussi être calculées en fonction des besoins et des modèles choisis : concentrations en CO, NO ou autres produits toxiques, énergie cinétique turbulente et sa dissipation etc...

Chaque outil CFD a en principe son propre post-processeur, qui est plus ou moins sophistiqué. Il existe aussi des post-processeur 'indépendants' qui peuvent traiter les fichiers des résultats de nombreux codes CFD (Tecplot et Fieldview).

4.6.2. Les principaux outils existants.

Il existe des codes CFD dits généraux qui incluent un choix de modèles suffisant pour permettre l'application de ce code à une grande variété de problèmes : aérodynamisme des voitures et avions ; combustion des engins ; dispersion atmosphérique des polluants, incendies en milieux confinés et ouverts.

Des outils CFD ont aussi été développés plus spécifiquement pour l'application aux incendies.

Les outils existants sont présentés ci-dessous selon ces deux grandes catégories. Cependant, ceci ne présage en rien de la capacité d'un code à modéliser un incendie : en effet ,si un code incendie contient nécessairement des modèles physiques adaptés aux incendies, ceux-ci ne sont pas nécessairement plus nombreux ni plus sophistiqués que ceux inclus dans les codes CFD généraux.

Réciproquement, un code incendie peut être appliqué potentiellement à d'autres problèmes bien que son domaine d'application restera sûrement plus limité qu'un code CFD général.

Un code incendie aura été validé pour des scénarios incendie. Un code général pourra l'avoir été, voire même de façon plus complète qu'un code incendie. Il est conseillé en tous les cas vérifier les validations réalisées pour l'outil sélectionné et utilisé.

Nom	Pays d'origine	Référence	Commentaires
Codes généraux			
CFX	Royaume-uni	CFX)	Utilisable pour les incendies et explosions. Code commercial
FLUENT	Etats-Unis	Fluent)	Code commercial
PHOENICS	Royaume-Uni	PHOENICS	Code commercial
STAR-CD	Royaume-Uni	STAR-CD)	Code commercial
Codes spécifiques pour les incendies			
FDS	Etats-Unis	McGrattan Forney [29]	Basé sur les modèles de turbulence LES et DNS Disponible gratuitement
FIRE	Australie	Novozhilov [30]	Inclut les sprays et peut en principe prédire le taux de combustion, voire l'extinction, de l'incendie par un couplage des phases solide (fuel) et liquide (spray)
JASMINE	Royaume-Uni	Cox et Kumar [31]	Développé à partir de PHOENICS pour prédire les conséquences d'un incendie.
KAMELEON FireEx	Norvège	Vembe et al [32]	Couplé avec un code d'éléments finis pour le calcul de la réponse des structures à la chaleur de l'incendie.
KOBRA-3D	Allemagne	Schneider[33]	Pour prédire la propagation des fumées et le transfert de chaleur dans des géométries complexes.
MEFE	Portugal	Viegas [34]	Pour une ou deux pièces inclut le temps de réponse des thermocouples.
RMFIRE	Canada	Hadjisophocie et Yakan [35]	Limité à deux dimensions.incendie dans une pièce
SMARTFIRE	Royaume-Uni	Smartfire [36]	Code commercial
SOFIE	Royaume-Uni/ Suède	Rubini [37]	
SOLVENT	Etats-Unis	Solvent[38]	Pour des incendies en tunnel
SPLASH	Royaume-Uni	Gardiner[39]	Inclut l'interaction entre sprinklers et les fumées d'incendie.
UNDSAFE	Usa/Japon	Yang&Chang[40]	Applicable en milieu confiné/ouvert

Tableau 13 : Outils CFD existants (d'après Olenick et Carpenter (2003).

4.6.3. Quelle courbe, quel modèle choisir?

La réglementation actuelle n'accepte que l'usage des courbes normalisées. Une dérogation spéciale doit être introduite auprès des autorités compétentes 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 paramétrique ou de modèles de zone plutôt que de la courbe ISO influence fortement le risque d'écroulement des ouvrages en cas d'incendie : un feu ISO de 2 heures

dans des habitations, des bureaux ou tout autre bâtiment, avec une densité de charge calorifique inférieure, est plus sévère qu'un feu calculé avec des courbes paramétriques ou des modèles de zone.

Il convient de garder un esprit critique vis-à-vis des valeurs de charges calorifiques annoncées dans la littérature : d'autres ordres de grandeur que ceux donnés par l'annexe informative de l'EC1 feu (voir tableau N°14). Pour les bâtiments administratifs (USA, Allemagne, France, Pays-Bas) les charges d'incendie sont de 50 kg de bois/m² et, dans 95% des cas, inférieures à 90 kg/m².

Types de bâtiment	Densité de charge calorifique Moyenne (kg de bois/m ²)	Densité de charge calorifique Maximale(kg de bois/m ²)
Logements	15	35
écoles	15	50
hôpitaux	20	50

Tableau N°14 : Types de bâtiment avec densité de charge calorifique EC1.

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

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

L'exigence de 2 heures se justifie pour les compartiments à charges d'incendie élevées. Ces charges se rencontrent dans les bibliothèques, les entrepôts d'archives. Cette exigence se justifie également pour les bâtiments élevés où l'intervention des services d'incendie doit se faire à 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.

CHAPITRE 5

REVUE DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX REALISES SUR LA TENUE AU FEU DU BETON ET DE L'ACIER.

5.1 Le béton

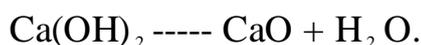
Lorsque le béton est exposé à de hautes températures, sa microstructure subit des modifications physico-chimiques tout au long du chauffage entraînant une déshydratation du gel de ciment (CSH). Cette déshydratation engendré une évolution de la microstructure du matériau, donc une évolution des propriétés mécaniques, thermiques et de transport. Elle engendré aussi la création d'eau libre à l'intérieur du matériau et donc une augmentation de pression interstitielle.

Les modifications subies simultanément par la matrice cimentaire et les granulats engendrent une forte dégradation de la microstructure du béton. Outre les effets directs des modifications de ces deux composants élémentaires, les incompatibilités de comportement de ceux-ci engendrent des dégradations spécifiques au matériau béton. Nous décrivons ici les principaux phénomènes observés expérimentalement.

5.1.1 Déshydratation et modifications physico-chimiques du béton

L'étude des résultats d'analyses thermiques différentielles et d'analyse thermogravimétriques permet de détecter l'apparition de transformations chimiques se produisant au sein du béton porté à des températures élevées et de suivre leurs progressions. Plusieurs auteurs ont présenté les résultats de ce type d'analyses réalisées sous diverses conditions (Philieo 1958, Campbell-Allen & Desai 1967, Harmathy 1973, Schneider 1982). La synthèse de ces résultats nous permet d'identifier les principales modifications subies par la microstructure du béton au cours du chauffage, et montre les évolutions suivantes :

1. Entre 30 et 120°C, l'eau libre et une partie de l'eau absorbée s'échappent du béton. Si la vitesse de chauffage est suffisamment lente, l'eau non liée est complètement éliminée à 120°C, sinon le processus d'évaporation peut se prolonger au-delà de 200°C.
2. La déshydratation du gel de ciment (CSH) s'amorce à 180°C et se poursuit jusqu'à 300°C. L'eau liée chimiquement commence alors à s'échapper du béton.
3. Entre 450°C et 550°C, la portlandite se décompose en eau et en chaux libre selon la réaction suivante :



4. Autour de 570°C se produit la transformation du quartz- α en quartz- β dans les agrégats quartzitiques et basaltiques. Il est à noter que cette réaction est expansive.
5. Entre 600°C et 700°C se produit la décomposition du CSH. C'est la seconde étape de déshydratation des hydrates de calcium au sein du béton. On a donc une nouvelle phase d'évacuation de l'eau liée chimiquement.
6. Entre 700°C et 900°C, le carbonate de calcium, composant principal des granulats calcaires se décompose suivant la réaction : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.
7. La fusion de la pâte et des agrégats s'amorce à partir de 1100°C.

5.1.2 Microfissuration et dégradation de l'interface pâte granulats

La matrice cimentaire et les granulats subissent généralement, au cours du chauffage des modifications dimensionnelles opposées. Au-delà de 105°C, la matrice cimentaire subit généralement un retrait lors du premier chauffage, tandis que les granulats subissent essentiellement une expansion. Ce comportement opposé des deux composants du béton engendre alors une microfissuration importante au sein de sa microstructure (Blundell & al. 1976).

En effet, les hautes températures provoquent comme nous l'avons vu, le départ de l'eau libre contenue dans les pores ainsi que l'eau liée chimiquement. Dans la zone inter-faciale dite auréole de transition, moins riche en CSH, cette déshydratation engendre une détérioration rapide de la liaison entre le mortier et les granulats. De plus, la dégradation chimique des constituants contribue à cette détérioration (Riley 1991).

Par ailleurs, des études expliquent les microfissures engendrées lors de chauffage du béton par l'effet de l'incompatibilité du comportement des composants du béton (Venecanin 1978. Baluch & al. 1989). Cet effet, qui a été nommé "incompatibilité Thermique des Constituants du béton ou ITCB", trouve son explication dans la création de contraintes internes dans le béton pendant la variation de température causée par l'incompatibilité des caractéristiques thermiques des constituants du béton. Et plus spécialement le coefficient d'expansion thermique (Venecanin 1983. 1984).

5.1.3 Evolution de la porosité

Comme nous l'avons vu précédemment, la structure de la porosité du béton possède une grande influence sur les propriétés mécaniques du béton. Il apparaît clairement à l'heure actuelle que la manière dont le volume poreux est distribué

en terme de taille des pores est une information plus importante que la simple mesure de la porosité totale. Les distributions des pores obtenues à différentes températures par Noumowe (1995) au sein d'un béton ordinaire chauffé jusqu'à 600°C. La synthèse des résultats obtenus par différents auteurs indique que dans le cas du béton ordinaire, la température engendre une augmentation du volume total ainsi que de la dimension des pores. Elle peut être due à la rupture des cloisons capillaires sous l'effet de la vaporisation de l'eau durant le chauffage, ainsi qu'à la microfissuration engendrée par les dilatations différentielles de la matrice cimentaire et les granulats (Noumowe 1995).

En travaillant sur la pression de pores et leur évolution pendant le chauffage. Basant signale que la perméabilité du béton subit un accroissement significatif quand la température dépasse 100°C (Bazant & al. 1978,1979). Ce phénomène peut être expliqué par le fait que le transfert d'humidité pour les températures ambiantes est contrôlé par de très minces tuyaux de dimensions celles des pores, qui permettent l'évacuation de l'eau dans son état adsorbé et empêchent le passage de l'eau à l'état liquide ou vapeur. L'augmentation de la perméabilité après 100°C est liée à l'augmentation des dimensions de ces tuyaux pendant le chauffage, due probablement à la rupture des cloisons capillaires sous l'effet de la pression de pores.

5.1.4 Modification de l'état hydrique

L'état hydrique au sein du béton à un instant donné est affecté par de nombreux facteurs tels que la taille et la forme du spécimen de béton étudié, la vitesse de chauffage et les conditions environnementales. Des valeurs expérimentales du taux d'humidité à l'équilibre hydrique au sein du béton (l'équilibre hydrique est obtenu quand il n'y a aucun mouvement d'humidité entre le béton et le milieu extérieur). Pour des températures supérieures à 105°C ont été données par de nombreux auteurs (Philleo 1958. Harmathy & Allen 1973). En revanche très peu de données sont disponibles sur le temps nécessaire pour atteindre cet équilibre hydrique, en particulier pour des températures supérieures à 105°C.

Enfin, de nombreux auteurs expliquent les phénomènes d'éclatements observés sous certaines conditions sur les spécimens ou des structures en béton par le développement de pressions de pores dont les valeurs, combinées aux contraintes thermiques, peuvent dépasser la résistance en traction du béton (Nekrasov & al. 1963. Zhukov 1980, Noumowe 1995).

5.2 Evolution des propriétés thermiques du béton avec la température

L'évolution de la distribution des températures au sein des structures est gouvernée par les propriétés thermiques du matériau, en particulier par la capacité calorifique et la conductivité thermique. Dans le cas du béton, il est difficile de déterminer ces propriétés avec exactitude à tous les niveaux de température en

raison des nombreux phénomènes qui, comme nous l'avons vus se produisent simultanément au sein de la microstructure du béton et qui ne peuvent être séparés facilement. Ces effets incluent en particulier l'évolution de la porosité, les changements dans la composition chimique et la consommation de chaleurs latentes engendrée par certains phénomènes chimiques (Harmathy 1968). Dans la mesure où ces modifications physiques et chimiques se produisent à une certaine vitesse, les variations de propriétés thermiques dépendent également de la vitesse et de l'historique du chauffage. Il ne résulte de ces effets que les variations des propriétés thermiques du béton avec la température ne peuvent pas en toute rigueur être décrites par des relations uniques valables en toutes situations (Harmathy 1970).

5.2.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique mesure l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Pour les bétons courants, la conductivité thermique diminue lorsque la température augmente. Les principaux paramètres de cette variation sont : la teneur en eau, le type de granulat et la formulation du béton. Le degré de saturation est le facteur principal puisque la conductivité de l'air (la conductivité thermique de l'air à 20°C est de $0.0034 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) est inférieure à celle de l'eau (la conductivité thermique de l'eau à 20°C est de $0,515 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Ainsi la diminution de la conductivité thermique en fonction de la température est assez marquée pour un béton de granulat silico-calcaire, faible pour un béton de granulats calcaires, et peu significative pour le béton léger (Collet 1977) figure 25). Enfin il est à signaler que la conductivité thermique du béton pré-endommagé est plus faible que celle d'un béton sain, du fait de la faible conductivité de l'air.

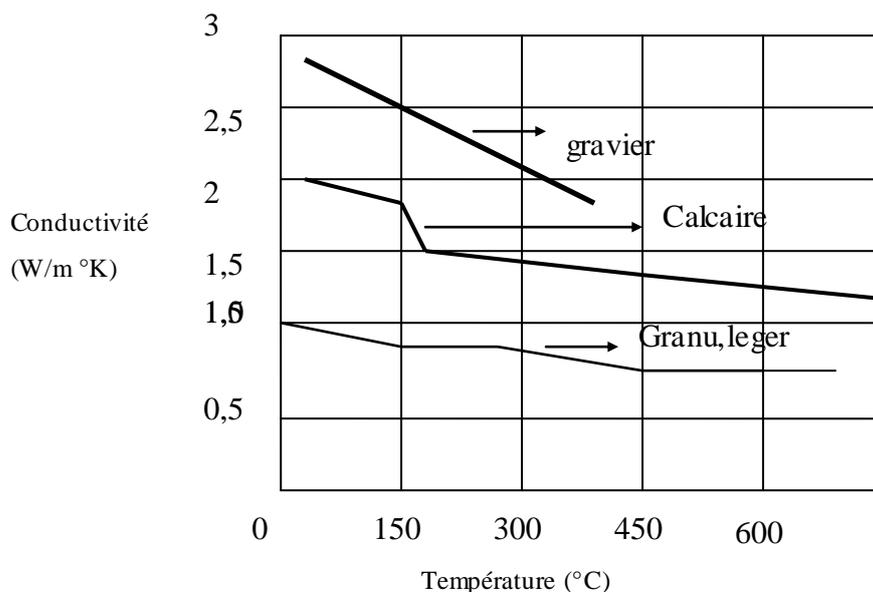


Figure 25 : Evolution de la conductivité thermique mesurée sur différents types de béton en fonction de la température (Collet 1977)

La variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique λ_c du

béton, en fonction de la température, est illustrée à la figure suivante :

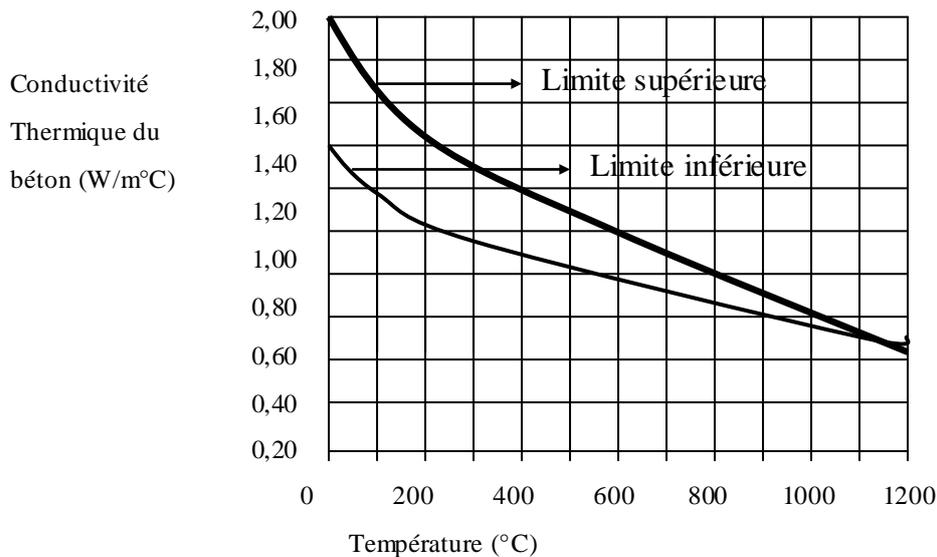


Figure 26 : variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique pour les bétons en fonction de la température.

5.2.2 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique mesure la quantité d'énergie nécessaire pour faire monter de 1°C la température d'un kilogramme de matériau. Comparativement à la conductivité thermique, les variations de cette propriété avec la température sont moins maîtrisées (Neville 1990). Une estimation de la variation de la chaleur spécifique avec la température pour une pâte de ciment est donnée par Harmathy (1970). On peut remarquer qu'entre 100°C et 800°C, il y a une forte augmentation de la chaleur spécifique due à la contribution de la chaleur latente causée par la déshydratation du ciment. Le pic observé à 500°C est associé à la déshydratation de l'hydroxyde de calcium CH. D'après Franssen (1987), les bétons humides présentent une capacité calorifique apparente qui est presque deux fois plus élevée que celle des bétons secs.

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

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

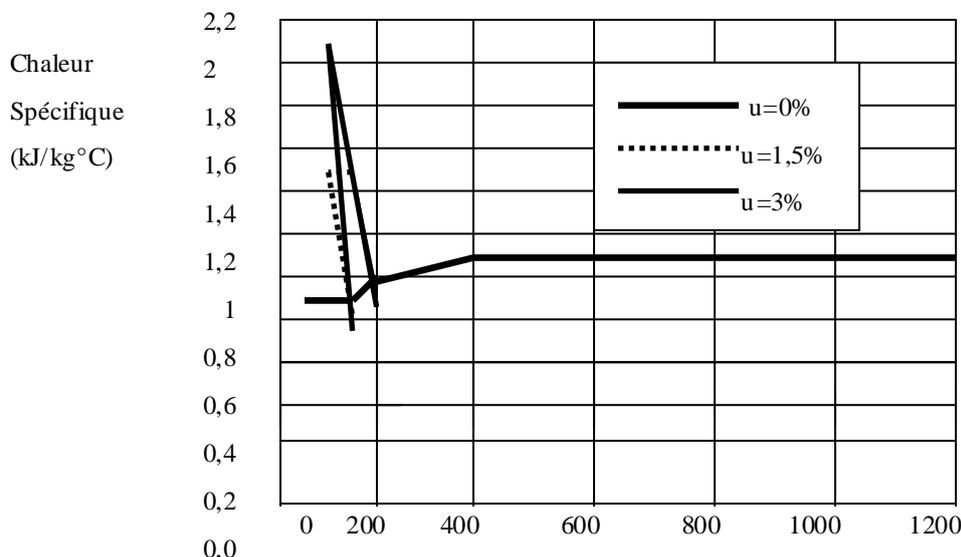


Figure 27 : Chaleur spécifique du béton $C_p(\theta)$, en fonction de la température pour 3 teneurs en eau, u , différentes : 0%, 1,5% et 3% du poids du béton.

5.2.3 Diffusivité thermique ^{Température (°C)}

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. La diffusivité thermique dépend fortement de la teneur en eau du béton. Schneider (1988) a souligné l'importante dispersion observée sur les résultats de mesures expérimentales rapportés dans la littérature. L'auteur 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.

5.3 Evolution des propriétés mécaniques du béton avec la température

Exposée à de hautes températures, la microstructure du béton subit d'importantes modifications physico-chimiques qui influencent son comportement mécanique. Il apparaît que ces modifications ont un comportement irréversible en raison du caractère irrémédiable des réactions chimiques (déshydratation) et micro structurales (rupture de cohésion) qui se produisent. L'objectif de ce paragraphe est d'analyser l'évolution des propriétés mécaniques du béton avec la température.

5.3.1 Module d'élasticité à hautes températures

La rupture des liaisons internes de la microstructure de la pâte de ciment due à l'élévation de température engendre une diminution du module d'élasticité du béton. En même temps l'élévation de température produit une accélération du processus de fluage à court terme, et qui a pour conséquence la diminution du module d'élasticité (Franssen 1987, Schneider 1988). Ces évolutions sont influencées par le module élastique initial, la teneur en eau du béton, la nature des granulats et la vitesse de chauffage (Harada & al. 1972, Schneider 1988).

Il est à noter que le processus de séchage du béton accompagnant l'augmentation de la température, provoque lui aussi une réduction du module d'élasticité. Cette baisse est d'autant plus forte que le séchage est élevé. Ceci peut être expliqué par la destruction de la microstructure du béton causé par le mouvement d'humidité et la pression de pore au cours du séchage et l'effet des

contraintes thermiques et des contraintes de retrait sur l'évolution de l'endommagement de la microstructure du béton (Gross 1973. Labani & Sullivan 1974). En outre, Lankard (1971) signale une augmentation de la dégradation du module d'élasticité avec les cycles thermiques

5.3.2 Résistance en compression à hautes températures

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 par "la méthode d'état régulier" (le spécimen testé est chauffé à une température donnée, ensuite la contrainte est appliquée en contrôlant la vitesse de chargement) où "la méthode d'état transitoire" (le spécimen testé est chargé au début, la charge est maintenue fixe puis il est chauffé en contrôlant la vitesse de chauffage) où selon que les essais sont effectués au cours de chauffage ou après refroidissement. L'évolution de la résistance en compression du béton avec la température est affectée par de nombreux paramètres (nature du liant et des granulats, vitesse de chauffage....).

On peut noter que pour des températures inférieures à 90°C la réduction de la résistance en compression du béton est faible, entre 80°C et 90°C la réduction de la résistance en compression varie entre 10 et 35% (Blundell 1969), en dépassant la température de 90°C, on observe une augmentation de la résistance en compression, ceci peut être expliqué par l'augmentation du processus de séchage. Ce départ provoque un accroissement des forces de surface entre les particules de gel de CSH qui assurent la résistance de la pâte de ciment. Pihlajavaara (1972) rapporte que la résistance d'un béton complètement sec est d'environ 50% plus grande que celle d'un béton saturé. En dépassant les 200°C, le béton est complètement sec, la résistance en compression du béton diminue progressivement avec la température. Ceci peut être expliqué par les transformations chimiques et minéralogiques qui s'opèrent dans la pâte de ciment.

5.3.3 Résistance en traction à hautes températures

Peu de recherches sont faites dans cet axe, néanmoins pour la résistance en compression, la résistance en traction chute avec l'élévation de température. Des études récentes ont indiquées une forte sensibilité de la résistance de traction à la température qui dépasse même celle de la résistance en compression (Schneider 1982. Morley & Royles 1983. Noumowe 1995. Felicetti & Gambarova 1999). L'évolution de la résistance en traction du béton avec la température est affectée par les paramètres que pour la résistance en compression (nature du liant et des granulats teneur en eau, vitesse de chauffage....)

5.3.4 .Effets des hautes températures sur l'énergie de fissuration du béton

Comme nous l'avons vu auparavant, les hautes températures ont de grandes influences sur les propriétés mécaniques du béton (module d'élasticité, résistance en compression et en traction). Il est clair que cela induira une évolution de l'énergie de fissuration en fonction de la température. L'analyse des résultats obtenus par différents auteurs (Baker 1996, Bazant & Kaplan 1996, Heinfling 1998) indiquent que la variation de l'énergie de fissuration du béton avec la température est un paramètre important influençant la fiabilité et la précision des simulations de spécimens ou de structures en béton armé à hautes températures (Heinfling 1998).

5.4. Comportement mécanique du béton à hautes températures

Les modifications subies par les propriétés mécaniques lors de l'élévation de température ont un grand effet sur la réponse du béton lors des essais mécaniques en terme de diagramme contrainte- déformation. Dans ce qui suit on verra la réponse du béton sous divers types de sollicitations (essai de traction simple, essai de compression simple et biaxiale...). Il est à noter que le béton est très fortement sensible à l'histoire du chargement thermomécanique qui se manifeste par l'apparition d'un nouveau mécanisme appelé fluage thermique transitoire.

5.4.1 Comportement du béton en compression à hautes températures

La courbe contrainte déformation en compression uniaxiale est affectée par la température. Outre les modifications de la pente, on peut noter une augmentation de la ductilité du béton et une extension de son domaine plastique (Schneider 1988). La figure 28 présente les courbes contrainte déformation obtenues en compression uniaxiale à différentes températures. Ces essais ont été réalisés à chaud, ces courbes mettent bien en évidence deux aspects:

1. une perte irréversible de la rigidité (endommagement thermique)
2. une chute irréversible de la résistance en compression du béton (décohésion thermique)

De nombreux facteurs influencent l'évolution de cette courbe avec la température. En particulier, le type de granulats et la teneur en eau initiale du béton sont les deux paramètres principaux (Schneider 1988). IL est à noter que ces courbes mettent bien en évidence une importante augmentation de la ductilité du béton au-delà de 450°C.

Enfin, l'évolution de la déformation ultime en compression est affectée quelque soit le type de béton par la présence d'une charge de compression appliquée pendant le chauffage (Schneider 1988). La figure 28 : présente l'évolution de la déformation ultime en compression uniaxiale en fonction de la température et pour différents niveaux de charge appliquée pendant le chauffage sans confine-

ment hydrique. Sur cette courbe, α représente le niveau de charge défini par le rapport de la contrainte appliquée sur la résistance initiale en compression uniaxial à 20°C.

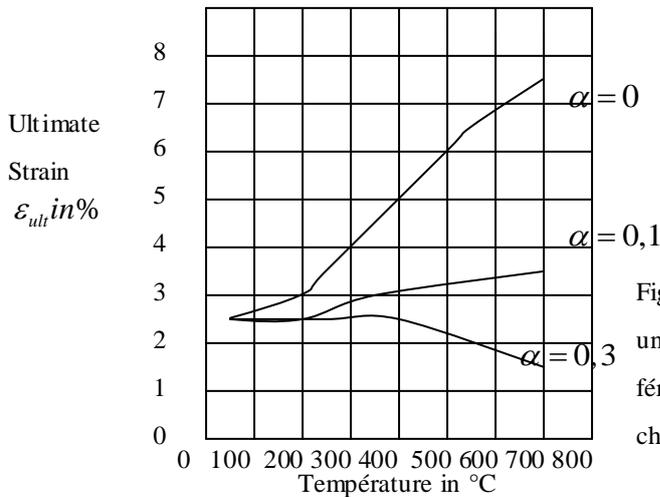


Figure 28 : Déformation ultime en compression uniaxiale en fonction de la température pour différents niveaux de charge appliquée pendant le chauffage (Schneider 1988)

L'analyse des résultats d'essais (Kordina & al. 1985, Schneider 1988) indique que la résistance en compression biaxiale du béton diminue moins rapidement que la résistance en compression uniaxiale. La figure 1.21 présente à titre d'exemple les enveloppes de rupture en compression biaxiale obtenue à différentes températures par Ehm & Schneider (1985). On peut observer sur ces courbes le changement de forme des enveloppes de rupture. Cette évolution met en évidence une augmentation de la sensibilité au confinement du béton avec la température. Le rôle consolidateur de la compression biaxiale est accentué. Ceci s'explique par la dégradation de la microstructure du béton et par l'augmentation de sa porosité avec la température.

Kordina & al. (1985) ont noté dans ces expériences que la résistance en compression est plus faible à 150°C qu'à 300°C. Cette augmentation est expliquée par le départ de l'eau absorbée (Kordina & al. 1985). Ce départ provoque un accroissement des forces de surface entre les particules de gel de CSH qui assurent la résistance de la pâte de ciment. Il est en effet admis que la présence d'eau entre deux parois de gel atténue les forces de surface (Van Der Waals) entre les particules de gel et ainsi réduit la résistance du béton. Il est à noter que les forces Van Der Waals sont inférieures aux forces de liaison chimiques, mais, dans cette gamme de température, la structure chimique de la pâte n'est pas encore affectée.

5.4.2 Comportement du béton en traction à hautes températures

La figure 29 : présente des courbes contraintes déformation en traction simple à différentes températures réalisées par Felicetti & Gambarova (1999). On peut remarquer sur ces courbes une forte sensibilité à l'élévation de la température avec les mêmes tendances signalées dans le cas de la compression (baisse du module d'élasticité et de la résistance ultime).

Par ailleurs Harada & al. (1972) affirment que, par rapport à la résistance en compression du béton, la diminution de la résistance en traction est très marquée. Cela donnera des courbes contraintes-déformations, plus sensible en traction à la température qu'en compression.

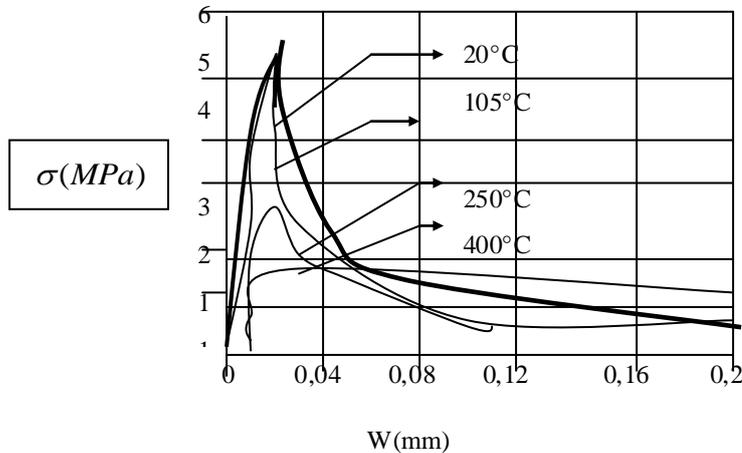


Figure 29 : Courbes contrainte-déformation obtenues en traction uniaxiale à différentes températures (Felicetti & Gambarova 1999)

5.4.3 Déformation thermique du béton à hautes températures

Comme la plupart des matériaux, lorsqu'il est soumis à un changement de température, le béton subit une déformation thermique. Cette déformation joue un rôle très important dans le comportement des structures en béton soumises à de hautes températures. En raison des gradients thermiques se développant durant les phases transitoires de propagation de la chaleur, les déformations thermiques ne sont pas uniformes au sein de la structure. Cette non-uniformité de température engendre des contraintes internes qui peuvent elles mêmes engendrer un endommagement pouvant conduire à la ruine des structures en question. La déformation thermique du béton à hautes températures est un élément très important à étudier. En outre, l'application simultanée de contraintes mécaniques au processus de chauffage affecte de façon significative le processus de déformation thermique du fait du phénomène de fluage.

5.4.4 Déformation thermique libre

Les déformations thermiques différentielles entre la pâte de ciment et les granulats engendrent au-delà de 150°C une microfissuration au sein du béton (Blundell & al. 1976). Selon certains auteurs cette microfissuration participe par effet de dilatance à la déformation thermique mesurée sur des spécimens en béton non chargés (Weigler & Fischer 1972, Sullivan 1979, Khoury & al 1985).

La synthèse de ces résultats indique que la déformation thermique totale d'une éprouvette non chargée soumise à une élévation de température très lente est due aux effets composés suivants :

1. Expansion thermique des granulats.
2. Retrait de la matrice cimentaire.

3. Microfissuration engendrée par l'incompatibilité entre ces deux premiers effets.
4. Transformations et décompositions chimiques des constituants du béton s'accompagnant de variations dimensionnelles.

5.4.5 Conclusion de la partie thermique

Au vu des constatations expérimentales. Il est important que le modèle de comportement élaboré puisse reproduire les éléments les plus importants qui s'en dégagent. Pour notre part, on retient les éléments suivants.

- Evolutions des propriétés thermiques et mécaniques du béton pendant le chauffage.
- Interaction thermomécanique et dépendance de la déformation thermique du chemin emprunté dans l'espace température contrainte (Déformation d'interaction thermomécanique).

5.5 L'acier :

Le facteur de réduction de la résistance caractéristique de l'acier de béton armé en fonction de la température θ est illustré à la figure suivante. Ce facteur varie selon le type d'acier (laminé à chaud ou à froid) et en fonction de l'allongement des aciers :

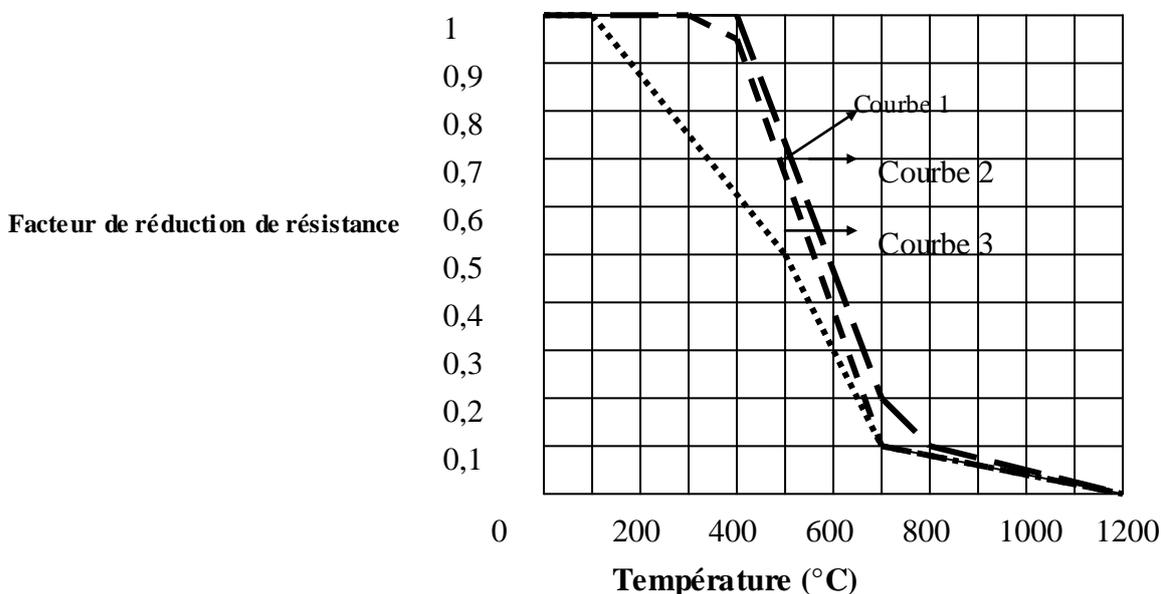


Figure 30 : facteur $K_s(\theta)$ de réduction de la résistance caractéristique (f_{yk}) des armatures tendues ou comprimées

Légende :

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

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

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

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

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

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

5.5.1 La déformation de l'acier.

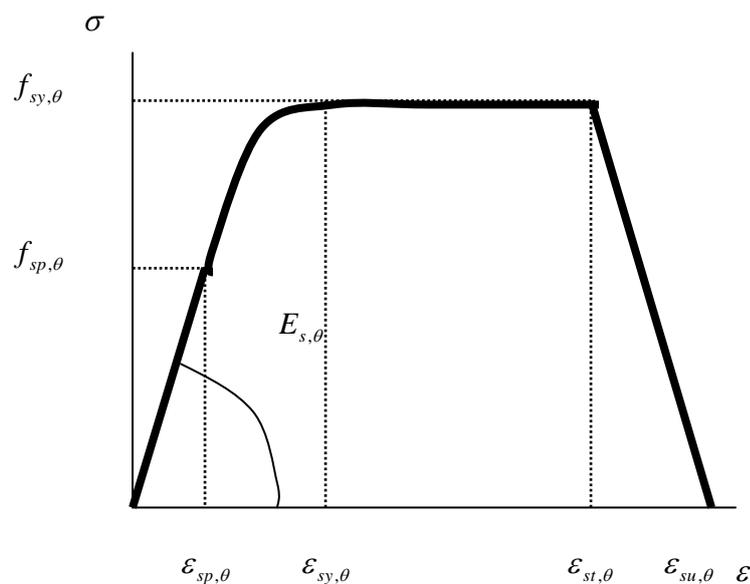


Figure 31 : contrainte-déformation

La relation contrainte- déformation est définie par trois paramètres :

- la pente de la zone élastique linéaire $E_{s,\theta}$;
- la limite de proportionnalité $f_{sp,\theta}$;
- la contrainte maximale $f_{sy,\theta}$

$$\epsilon_{sy,\theta} = 2\% , \epsilon_{st,\theta} = 5\% , \text{ et } \epsilon_{su,\theta} = 10\%$$

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

5.5.2 La dilatation thermique

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

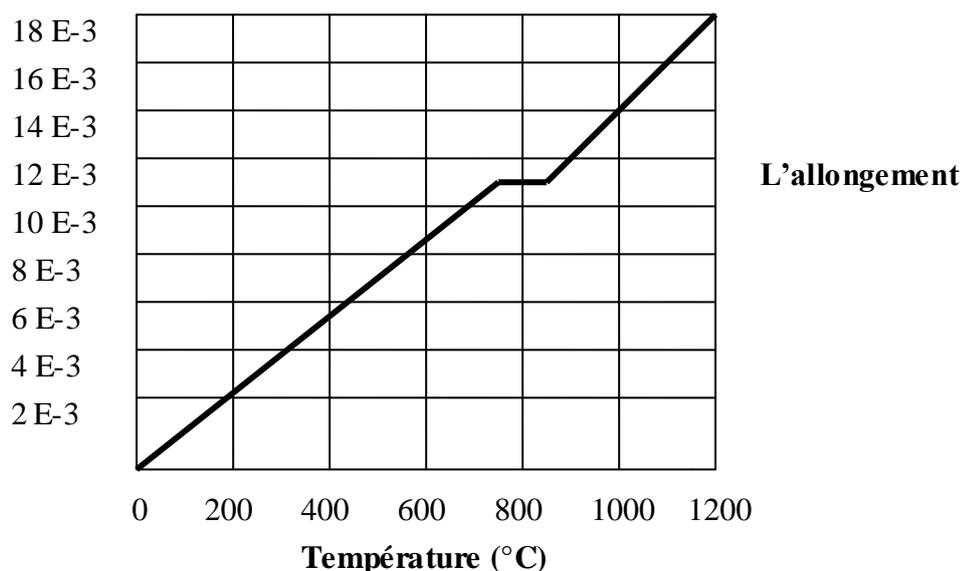


Figure 32 : acier de béton armé

5.5.3 La chaleur spécifique de l'acier

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

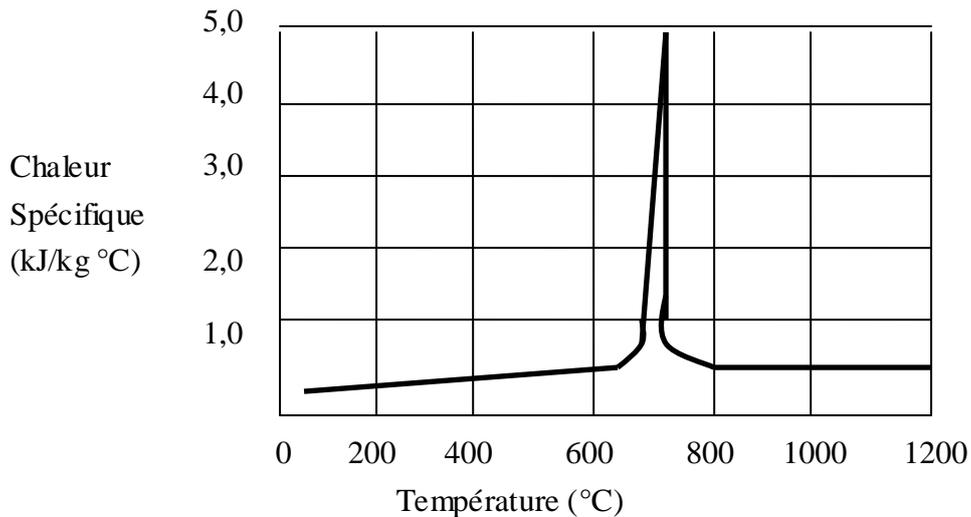


Figure 33 : Chaleur spécifique de l'acier au carbone, en fonction de la température.

5.5.4. La conductivité thermique de l'acier

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

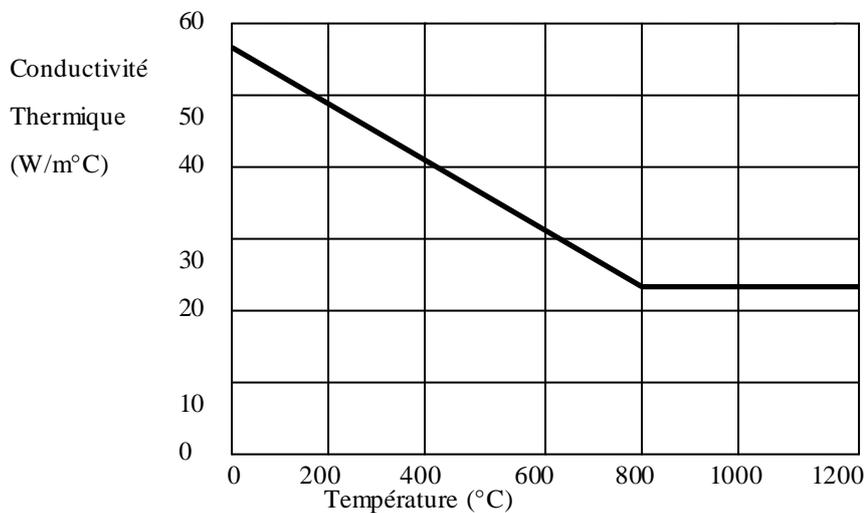


Figure 34 : Conductivité thermique de l'acier au carbone en fonction température.

5.5.5 Comparaison des caractéristiques mécaniques des matériaux acier et-béton.

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

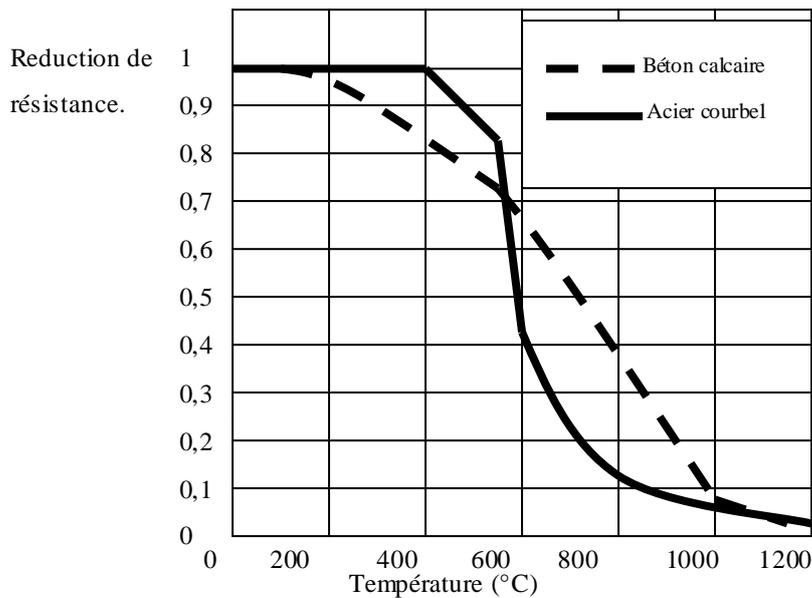


Figure 35 : Réduction de la résistance de l'acier et du béton en fonction de la température. (source FEBELCEM)

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

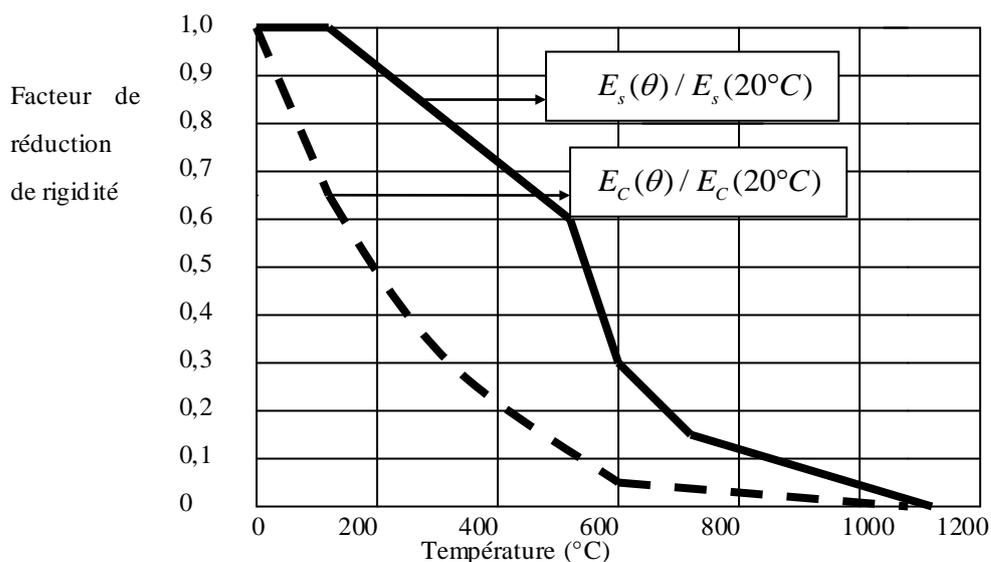


Figure 36 : Facteur de réduction de rigidité en fonction de la température.

Le graphique ci-dessus n'est pas commun : il montre que la chute relative de rigidité est plus forte pour le béton que pour l'acier ! Ceci reflète la capacité pour le béton, comme exprimé plus haut, de s'accommoder du bridage. Le bridage d'un élément de construction est l'action d'entraver, de bloquer les déformations de cet élément.

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

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

CHAPITRE 6.

Calcul de la résistance au feu des structures en béton armé.

6.1. Les types de modèles de calcul.

La partie 1-2 des différents Eurocodes précités présente trois types de modèles pour le calcul de la résistance au feu des éléments de structure :

- niveau 1 : calculs par valeurs tabulées ;
- niveau 2 : modèles de calcul simplifiés ;
- niveau 3 : modèles de calcul avancés ;

Le niveau 1 : calcul par valeurs tabulées

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

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

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

Le niveau 2 : modèles de calcul simplifiés

Ils sont basés sur les équations d'équilibre ; ils constituent une extrapolation des calculs à température ordinaire. Un calcul plus poussé de niveau 2 utilise la même démarche que pour le dimensionnement à froid. Elle intègre en plus la perte de résistance du béton et des armatures en fonction de leur température. Leur température est déterminée, pour un feu ISO, soit à l'aide d'abaques, soit à l'aide d'un programme effectuant l'analyse thermique pour la section étudiée. Si la capacité de résistance est supérieure aux sollicitations, l'élément de structure aura dès lors une durée de résistance au feu au moins égale à la durée recherchée.

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

Matériaux	A froid	A chaud
Béton	1,76 *	1
Armatures	1,15	1
Structures acier	1,1**	1

Tableau N°15 : Coefficients de sécurité sur les matériaux

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

(**) selon l'ENV 1993-1-1

Le niveau 3 : modèles de calcul avancés

Ils permettent une analyse thermique et mécanique complète de la structure ; ils prennent en considération les changements continus des propriétés thermiques et mécaniques des matériaux et leurs effets sur la structure entière. Ces modèles avancés nécessitent des programmes de calcul sophistiqués exigeant un haut degré de connaissance et, souvent beaucoup de temps. Le logiciel SAFIR de l'université de Liège est couramment utilisé. Les parties Eurocodes relatives au feu ne donnent que peu d'informations les concernant.

Les deux premières méthodes font référence à la courbe standard d'échauffement ISO. Seule la méthode de niveau 3 peut prendre en considération d'autres conditions d'échauffement.

6.2. Calcul du comportement au feu des structures en béton EC2 partie 1-2.

6.2.1 Principes de base

La partie 1-2 de l'Eurocode 2 fixe les règles de dimensionnement des structures en béton en situation d'incendie. Rappelons qu'elle fournit les règles pour la résistance passive des éléments de construction, c'est-à-dire la résistance que doit posséder une structure exposée au feu.

Le principe général du dimensionnement au feu est le suivant :

L'élément structurel résiste au feu aussi longtemps que $E_{d,f_i,t} \leq R_{d,f_i,t}$.

Dans cette relation on a :

$E_{d,f_i,t}$ = L'effet des actions à prendre en compte n situation d'incendie ; cet effet est constant dans le temps

$R_{d,f_i,t}$ = La capacité portante, qui diminue avec la hausse de température, donc avec le temps. Il est primordial de connaître ce comportement, c'est-à-dire la perte de capacité de résistance du béton en fonction d'une augmentation de la température suivant la courbe standard.

Le chapitre 3 " propriétés des matériaux " de l'Eurocode fournit l'information nécessaire pour calculer la perte de capacité de résistance des éléments en béton (armé ou précontraint).

Trois coefficients de réduction sont ainsi définis. Le premier $k_c(\theta)$ (figure 37), permet de déterminer la diminution de la résistance caractéristique en compression du béton en fonction de la température $\theta(^{\circ}C)$, soit :

$$f_{ck}(\theta) = k_c(\theta) \cdot f_{ck}$$

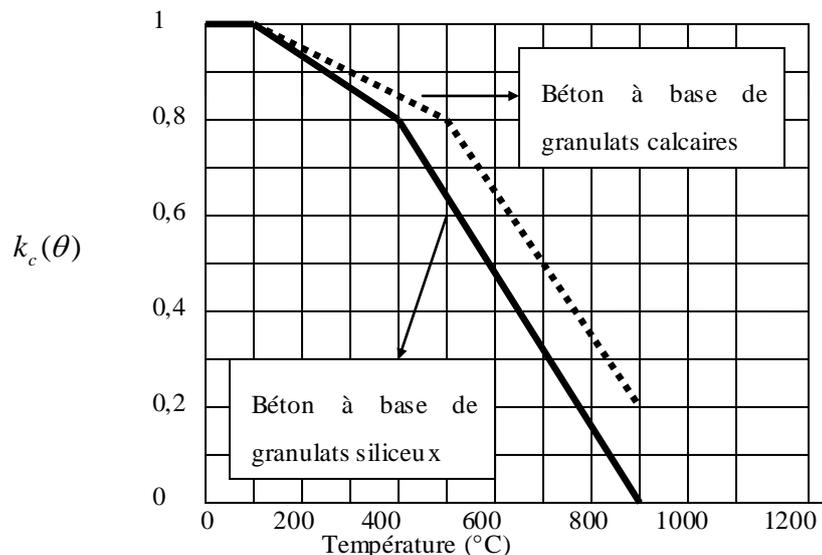


Fig.37 : Coefficient de réduction pour la résistance caractéristique en Compression du béton en fonction de la température (ENV 1992-1-2)

L'effet positif des granulats calcaires (réaction endothermique) sur le comportement au feu du béton est pris en compte, dans le DAN (document d'application national), par l'introduction d'une seconde courbe, caractérisée par une diminution plus lente de la résistance en compression du béton. Ni le DAN ni l'Eurocode n'envisagent, par contre, de règles concernant les bétons à base de granulats légers.

Un deuxième coefficient de réduction, $k_s(\theta)$, est introduit afin de caractériser la

perte de résistance caractéristique des armatures en acier en fonction de la température (fig. 38)

$$f_{yk}(\theta) = k_s(\theta) \cdot f_{yk}(20^\circ\text{C})$$

Deux courbes sont données. La première, caractérisée par une diminution lente, sera utilisée pour les armatures tendues (poutres fléchies), à condition de démontrer qu'on peut y développer un allongement relatif $\varepsilon \geq 2\%$. Sinon, on utilisera la seconde courbe $\varepsilon < 2\%$ (poteaux essentiellement comprimés).

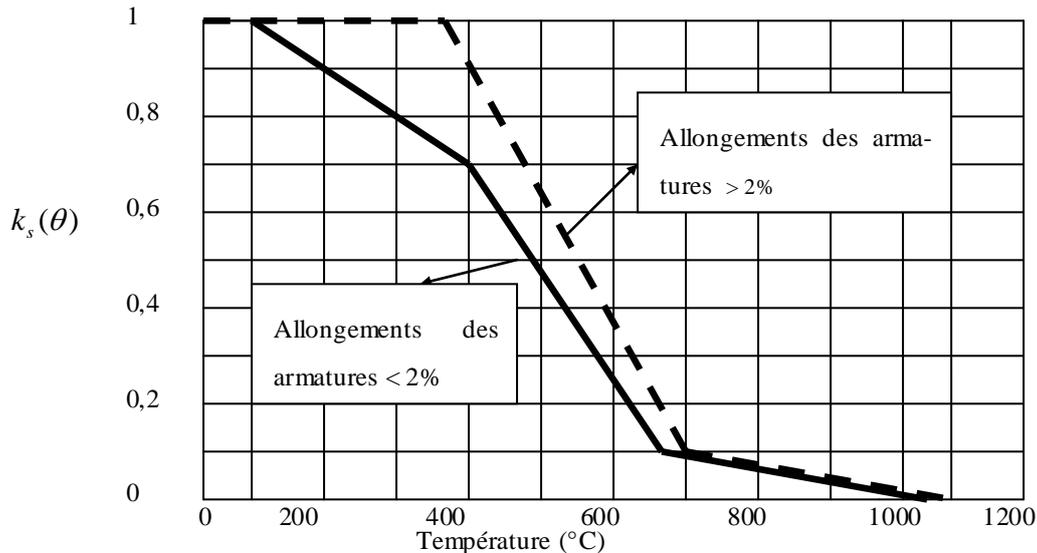


Fig.38 Coefficient de réduction pour la résistance caractéristique des armatures en fonction de la température (ENV 1992-1-2).

6.2.2. Méthodes des valeurs tabulées.

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

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

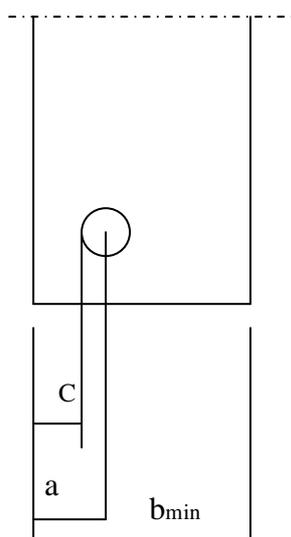
6.2.2.1. Principes généraux

- L'EC2 est applicable aux bétons de densité normale jusqu'à des C90/105 et aux bétons légers jusqu'à des LC55/60.
- Les tableaux couvrent des durées d'exposition au feu normalisé de la courbe ISO jusqu'à 240 minutes ;
- Les valeurs données dans les tableaux s'appliquent aux bétons avec une masse volumique comprise entre 2000 et 2600 kg/m³ et avec granulats siliceux ;
- Dans le cas de granulats calcaires, les dimensions minimales des sections peuvent être réduites de 10% sauf pour les poteaux ;
- L'utilisation de cette méthode dispense de toute vérification complémentaire de torsion, d'effort tranchant, d'ancrage des armatures et d'éclatement (tout en gardant l'imposition de « treillis de peau). Il faut noter que les ruines par effort tranchant sont très rares.

-Dans le cas de béton à haute résistance (BHR) de classe supérieure à C50/60, l'utilisation des tableaux est conditionnée par les règles complémentaires.

Les résultats donnés dans ces tableaux sont, selon le type d'élément structural :

- la largeur ou l'épaisseur minimale de la section b_{min}
- la distance à l'axe des armatures d'acier : $a = c + \phi/2$, c étant le recouvrement des armatures et ϕ le diamètre de l'armature.



a = distance à l'axe des armatures
 b_{min} = largeur ou épaisseur minimale de la section
 c = recouvrement des armatures

Figure 39 : Dimensions minimales des éléments structuraux.

6.2.2.2. Utilisation de la méthode pour la vérification d'un poteau en béton armé.

- Prescriptions (Yves martin et Benoît. P. 2007)

Le DAN (Document d'Application National) a remplacé tout le paragraphe de l'Eurocode concernant le dimensionnement des poteaux. En effet, les résultats des 82 essais de laboratoire réalisés en Belgique (Liège et Gand), en Allemagne (Braunschweig) et au Canada (Ottawa) ont mis en évidence le caractère non sécuritaire des valeurs données dans l'Eurocode.

Le tableau N°16 ci-contre (repris du DAN) a été établi dans des limites clairement définies, par exemple pour des poteaux de hauteur égale à 3 mètres ; pour des poteaux de plus de 3 mètres, on utilisera la formule mentionnée dans les méthodes de calcul simplifiées

Résistance au feu standard	Largeur du poteau (b_{min})/ Distance à l'axe des armatures principales ⁽¹⁾			
	Poteaux exposée sur plus d'un coté ⁽²⁾			Poteau exposé Sur un seul coté.
	$\eta_{fi}=0,2$	$\eta_{fi}=0,5$	$\eta_{fi}=0,7$	$\eta_{fi}=0,7$
R 30	200/25	200/25	200/25	140 ⁽³⁾ /25
R 60	200/25	200/35 250/30	200/45 300/30 ⁽⁴⁾	140/25

R 90	200/30 300/25	300/40 350/30 ⁽⁴⁾	300/45 ⁽⁴⁾ 450/35 ⁽⁴⁾	140/25
R 120	250/40 300/30 ⁽⁴⁾	300/45 ⁽⁴⁾ 450/35 ⁽⁴⁾	350/50 ⁽⁴⁾ 450/45 ⁽⁴⁾	160/35
R 180	350/45 ⁽⁴⁾	350/60 ⁽⁴⁾	450/65 ⁽⁴⁾	210/55
R 240	350/60 ⁽⁴⁾	450/70 ⁽⁴⁾	450/80 ⁽⁴⁾	270/70

(1) Pour les barres de précontrainte : augmentation de a selon la remarque 4.2.2(4) du DAN.
(2) $\eta_{fi} = E_{d,fi}$ (effort normal en cas d'incendie)/R (résistance de calcul à froid)
(3) En principe, une poutre ou un poteau doit avoir une largeur minimale de 200 mm.
(4) Minimum 8 armatures.

Tableau N° 16 : Dimensions minimales (en mm) d'un poteau en béton armé, en fonction de la Résistance au feu exigée (DAN de l'ENV 1992-1-2)

Exemple pratique :

Considérons un poteau en béton armé d'une hauteur de 3 mètres, sollicitée à la compression simple, dans un immeuble de bureau. Ce poteau, distant d'une fenêtre, est exposé à l'incendie sur une de ses faces. Supposons que la descente de charge donne les efforts normaux suivants sur le poteau :

-charges permanentes : 950 KN

-charges d'exploitations : 550KN

Supposons également que le dimensionnement à froid du poteau est donné les résultats suivants

-section 35x35 cm²

-8T16 dont l'axe est à 30mm du bord

-acier Fe E 500 et béton $f_{c28} = 25$ MPa à base de granulats siliceux.

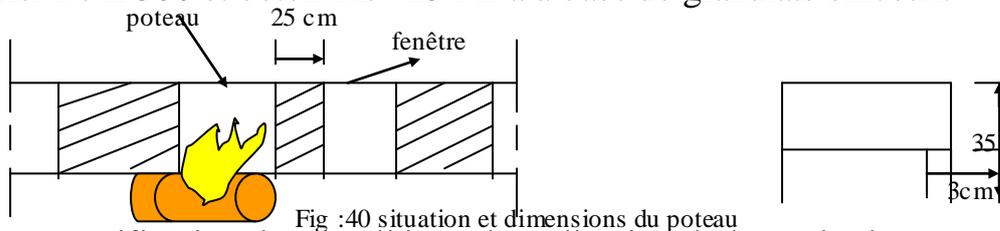


Fig :40 situation et dimensions du poteau

1. Vérification des conditions d'application de la méthode

Un certain nombre de conditions doivent être vérifiées afin de pouvoir utiliser le tableau N° 16 :

- hauteur du poteau = 3 m
- diamètre des armatures d'acier < 25 mm
- A_s (section d'acier) < 0,04. A_c (section de béton)

2. Détermination du taux de chargement

$$\eta_{fi} = E_{d,fi} / R_d$$

$E_{d,fi}$ = valeur de calcul de l'effet des actions au début de l'incendie

R_d = résistance porteuse de l'élément à froid (selon ENV 1992-1-1)

En situation d'incendie (situation accidentelle), la valeur de calcul de l'effort normal est donné par la formule [1]

$$E_{d,fi} = N_{d,fi} = 1,0 N_G + 0,5 N_Q = 1225 \text{ KN}$$

La valeur de calcul de résistance à froid peut être obtenue au moyen de la relation suivante, valable pour un poteau dit court (pas d'effet de flambement)

$$R_d = N_d = A_s \cdot \frac{f_y}{1,15} + A_c \cdot \frac{f_{ck}}{1,5} = 1608 \cdot \frac{500}{1,15} + 122500 \cdot \frac{25}{1,5} = 2740 \text{ KN}$$

Nous obtenons donc un taux de chargement en cas d'incendie équivalent à :

$$\eta_{fi} = \frac{E_{d,fi}}{R_d} = \frac{N_{d,fi}}{N_d} = 0,45$$

3. Détermination de la résistance au feu du poteau.

Bien que le poteau ne soit exposée au feu que sur une de ses faces, elle doit être traitée comme un poteau exposé sur plus d'une face, étant donné qu'il est situé au voisinage d'une fenêtre. En prenant un taux de chargement de 0,5 (valeur sécuritaire par rapport à 0,45) et en se reportant à la 3^o colonne du tableau 16, nous obtenons :

- $b_{\min} = 35 \text{ cm}$
- $a = 3 \text{ cm}$

On constate que le poteau présente des dimensions requises pour avoir une résistance au feu standard de 90 minutes (R 90) . Remarquons toutefois que dans certains pays européens, l'exigence de 90 minutes n'est pas prescrite ; les durées de résistance au feu de 60 et 120 minutes sont habituellement exigées pour les éléments de structure respectivement des bâtiments moyens et des bâtiments élevés.

6.2.2.3. Utilisation de la méthode pour la vérification d'une poutre en béton armé.

-Prescriptions

L'Eurocode fait la distinction entre les poutres simplement appuyées (poutres isostatiques sur deux appuis) et les poutres continues (hyperstatiques). Les tableaux donnés s'appliquent aux poutres exposées au feu sur trois faces (il est supposé que la face supérieure est protégée du feu, durant toute la durée de l'incendie, par une dalle de béton ou un autre élément). En outre, les tableaux sont valables pour les poutres présentant les sections droites suivantes :

Résistance au feu standard	Combinaisons possibles de a (distance de l'axe de l'armature au bord)(***) et b_{\min} (largeur de la poutre)				b_w (épaisseur de l'âme d'une poutre en I)
R 30	$b_{\min}= 80$ $a= 25$	120 15(**)	160 10(**)	200 10(**)	80 -

R 60	b _{min} =120 a = 40	160 35	200 30	300 25	100 -
R 90	b _{min} =150 a=55	200 45	250 40	400 35	100 -
R 120	b _{min} =200 a=65	240 55	300 50	500 45	120 -
R 180	b _{min} =240 a=80	300 70	400 65	600 60	140 -
R 240	b _{min} =280 a=90	350 80	500 75	700 70	160 -

(*)Pour les poutres continues, se referer au tableau 4.6 de l'ENV 1992-1-2. Pour une exposition sur 4 faces, consulter l'ENV 1992-1-2, § 4.2.6.4 ; pour les poutres en béton précontraint, voir le § 4.2.2(4) de l'ENV.

(**)Le recouvrement exigé par l'ENV 1992-1-1 doit être contrôlé.

(***)La distance de l'axe d'une armature de coin d'une poutre n'ayant qu'une couche d'armatures doit être augmentée de 10 mm par rapport aux valeurs données dans ce tableau (sauf pour des valeurs b_{min} plus grande que celles de la colonne 4)

Tableau N°17 : Dimensions minimales (en mm) des poutres en béton armé simplement appuyées et exposées sur trois faces (*) (ENV 1992-1-2)

Exemple pratique

Soit une poutre en béton armé (béton de silice $f_{c28} = 25$ MPa et acier FeE 500) de 4 m de longueur reposant sur deux appuis simples. Supposons que le dimensionnement à froid ait donné les résultats suivants :

- b = 30 cm
- h = 40 cm
- distance à l'axe des armatures : a = 40 mm
- 3T16

On demande de déterminer les conditions pour que cette poutre ait une résistance au feu R 120. Dans la colonne 4 du tableau N° 17, on trouve pour R 120 : b_{min} = 300mm et a=50mm.

Il est donc nécessaire d'augmenter l'enrobage des armatures pour satisfaire aux conditions de résistance au feu standard pendant 120 minutes.

La poutre étant exposée au feu sur 3 faces, une élévation plus importante de température est à prévoir dans les coins. Ainsi la note(***) au bas du tableau 17 recommande d'augmenter de 10 mm le recouvrement des armatures de coin pour les poutres ayant une seule couche d'armatures, d'où : a_{sd} (distance à l'axe des armatures de coin)=60mm.

Théoriquement, l'armature centrale pourrait être placée à 50 mm du bord inférieur de la section. En pratique, on alignera les trois armatures par facilité. On outre, vu la valeur importante de l'enrobage des armatures d'acier, une armature de peau (treillis) est exigée.

6.2.2.4. Utilisation de la méthode pour la vérification d'une dalle en béton armé.

-Prescriptions

Le DAN a considérablement facilité la tâche des auteurs de projet en ne gardant qu'une seule règle pour tous les types de dalles. Les prescriptions de l'Eurocode concernant les dalles nervurées, compliquées et lourdes à appliquer, ont ainsi été supprimées dans le DAN.

Pour une dalle nervurée, il suffit en effet d'appliquer les règles des dalles à la dalle et les règles des poutres aux nervures.

Le tableau N° 18 reprend les dimensions minimales des dalles en béton armé portant dans une ou deux directions.

Résistance au Feu standard	Epaisseur de la dalle H (mm).	Distance «a » à l'axe des armatures ⁽¹⁾		
		Dalle appuyée Sur 2 cotés	Dalle appuyée sur 4 cotés	
			Ly/Lx ≤ 1,5	1,5 < Ly/Lx ≤ 2
REI 30	60	10 ⁽²⁾	10 ⁽²⁾	10 ⁽²⁾
REI 60	80	20	15 ⁽²⁾	20
REI 90	100	30	20	25
REI 120	120	40 ⁽³⁾	25	35
REI 180	150	55 ⁽³⁾	35	45 ⁽³⁾
REI 240	175	65 ⁽³⁾	45 ⁽³⁾	55 ⁽³⁾

⁽¹⁾ Ly et Lx = longueur des portées de la dalle appuyée dans les deux sens, Ly étant la travée la plus longue
⁽²⁾ Le recouvrement exigé par l' ENV 1992-1-1 doit être contrôlé.
⁽³⁾ Pour les poutres en béton armé où la distance à l'axe des armatures à prévoir est importante ($a \geq 40$ mm), il faut utiliser des armatures de peau. De plus, il convient de vérifier la fissuration susceptible de se produire (si $a \geq 0,2h$)

Tableau N° 18 : Dimensions minimales (en mm) des dalles en béton armé portant dans une ou deux directions (DAN de l'ENV 1992-1-2)

Exemple pratique.

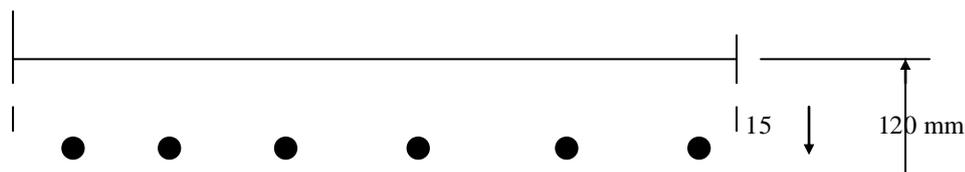
Soit une dalle en béton armé (béton avec granulats calcaire $f_{c28} = 25$ MPa , acier FeE 500) de 12 mm d'épaisseur, reposant sur deux appuis d'extrémité simples et ayant les deux autres bords libres. Le recouvrement des armatures c équivaut à 15 mm et le diamètre des armatures 14 mm.

Quelle est la résistance au feu standard ? R 60 ou R 120 ?

R 60 ? Tableau 18 : $h = 120 \text{ mm} > 80 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$

$$a = c + \phi/2 = 22 \text{ mm} > 20 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$$

OK pour du béton siliceux et, à fortiori, pour du béton calcaire.



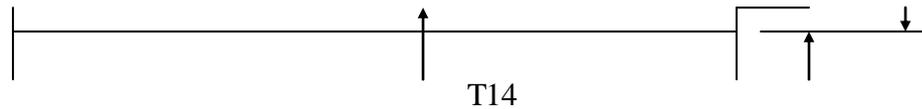


Figure 41 : Schéma de la dalle

R 120 ? Tableau N° 18 : $h = 120 \text{ mm} \geq 120 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$

$a = 22 \text{ mm} > 40 \text{ mm} \rightarrow \text{pas OK}$

il n'est pas vérifié pour le béton siliceux

Pour le béton calcaire, on peut réduire de 10% la distance exigée à l'axe des armatures (ENV 1992-1-2, §4.2.1(3), d'où

$a = 22 \text{ mm} > 36 \text{ mm} (40 - 10\%) \rightarrow \text{pas OK}$

D'où cette dalle ne peut pas résister à R 120, afin de la rendre résistante, il faut augmenter l'enrobage des armatures.

6.3. Modèles de calcul simplifiés.

La section 4.3 de l'ENV 1992-1-2 est consacrée aux méthodes de calcul simplifiées. La capacité portante ultime d'une section de béton en cas d'incendie est déterminée par la procédure générale suivante.

1. A partir de la répartition des températures dans la section en béton à l'instant considéré (annexe B de l'ENV 1992-1-2), on détermine :
 - la réduction de la section droite en béton
 - la température des armatures.
2. On calcule la capacité résistante en tenant compte de la diminution des caractéristiques mécaniques de l'acier et de la réduction de la section droite en béton.

Deux cas sont envisagés séparément : d'une part, les poutres et les dalles et, d'autre part, les poteaux. Le DAN a introduit d'importantes modifications concernant ces méthodes par rapport à l'Eurocode.

6.3.1. Poutres et dalles en béton armé.

-Prescriptions

La méthode de l'Eurocode et celle du DAN se basent en fait sur le même principe : la section droite attaquée par le feu est représentée par une section droite réduite, en ignorant une zone endommagée proche des surfaces exposées au feu. La différence entre les deux méthodes réside principalement dans la façon de

déterminer la zone endommagée. La méthode de l'Eurocode est inutilement compliquée par rapport à celle présentée dans le DAN. Celle-ci est basée sur l'hypothèse simplificatrice selon laquelle la zone de béton qui a atteint une température de 500°C ou plus est négligée lors du calcul de la capacité portante

(figure 42).

L'annexe B de l'ENV 1992-1-2 fournit des figures permettant de déterminer aisément la réduction de la section droite en béton.

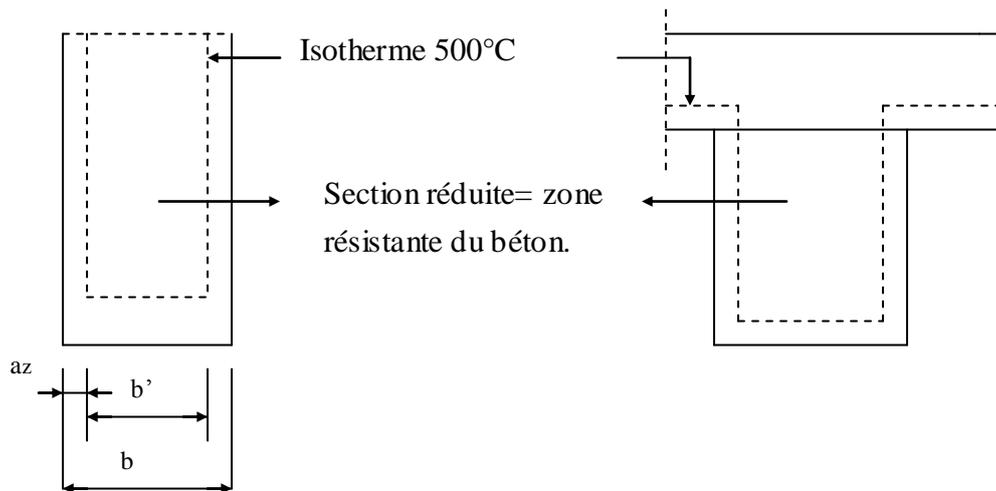


Fig.42 : Zone de béton endommagée et section réduite.

6.3.2. Poteaux en béton armé.

Pour les poteaux, le DAN adopte une approche différente de la méthode développée dans l'Eurocode. Les résultats d'essais réalisés en Belgique, en Allemagne et au Canada ne confirment pas les valeurs du tableau repris dans l'Eurocode, celles-ci étant en général trop optimistes. Deux méthodes ont ainsi été proposées dans le DAN.

- une première méthode basée sur une formule élaborée à l'université de Liège lors de l'étude de l'influence de certains paramètres sur le comportement au feu des poteaux.

- une seconde méthode, plus théorique, à utiliser si la première n'est pas applicable.

La première approche est davantage à considérer comme une méthode des valeurs tabulées, étant donné qu'elle repose sur une formule ajustée sur des résultats d'essais. Elle prend en considération cinq paramètres caractérisant la géométrie et le chargement du poteau : enrobage des armatures, flambement, massivité du poteau, taux de chargement, nombre d'armatures. La seconde méthode consiste à déterminer la résistance à l'écrasement plastique du poteau après t minutes d'incendie.

Exemple pratique (poutres et dalles).

Reprenons la poutre de l'exemple présenté au § 6.2.2.3. Soit une poutre de plancher en béton armé (béton calcaire $f_{c28} = 25\text{MPa}$ et acier FeE 500) de 4 m de longueur reposant sur deux appuis simples. Cette poutre est soumise à une charge permanente G de 20 KN/m et à une charge variable principale Q de 10 KN/m. Supposons que le dimensionnement à froid ait donné les résultats suivants :

- $b = 30\text{ cm}$
- $h = 40\text{ cm}$
- armatures 3T16
- distance à l'axe des armatures : $a = 4\text{ cm}$.

On demande si cette poutre, exposée sur 3 faces, est apte à résister au feu standard pendant 120 minutes.

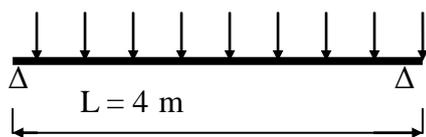
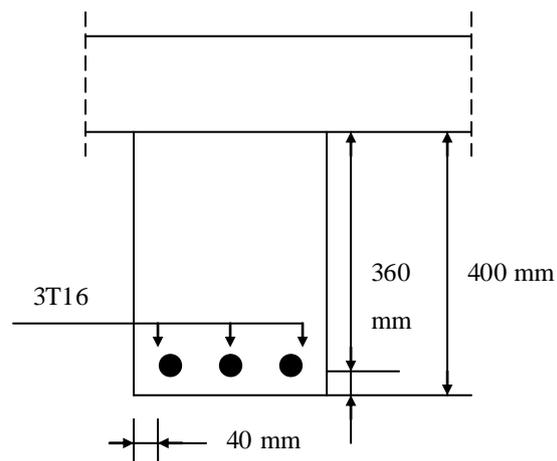


Figure 43 : schéma de la poutre



1. Calcul du moment maximum.

En appliquant la formule [1], on détermine la charge appliquée au début d'incendie, soit :

$$1 \times G + 0,5 \times Q = 25 \text{ KN/m}$$

Ce qui donne un moment agissant maximum à mi-travée :

$$M_{d,fi} = (E_{d,fi}) \text{ de } 50 \text{ KNm au début de l'incendie.}$$

2. Calcul du moment résistant avec $t = 120$ minutes.

A. Détermination de la section réduite

En se référant à la figure B.3.b de l'annexe B de l'ENV 1992-1-2 (figure 44), on peut trouver l'épaisseur a_z permettant de déterminer la zone endommagée par le feu qui ne participe plus à la résistance de la poutre.

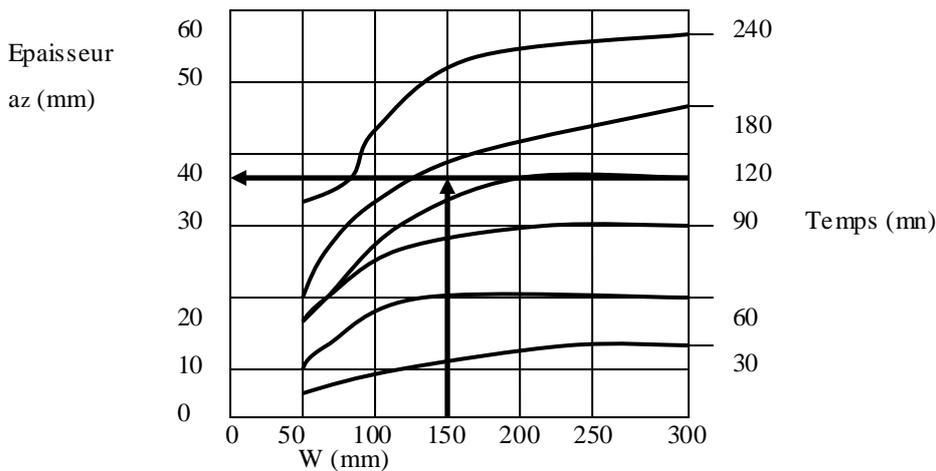


Figure 44 : Détermination de la section réduite d'une poutre ou d'une dalle en béton à base de granulats de silice (ENV 1992-1-2)

Avec $W = \frac{1}{2}$ épaisseur de la poutre $= b/2 = 150$ mm, on obtient $a = 34$ mm
 Nous calculons la section réduite :

- $a_z = 34$ mm
- $b' = b - 2a_z = 232$ mm
- $b'/b = 0,77 > 0,5$: la méthode dan est applicable (cf. §4.3.4.1(5) du DAN de l'ENV 1992-1-2) ; on peut donc poursuivre le calcul.

B. Détermination de la baisse de résistance des armatures

A l'aide de la figure 45, on détermine d'abord la température des armatures, soit :

- θ (armatures externes) = 615°C
- θ (armatures internes) = 500°C

L'effort de traction mobilisable dans les armatures inférieures peut ainsi être calculé en tenant compte de la baisse des performances de l'acier en fonction de la température. A l'aide de la figure 38 page 143, on détermine le coefficient de réduction $k_s(\theta)$.

Nous supposons dans un premier temps que l'acier en fonction de la température peut atteindre un allongement plus grand que 2% (hypothèse facilement vérifiable, à posteriori, par les équations de compatibilité). Nous obtenons donc :

$$k_s(615^\circ\text{C}) = 0,28$$

$$k_s(500^\circ\text{C}) = 0,6$$

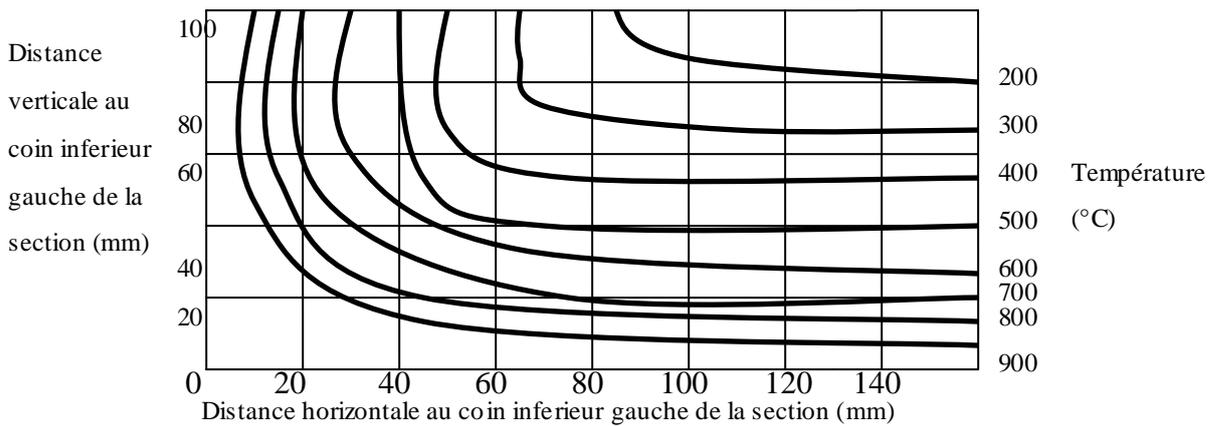


Fig 45. Répartition de la température dans la section d'une poutre en béton (b=300mm et h=600mm) après 120mn d'exposition au feu standard (ENV 1992-1-2)

C. Calcul du moment résistant de la section à chaud

Pour déterminer le moment résistant de la section à chaud, il suffit d'appliquer à la section réduite la théorie de calcul du béton armé à froid (dimensionnement à l'état limite ultime), en tenant compte de la diminution de la résistance des armatures. Il importe toutefois de souligner que le coefficient de réduction γ_M de l'acier et du béton est égal à 1 pour le calcul à chaud (cf. §2.3 (2) de l'ENV 1992-1-2)

Le moment résistant à chaud est : $M_{R,fire,t} = F_{traction} \cdot z$, où $F_{traction}$ est la force de traction des armatures à chaud et z est le bras de levier.

La force mobilisable dans les armatures à chaud est :

$$F_{traction} = \sum_i \Omega_{ai} \cdot k_i(\theta) \cdot f_{yi}(20^\circ C) = 201 \text{ mm}^2 \times 500 \times (0,28 \times 2 + 0,6) = 116,6 \text{ Kn.}$$

Le bras de levier peut être déterminé de la façon suivante (théorie du dimensionnement à froid) :

- l'effort repris par une bande de 1 mm de béton est égal à :

$$R_{mm} = f_{ck} \cdot b' = 30 \cdot 232 = 6,96 \text{ kN/mm}$$

- La hauteur du diagramme rectangle équivalent s'élève à :

$$H = F_{traction} / R_{mm} = 16,75 \text{ mm}$$

- Le bras de levier vaut donc : $z = \text{hauteur utile} - H/2 = 351,6 \text{ mm}$

Finalement, le moment résistant équivaut à : $M_{R,fire,t} = F_{traction} \cdot z = 41 \text{ Kn/m}$

D. Conclusion

La valeur de calcul de la capacité résistante après 120 mn de feu standard $R_{d,fi,t} = M_{R,fire,t} = 41 \text{ kNm}$ est plus petite que la valeur de calcul des effets des actions en cas d'incendie $E_{d,fi,t} = 50 \text{ kNm}$.

L'équation $E_{d,fi,t} \leq R_{d,fi,t}$ n'est pas vérifiée et la poutre ne présente donc pas une résistance au feu R 120. Une des solutions consiste à augmenter l'enrobage des

armatures. En portant la distance à l'axe des armatures de 40 à 50 mm, nous obtenons un moment résistant à chaud supérieur au moment appliqué.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, on a cherché à expliquer, les différents aspects du comportement du béton sous sollicitations thermo-mécaniques. Pour cela, on a essayé de baser les développements de notre recherche sur quelques résultats expérimentaux permettant d'identifier les paramètres importants dans le comportement du matériau à haute température et principalement dans la gamme de température 20°C et 1200°C, couvrant les situations d'incendies.

Dans la pratique cette discipline est méconnue en Algérie et ne peut efficacement être mise en œuvre qu'en complément d'une analyse de risques sérieuse.

Ce document met en évidence que pour toutes les actions sur les structures exposées au feu une méthode et deux modèles de calcul peuvent être envisagées :

- 1: méthode des valeurs tabulées.
- 2: modèles de calcul simplifiés.
- 3: modèles de calcul avancés.

La méthode des valeurs tabulées et les modèles de calcul simplifiés utilisent l'Eurocode 2 et celle du DAN et se basent en fait sur le même principe.

Mais les modèles de calcul avancés prennent en considération les changements continus des propriétés thermiques et mécaniques des matériaux et leurs effets sur la structure entière. Ils utilisent des programmes de calcul sophistiqués exigeant un haut degré de connaissance et beaucoup de temps.

L'approche numérique doit être employée de manière prudente et ses résultats doivent être croisés avec une méthode analytique ou des essais expérimentaux.

Les quelques propositions qui suivent constituent un ensemble de sujets de recherche qui semblent souhaitables pour approfondir les connaissances actuelles sur le comportement du béton armé sous sollicitations thermo – mécaniques.

- La modélisation du comportement du béton à haute température ne saurait être complète sans une compréhension plus fine du

couplage mécanique - thermique pour des sollicitations biaxiales et triaxiales. Au préalable, il convient naturellement de mener à bien des campagnes expérimentales dans ces domaines ; permettant l'obtention de données fiables sur l'effet du processus de déformation et d'endommagement sur la propagation de la chaleur (conductivité thermique, capacité calorifique.....). Cela nous permettra d'effectuer un calcul couplé du problème thermo - mécanique.

- Une modélisation adéquate de l'adhérence acier - béton sous sollicitations thermo - mécaniques semble nécessaire pour mieux décrire la ruine de structures armées. En effet la dégradation de la liaison acier - béton, observée expérimentalement, n'est pas prise en compte.

- Il apparaît de plus comme naturel dans les travaux futurs de devoir étendre le modèle de comportement à une configuration à trois dimensions. Cependant, il faut remarquer que cela conduit à considérer dans la construction du modèle, le couplage de trois critères, ce qui peut constituer une difficulté majeure.

- Un effort particulier devra être fait dans l'avenir dans le traitement des effets dus à de hautes températures sur le comportement du béton armé. En effet, dans une approche, basée sur la mécanique des milieux continus, le comportement thermo - mécanique du béton est modélisé par l'introduction de deux variables d'endommagement, ainsi que l'utilisation de lois de comportement dépendantes de la température et enfin, l'introduction des lois phénoménologiques permettant de lier la déformation thermique à l'état de contrainte appliqué pendant le chauffage (interaction thermo - mécanique)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Alan R.

The king's cross fire , *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.

Baker G. (1996)

The effect of exposure to elevated temperatures on the fracture energy of plain concrete. *Materials and structures*, 1996, vol 29, n° 190, p 383-388.

Baluch M.H., Al-Nour L.A.R., Azad A.K. and al. (1989).

Concrete degradation due to thermal incompatibility of its components. *Journal of materials in civil engineering*, 1989, vol 1, n°3, p 105-118.

Bazant Z.P. et Thonguthai W. (1978).

Pore pressure and drying of concrete at high temperature. *Journal of Engineering Mechanics Division*, 1978, vol 104, n°EM5, p 1059-1079.

Bazant Z.P. and Thonguthai W. (1979).

Pore pressure in heated concrete walls: theoretical prediction. *Magazine of Concrete Research*, 1979, vol 107, n°31, p 67-79.

Bazant Z.P. and Kaplan M. (1996).

Concrete at high temperature: *Material behaviour and Mathematical Modelling*. London: Longman Concrete Design and Construction Series, 1996. 412p

Blundell R. (1969).

Discussions on structure, solid mechanics and engineering design. *Proceedings of a Conference on civil engineering materials*, Southampton (U.K): 1969. P 120-127.

Blundell R., Diamond C. and Browne R.G. (1976).

The properties of concrete subjected to elevated temperatures. Imperial

College (London) : *CIRIA Underwater Group*, 1976. 20p, Technical note n° 9.

Brúls A. et Vandervelde P. (2000).

Sécurité contre l'incendie dans les bâtiments. Partie 1 : prévention passive, Gand, *Industrie de Sécurité Incendie (ISIB)*.

Borghi R. and Destriau M. (1998).

Combustion and flames. *Chemical and Physical Principles*. Technip.

Cadoin J.F., Pintea D., Dotreppe J.C. and Franssen J.M.

Compartment fires –OZONE v2. Part 2. Methodology and application.

Cajot L.G., Haller M. et Pierre M.

Projet DIFSEK, partie 1 : actions thermiques et mécaniques.

Campebell- Allen D. and Desai P.M. (1967).

The influence of aggregate on the behaviour of concrete at elevated temperatures. *Nuclear Engineering and Design*, 1967, vol 6, n° 1, p 65-77.

Collet Y. (1977).

Etude des propriétés du béton soumis à des températures élevées entre 200 et 900°C. *Annales des Travaux Publics Belges*, 1977, n°4, p 332-338.

Chow W.K. and Yin R. (2004).

'A new model on simulating smoke transport with computational fluid dynamics'. *Building and Environment*. 39(6): p 611-620.

Cox G. and Kumar S. (1986).

'Field modelling of fire in forced ventilated enclosures'. *Combustion Science and Technology*. 52(7).

Cox G. (1995).

Combustion fundamentals of fire. *Academic Press*.

Denoël J.F.

Sécurité incendie et constructions en béton.

Deris J.L., Wu P.K., Heskestad G. (2000)

Radiation fire modelling. *Symposium (International) on Combustion*. Vol. 18, issue 2, 2000. P2751-2759.

Drysdale Dougal. (1996).

An introduction to fire dynamics.

EHM C. and Schneider U. (1985).

The high temperature behaviour of concrete under biaxial conditions. *Cement Concrete Research*, 1985, vol 15, p 27-34.

Felicetti R. and Gambarova P.G. (1999).

On the residual properties of high performance siliceous concrete exposed to high temperatures. *Mechanics of Quasi- Brittle Materials and Structures*,: Hermes, 1999, p 167-186.

Franssen J.M. (1987).

Etude du comportement au feu des structures mixtes acier- béton. Thèse de doctorat : Université de Liège, Belgique, 1987. p 276.

Gardiner A.J.(1998)

The mathematical modelling of the interaction between sprinkler sprays and the thermally buoyant layers of gases from fires. *South Bank Polytechnics, U.K, PHD.*

Glynn D.R., Eckford D.C. and Pope C.W. (1996).

Smoke concentrations and air temperatures generated by a fire on a train in a tunnel. *Phoenics Journal*. 9(1).

Hadjisophocleous G.V., and Yakan A. (1991).

Computer modelling of compartment fires. *Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, internal report N° 613.*

Harada T., Takeda J., Yamane S. and Furumura F. (1972).

Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures. *In International Seminar on Concrete for Nuclear Reactors.ACI Special Publication*, 1972, paper SP 34, p 377-406.

Harmathy T.Z. (1968)

Determining the temperature history of concrete constructions following fire exposure. *Journal of American Concrete Institute*, 1968, vol 65, n° 11, p 959-964.

Harmathy T.Z. (1970)

Thermal properties of concrete at elevated temperatures. *ASTM Journal of Materials*, 1970, vol 5, p 47-74.

Harmathy T.Z., and Allen L.W. (1973).

Thermal properties of selected masonry unit concretes. *Journal of American Concrete Institute*, 1973, vol 70, N° 2, p 132-142.

Hasemi Y. and Tokunaga T. (1984).

Flame geometry effects on the buoyant plumes from turbulent diffusion flames. *Fire Sciences and Technology*. Vol 4, n°1, 1984.

Haynes B.S et Wagner H.G (1981).

‘Soot Formation’ *Progress in Energy and Combustion Science*. N°7, p 229-273.

Heinfling G. (1998).

Contribution à la modélisation numérique du comportement du béton et des structures en béton armé sous sollicitations thermo- mécaniques à hautes températures. *Thèse de Génie Civil : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Univ. Lyon 1, 1998. 227p.*

Herid Aresu.

Cours de protection contre l’incendie.

INERIS (Institut National de l’Environnement Industriel et des Risques).

Développement d’une méthodologie d’évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d’entrepôts. (DRA -03).

INERIS.

Incendie en milieu confiné, rapport d’étude, DRA – INUE N° 46055- C 70050 du 11/01/2007.

Jagger S.F. (1991).

A note on combustion product generation. *Health and Safety Laboratory*, U.K ,HSL , report IR/L/FR/91/09.

Khoury G.A., Grainger B.N. and Sullivan P.J.E .(1985).

Transient thermal strain of concrete; literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents. *Magazine of Concrete Research*, 1985, vol. 11 p 131-144.

Kordina K., Ehm C. and Schneider U. (1985).

Effect of biaxial loading on the high temperature behaviour of concrete, *proc. 1st Symp. Cf fire Safety Science*, Gaithersburg, 1985. p 281-290.

Labani J.M., Sullivan P.J.M. (1974).

The performance of lightweight aggregate concrete at elevated temperature. Imperial College (London): *Concrete Structure and Technology*, 1974. 100p. Reports CSTR n° 73/2.

Lankard D.R., Birkimer D.L., Fondriest F and Snyder M.J. (1971).

Effects of moisture content on the structural properties of Portland cement concrete exposed to temperatures up to 500° F. *ACI special edition publication*, 1971, paper SP 25-3, p 59-102.

Lee A.S. and Mellius R.B. (2006).

Lung injury from smoke inhalation. *Paediatric Respiratory Reviews*. 7(2) p 123-128.

Mc Grattan K.B., and Forney G.P. (2000).

Fire dynamics simulator – User’s Manual. National Institute of Standards and Technology. NISTIR 6469.

Mc Guire J.H. (1962).

Protection des bâtiments contre l’incendie.

Maohua Z., Congling S., Xuwei T., and Tairan F.

Study of the human evacuation simulation of metro .*Fire Safety Analysis in China*.

Morley P.D. and Royles R. (1983)

Response of the bond in reinforced concrete to high temperatures. *Magazine of Concrete Research*, 1983, Vol 35, n°123, P67-74.

Nekrasov K.D., Zhukov V.V. and Shevchenko V.I. (1963).

Investigation of process which influence concrete spalling under exposure to heat. *Proceedings of an International Conference on Strength of concrete*, Dresden (Germany): 1963, p 125-134.

Neville A.M. (1990).

Properties of concrete. London: Longman scientific and technical, 1990, 779 p.

Novozhilov V, Harvie. D.J.E., Kent J.H. (1997).

A computational fluid dynamics model of fire burning rate and extinction by water sprinkler.’’*Fire Safety Journal*’’ 29(4): p 259-282.

Noumowe A. (1995)

Effet de hautes températures (20- 600°C) sur le béton- cas particulier du béton à hautes performances. Thèse de Génie Civil : Institut national des sciences appliquées de Lyon et Univ. Lyon 1, 1995. 231p.

Ouellette M.J.(1992).

Visibility of exist signs. *Progressive Architecture*. 74(7) p 39-42.

Philleo R. (1958).

Some physical properties of concrete at high temperatures. *Journal of the American Concrete Institute* , 1958 ,vol.29, n° 10, p857-864.

Pihlajavaara S.E. (1972).

An analysis of the factors exerting effect on strength and other properties of concrete at elevated temperatures. *ACI special Publication*, 1972 paper SP34-19, p347-354.

Pope S.B. (2004).

Ten questions concerning the Large Eddy Simulation of turbulent flows. *New Journal of Physics*, 6(35): 1-24.

Rubini P.A. (1997).

SOFIE (Simulation of Fire in Enclosures) 5th *International Symposium on Fire Sciences*.

Riley A.M. (1991).

Assessing fire – damaged concrete. *Concrete International: Design and Construction*, 1991, vol 13, n°6, 1p 60-63.

Schneider U.

WINKOBRA 4.6. User's guide. Inerfierte Sicherheits Technik GMBH. Germany.

Schneider U. (1982).

Behaviour of concrete at high temperatures. Paris : Rilem, 1982, 72 p. Report to Committee N°44- PHT.

Schneider U. (1988).

Concrete at high temperatures: A general review. *Fire Safety Journal*, 1988, vol 13, p 55-68.

Shields T.J., Boyce K.E. , and Samoshin D.A.

Recent developments in pedestrian flow theory and research in Russia. *Fire Safety Journal*.

Sinai Y.L. (1999)

Comments on the role of leakages in field modelling of underventilated compartment fires. *Fire Safety Journal*. 33(1), p 11-20.

Spalding D.B. (1971).

Concentrations fluctuations in a round turbulent fire jet. *Chemical Engineering Sciences*. 26: p 95-107.

SMARTFIRE, [http:// fseg.gre.ac.uk/smartfire/](http://fseg.gre.ac.uk/smartfire/).

SOLVENT, <http://www.tunnelfire.com>.

Sullivan P.J.E. (1979).

The effects of temperature on concrete. *Developments in Concrete Technology*, vol 1. London: Appl. Sc. Publishers, 1979. p 1- 49.

Vembe B.E., Rian K.E, Holen J.K., Lilleheie N.I., Grimsmo B. et Magnussen B.F. (2000).

KAMELEON FIRE EX 2000. User's manual. Comput IT (Computational Industry Technologies AS), R0122.

Venecanin S.D. (1978).

Thermal incompatibility of concrete components in concrete bridges. *Proc. Of Int. Congres on Durability of Construction Materials*, RIELEM, Ottawa (Canada): August 1978 , p 511-531.

Venecanin S.D. (1983).

Stresses in concrete due to thermal incompatibility of its components. *Proc. Of Int. Colloquium on Material Science and Restoration*, Esslingen (Germany): 1983, p 93—98.

Venecanin S.D. (1984).

Experimental study of thermal incompatibility of concrete components. *Proc.Third Int. Conf. on the durability of Building Materials and Components*, N°3, Espoo (Helsinki): August 1984. p510-520.

Viegas J.C.G. (1999).

Fire Safety in Buildings. Mathematical modelling of fire and experimental validation (in Portuguese) .Instituto Superior Tecnico, Lisbon, Portugal , PHD.

Williams F.E. (1985).

Combustion theory, Addison Wesley.

Weigler H. and Fisher R. (1972)

Influence of high temperature on strength and deformations of concrete. *ACI special Publication*, 1972, paper SP 34-26 , N° 34 vol 1, p 481-493.

Yang K.T and Chang L.C. (1977).

UNSAFE-1 : a computer code for buoyant flow in an enclosure . *National Bureau of Standards*. USA.

Yves Martin et Benoît. P. (2007).

Actions sur les structures exposées au feu et calcul du comportement au feu des structures en béton.

Zhukov V.V. (1980).

Reasons of explosive spalling of concrete by fire. *Scientific Research Institute for Concrete and Reinforced concrete*- Moscow, 1980, vol 1, p1-7.