



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)

Rapport *intermédiaire*

Comportement de structures soumises à un
incendie. Premières réflexions.

Direction des Risques Accidentels

MAI 2001

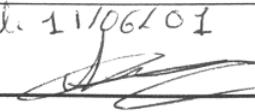
Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôts (DRA-03)

Rapport **intermédiaire**

Comportement de structures soumises à un incendie.
Premières réflexions.

MAI 2001

Ce document comporte 35 pages (hors couverture et annexes).

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Frédéric Masson	André Carrau	Didier Gaston
Qualité	Ingénieur au sein de la Direction des Risques Accidentels	Responsable du programme DRA-03 au sein de la Direction des Risques Accidentels	Directeur adjoint de la Direction des Risques Accidentels
Visa		du 11/06/01 	

PREAMBULE

Le présent document a été établi :

- Au vu des données scientifiques et techniques disponibles ayant fait l'objet d'une publication reconnue ou d'un consensus entre experts,
- Au vu du cadre légal, réglementaire ou normatif applicable.

Il s'agit de données et informations en vigueur à la date de l'édition du document en mai 2001.

Le présent document comprend des propositions ou des recommandations. Il n'a en aucun cas pour objectif de se substituer au pouvoir de décision du ou des gestionnaire(s) du risque ou d'être partie prenante.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	4
2. COMPORTEMENT AU FEU DE MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION USUELS.....	5
2.1 Le bois.....	5
2.2 Le béton	6
2.3 L'acier	7
2.4 Principaux seuils de dommages aux structures.....	10
3. CRITERES REGLEMENTAIRES DE COMPORTEMENT AU FEU.....	11
3.1 Critère de réaction au feu	11
3.2 Critère de résistance au feu	12
4 EUROCODES STRUCTURAUX	14
4.1 Historique.....	14
4.2 Instances de travail.....	14
4.3 Programme de travail	15
4.4 Elaboration des Eurocodes.....	16
4.5 Document d'Application National.....	17
5. EUROCODES FEU	20
5.1 Methodes de calculs	22
5.2 Chargement des structures	23
5.3 Réponse de la structure	28
6. MESURES DE PROTECTION	32
6.1 Le bois.....	32
6.2 Le béton	33
6.3 L'acier	33
7. LISTE DES ANNEXES	35

1. INTRODUCTION

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

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

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

Dans ce contexte général, le présent rapport a pour principal objet de présenter les modes de prévision par le calcul du comportement de structures soumises à un incendie. Il concerne donc essentiellement les méthodes de classification en résistance au feu par le calcul, et tout particulièrement celles consignées dans les normes expérimentales européennes appelées eurocodes.

Pour ce faire, ce document est structuré comme suit :

- Introduction (chapitre 1),
- Comportement au feu de matériaux de construction usuels (chapitre 2),
- Critères réglementaires de comportement au feu (chapitre 3),
- Eurocodes structuraux (chapitre 4),
- Eurocodes Feu (chapitre 5),
- Mesures de protection (chapitre 6).

2. COMPORTEMENT AU FEU DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION USUELS

Ce chapitre a pour principal objet de présenter le comportement au feu des matériaux de construction les plus fréquemment utilisés, c'est-à-dire le bois (cf. sous-chapitre 2.1), le béton (cf. sous-chapitre 2.2) et l'acier (cf. sous-chapitre 2.3).

2.1 LE BOIS

Compte tenu de sa faible conductivité thermique, le bois présente une réaction au feu limitée. En général, les éléments à base de bois sont classés M3 ou M4 (moyennement ou facilement inflammable) suivant leur nature et leur épaisseur. Il existe toutefois des procédés d'ignifugation (cf. chapitre 6) permettant d'obtenir un classement M2 ou M1.

Lorsqu'un fragment de bois compact brûle, trois zones sont à considérer : la zone périphérique constituée de charbon de bois après distillation complète et inflammation des gaz contenus dans cette zone, la zone intermédiaire de pyrogénéation à l'intérieur de laquelle la température est suffisante pour provoquer une distillation et la zone interne dont la température n'a pas encore subi d'élévation sensible et où il ne se passe provisoirement rien. A titre d'illustration, sur du bois massif, la vitesse de propagation du front de carbonisation est de l'ordre de 0,7 mm par minute en moyenne (selon la nature du bois et les conditions extérieures, cette vitesse de carbonisation peut varier entre 0,6 et 2,5 mm/min). Ce front constitue une sorte de barrière thermique limitant fortement la diffusion de chaleur vers le cœur du bois. Ainsi, si le bois présente une réaction au feu limitée, du fait de sa faible conductivité, il a par contre une bonne résistance au feu.

Si la température à laquelle s'enflamme le bois est de 275 °C environ, le processus de combustion (réaction chimique d'oxydation) s'engage à des températures nettement inférieures. Ainsi, lorsque l'on soumet, en vase clos, un échantillon de bois à l'effet de la chaleur, les phases suivantes peuvent être observées :

- Jusqu'à 100 °C : un dégagement de vapeur d'eau se produit. Tant que toute l'eau du bois n'aura pas été évacuée, la température se maintiendra à 100 °C,
- Entre 100 °C et 275 °C : on observe un dégagement de produits pyrolytiques et de gaz (70 % de CO₂, 30 % de CO). Le bois devient alors de couleur brune,
- Vers 275 °C : la réaction devient exothermique. Le dioxyde de carbone diminue tandis qu'apparaissent des hydrocarbures.
- Vers 300 °C : l'apparition de goudrons est observée,
- Au dessus de 350 °C : le dégagement des gaz précédemment cités diminue et on note une présence d'hydrocarbures plus importante,
- Vers 400 °C : apparition d'hydrogène dont le dégagement croît avec la température,
- Au-delà de 450 °C : on observe la formation de charbon de bois.

A l'air libre, le problème est plus complexe. En effet, ce n'est pas le bois qui brûle alors, mais les gaz de distillation. Les flammes ont une température comprise entre 1 000 et 1 850 °C. La température du bois lui-même, en cours de combustion, est comprise entre 400 °C (minimum pour que la combustion continue) et 2 000 °C (valeur théorique jamais atteinte dans la pratique, en particulier à cause de l'humidité du bois et de l'excès d'air amené par le tirage). Le plus souvent, la température semble s'élever progressivement jusqu'à un maximum de 1 000 à 1 300 °C.

De façon générale, le degré d'inflammabilité du bois est conditionné par l'état de surface, son humidité, l'essence du bois utilisée et par la nature de la source de chaleur.

Pour prévoir le comportement d'une structure en bois en situation d'incendie, il est considéré que l'élément conserve sa structure intacte. Cependant, les sections les plus directement exposées à la carbonisation sont déduites des sections initiales en fonction de la vitesse supposée de carbonisation et de la durée requise de stabilité. A titre d'exemple, pour vérifier le degré SF ½ h d'un poteau carré de 200 mm de côté, on vérifiera sa résistance mécanique en considérant qu'il ne mesure plus que 158 mm de côté (soit $200 - (30 \times 0,7) \times 2$; si tous les côtés sont exposés).

Par ailleurs, outre les constructions du type traditionnel réalisées au moyen d'éléments taillés en bois massif, les structures en bois peuvent également être du type lamellé-collé, c'est-à-dire constituées de poutres composées d'éléments minces assemblés par collage. De façon plus précise, le « lamellé-collé » consiste à assembler par collage (colles thermodurcissables, urée-formol, ...) des lamelles de bois superposées et disposées de manière à ce que leur fil soit parallèle. Les types de bois employés sont principalement des résineux (sapin, épicéa, ...). Les charpentes en lamellé collé sont légères (environ 550 kg/m²) et autorisent de grands portées. En général, il est admis que le comportement de poutrelles en lamellé-collé dans un incendie est sensiblement le même que celui du bois massif, les collages n'étant pas affaiblis dans les parties non carbonisées (les colles résistent au feu et freinent la combustion). Les points sensibles de ce type de charpente sont les pièces de jonction métalliques moins résistantes à la chaleur. Leurs déformations hâtent les effondrements.

2.2 LE BETON

Parmi les matériaux de construction qui peuvent être qualifiés d'usuels tels que le bois ou l'acier, le béton est celui qui réagit le plus faiblement au feu. Son caractère incombustible est une évidence (les bétons sont classés M0 en réaction au feu, de même que les mortiers de ciments et de chaux). De plus, sa faible vitesse d'échauffement peut être mentionnée. A titre d'illustration, soumis à une température correspondant à celle d'un incendie, le béton atteint, au bout d'une heure d'exposition, 350 °C à 3 cm de profondeur et 100°C à 7 cm. Ces températures sont bien en deçà de celles pour lesquelles les caractéristiques des matériaux sont affectées de façon sensible (environ 600 °C). De plus, à cette température, le béton dispose encore de 50 à 60 % de sa capacité de résistance.

Lorsque le béton est soumis à des températures en augmentation, différents phénomènes consécutifs à des transformations chimiques, physiques et minéralogiques se produisent. Ces différents phénomènes, qui peuvent concerner aussi bien la pâte de ciment durcie que les granulats, sont les suivants :

- Jusqu'à 100 °C : simple dilatation (coefficient de dilatation du béton : 1.10^{-5}).
- A partir de 100 °C : l'eau s'évapore des pores.
- De 150 à 180 °C : l'eau d'hydratation de l'hydroxyde de calcium est libérée. La pâte de ciment durcie se contracte, et les granulats se dilatent.
- A partir de 400 à 500 °C : l'hydroxyde de calcium se décompose selon la réaction : $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. La vapeur d'eau peut engendrer un phénomène d'écaillage local.
- Vers 570 °C : changement de phase spontané du quartz.
- Vers 700 °C : les phases d'hydrate de silicate de calcium se décomposent.
- Aux environs de 800 °C : la neutralisation du calcaire (granulats) s'amorce selon la réaction : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.
- De 1 150 à 1 200 °C : le béton commence à fondre (la pâte de ciment d'abord, les granulats ensuite).
- Au-dessus de 1 300 à 1 400 °C : le béton se présente sous forme de masse fondue.

La capacité de résistance au feu du béton est intéressante car elle permet aux structures de rester en place et d'assurer la stabilité des constructions. Les structures peuvent ainsi rester stables pendant une durée suffisante pour permettre l'intervention des secours et l'évacuation des occupants.

Au-delà de sa haute résistance, le béton est un matériau à très faible valeur calorifique (qui produit donc très peu de chaleur et alimente très faiblement le feu). De plus, le béton, qui ne transmet que faiblement les flux de chaleur, aura une température au centre bien plus faible que la température extérieure. Ainsi, alors que les différents phénomènes de transformations susmentionnés tendraient à indiquer que vers 500 °C, les modifications dans le béton devraient entraîner un affaiblissement des qualités mécaniques du matériau, l'inertie du béton à la propagation du flux de chaleur dans sa masse permet à certaines constructions soumises à des températures supérieures à 1 000 °C de résister.

2.3 L'ACIER

Les caractéristiques mécaniques d'un acier de construction que sont la contrainte limite de rupture, la contrainte limite d'élasticité et le module d'élasticité diminuent lorsque la température augmente. Des essais classiques sur éprouvette de traction permettent de tracer les courbes reportées en figure 1 ci-après. Les expressions analytiques de ces courbes figurent dans de nombreuses revues spécialisées, ainsi que dans les eurocodes structuraux.

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

la dilatation due à la chaleur se traduira en contraintes thermiques qui viendront accroître le niveau de contraintes global à l'intérieur de l'élément, causant ainsi un effondrement plus rapide. Sans assujettissement axial, un élément d'acier se dilate et peut imposer des charges excentrées aux éléments structuraux contigus en déplaçant l'une de leurs extrémités (par exemple, une poutre déplaçant un mur de maçonnerie porteur). Les règles de l'art de la protection incendie consistent soit à empêcher la dilatation thermique en limitant la température de l'acier, soit à tenir compte de ses effets sur la structure lors de la conception (cf. chapitre 6).

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

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

Par ailleurs, en terme de comportement de structures à un incendie, il est souvent fait référence à la notion de température critique. Cette température est celle à laquelle une pièce ou une structure voit sa contrainte limite élastique abaissée au niveau de la contrainte réellement appliquée. Ainsi, la température critique n'est pas une caractéristique de l'acier mais correspond à une structure donnée et dépend notamment de la manière dont cette structure est sollicitée, de la nuance de l'acier considéré, des conditions aux liaisons (système isostatique ou hyperstatique) et des possibilités de dilatation. On ne peut donc pas parler de la température critique de l'acier ou dire qu'une structure métallique s'effondre à 550 °C : tout dépend de la contrainte réellement appliquée à l'élément considéré.

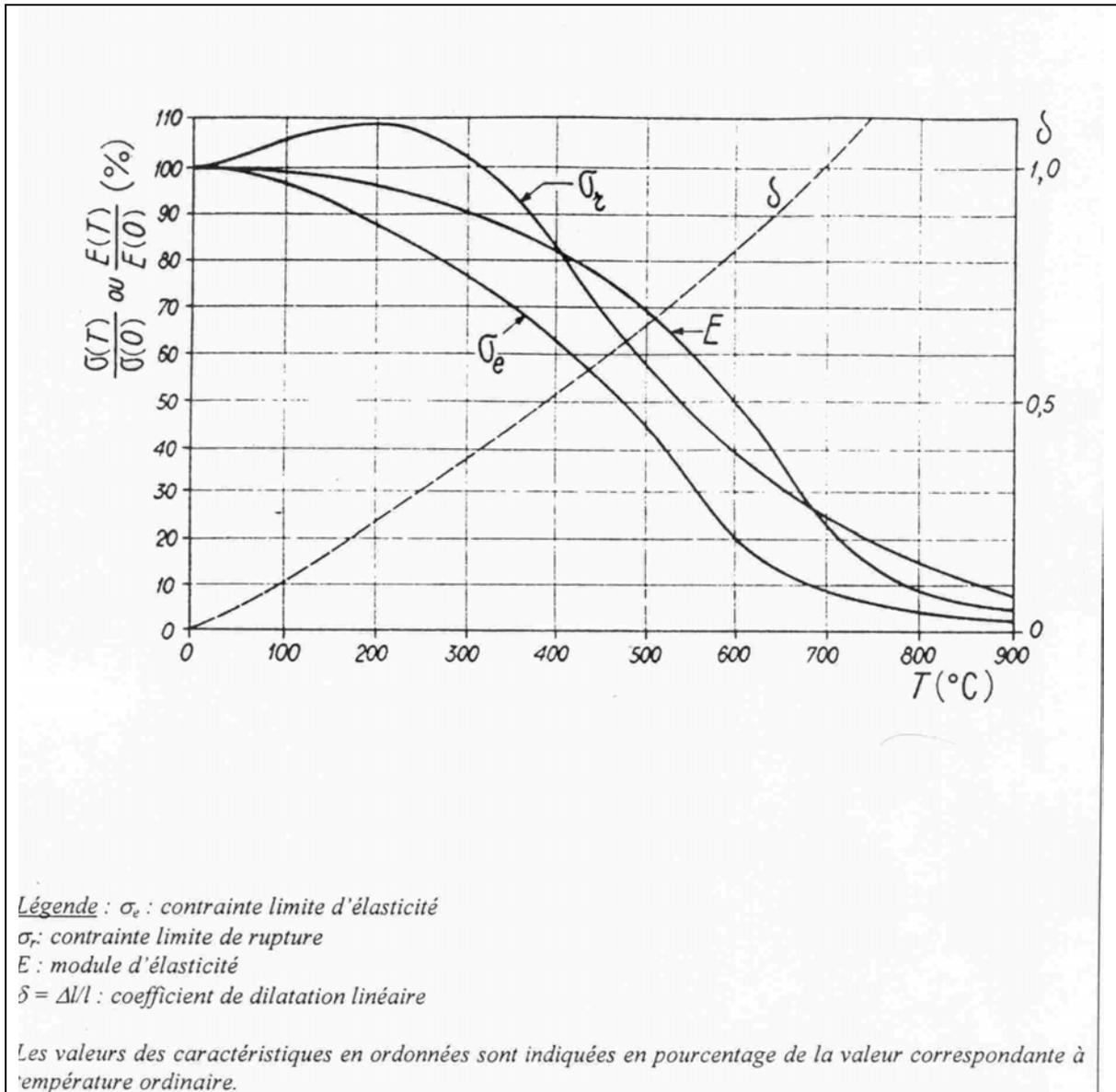


Figure 1 : Caractéristiques mécaniques d'un acier courant de construction en fonction de la température, sur éprouvette de traction (graphe extrait des « Techniques de l'Ingénieur »).

2.4 PRINCIPAUX SEUILS DE DOMMAGES AUX STRUCTURES

Les principaux seuils de dommages aux structures associés à l'incidence de flux thermiques et couramment rencontrés dans les revues spécialisées ont été reportés dans le tableau 1 ci-après. Les indications sur la nature des dommages ont été reprises à l'identique des informations consignées dans les revues. Ainsi, certains termes peuvent être très génériques (terme « structures » ou « feu moyen », par exemple). De plus, les temps d'exposition ne sont pas toujours mentionnés.

<i>Seuils (en kW/m²)</i>	<i>Effets caractéristiques [1]</i>
1	Rayonnement solaire en zone tropicale
8	Début de la combustion spontanée du bois et des peintures
16	Flux thermique au-delà duquel il convient de ne pas exposer les structures de manière prolongée
20	Tenue du béton pendant plusieurs heures
27	Ignition spontanée du bois entre 5 et 15 minutes
36	Propagation probable du feu des réservoirs d'hydrocarbures, même refroidis à l'eau
40	Ignition spontanée du bois dans les 40 secondes
92	Rayonnement d'un faible feu
100	Température de 100°C atteinte dans 10 cm de béton au bout de 3 heures
150	Rayonnement d'un feu moyen (1 000 °C)
200	Ruine du béton par éclatement interne en quelques dizaines de minutes (température interne de 200 à 300 °C)
240	Rayonnement d'un feu intense (1 150 °C)

[1] Informations extraites de publications du GESIP [GESIP, 1991] et de l'API [API, 1990]

Tableau 1 : Principaux seuils de dommages associés aux flux thermiques

3. CRITERES REGLEMENTAIRES DE COMPORTEMENT AU FEU

Dans le contexte réglementaire actuel, deux critères sont retenus pour caractériser le comportement au feu de structures et classer les matériaux et éléments de construction. Ces critères de classement, définis par des arrêtés du Ministère de l'Intérieur, correspondent d'une part, à l'aptitude d'un matériau à participer, notamment par sa propre décomposition, au feu auquel il est exposé (c'est le critère de réaction au feu défini par l'arrêté du 30/06/83) et d'autre part, au temps pendant lequel les éléments de construction peuvent jouer le rôle qui leur est dévolu malgré l'action de l'incendie (c'est le critère de résistance au feu défini par l'arrêté du 03/08/99). Les éléments de construction sont ensuite classés par des laboratoires officiels.

Ces deux critères de classement sont détaillés dans les deux sous-chapitres suivants.

3.1 CRITERE DE REACTION AU FEU

Le classement de réaction au feu est susceptible de s'appliquer aux matériaux de construction finis et aux revêtements appliqués sur leurs supports (panneaux, plaques, films, feuilles, tubes, ...), les matières premières n'étant pas concernées. Les matériaux sont classés en deux groupes (combustibles et incombustibles) et en six catégories traduisant la facilité d'inflammation (M0 pour les incombustibles et de M1 à M4 et Non Classé pour les combustibles). Par ailleurs, dans un souci d'harmonisation, la Commission Européenne a adopté en 1999 un système de classement en réaction au feu des produits de construction. Sept euroclasses¹ allant de A à F (des matériaux les moins combustibles aux plus combustibles) ont été définies et remplaceront, à terme, le classement français en classes M. Schématiquement, par rapport au classement français actuel, la classe F remplacera la catégorie des matériaux non classés, les matériaux relevant des catégories M1 à M4 se répartiront entre les classes B, C, D et E et les classes A1 et A2 seront accessibles aux produits à faible fraction organique et se substitueront à la catégorie M0. L'attribution d'une euroclasse de réaction au feu est construite sur la contribution énergétique uniquement. Elle est accompagnée, pour certaines des euroclasses, de classifications additionnelles relatives à la production de fumées et de particules ou gouttes enflammées. Ces dernières dispositions sont nouvelles pour la France puisque, à l'heure actuelle, d'une part, la mesure de l'opacité des effluents émis lors des essais de réaction au feu n'est pas réalisée et, d'autre part, la production de gouttes enflammées est évaluée par des essais complémentaires et intégrée dans le classement (un produit pouvant passer de M1 à M4 s'il donne lieu à ce genre de phénomène).

En réaction au feu, et pour les matériaux d'épaisseur supérieure à 5 mm, le classement M est déterminée notamment sur la base des résultats des essais à l'épiradiateur ou à la bombe calorifique. A titre d'information, le tableau 2 ci-après indique le classement M de quelques matériaux usuels.

¹ Les sept Euroclasses sont repérées de la façon suivante : A1 / A2 / B / C / D / E / F.

<i>Matériaux</i>	<i>Classements</i>	<i>Remarques</i>
Bois et dérivés	M1 à M4	Dépend de la quantité d'ignifugeants ou de la nature du traitement
Plaque de plâtre cartonnée	M1	
Polystyrène Polyuréthane Polyisocyanurate	M1 à M4 M2 à non-classé M1	Dépend de la quantité d'ignifugeants Dépend de la quantité d'ignifugeants
Laine de verre nue	M0	

Tableau 2 : Classement de quelques matériaux en réaction au feu

3.2 CRITERE DE RESISTANCE AU FEU

Pour ce qui concerne la résistance au feu, la classification est établie en tenant compte du temps pendant lequel sont satisfaites les conditions imposées relativement à la résistance mécanique, à l'isolation thermique et à l'étanchéité aux flammes et aux gaz. Ainsi, en fonction du rôle dévolu à un élément de construction au cours d'un incendie, son classement peut relever d'une des trois catégories suivantes :

- Stabilité au feu (SF) : il s'agit d'un critère de résistance mécanique, stipulant que l'élément concerné continue à assurer sa fonction résistante pendant la durée requise ;
- Pare-flammes (PF) : cette catégorie implique une résistance mécanique et une étanchéité aux flammes, aux gaz chauds et inflammables ;
- Coupe-feu (CF) : l'élément de construction doit répondre non seulement aux critères de résistance mécanique, d'étanchéité aux flammes et aux gaz, mais aussi à ceux d'isolation thermique.

Il peut être noté que la stabilité au feu apparaît comme étant un critère commun aux différentes catégories susmentionnées.

Les deux derniers critères susmentionnés sont applicables pour les éléments de structure pouvant former un écran, c'est-à-dire faisant partie du compartimentage (planchers et murs), la justification des éléments unidimensionnels (poutres, poteaux, ...) n'étant conduite que vis-à-vis du critère de stabilité.

Les degrés de résistance au feu d'éléments de construction peuvent être déterminés par l'une des méthodes de classification suivantes :

- A la suite d'un ou de plusieurs essais conventionnels², associés ou non à des essais complémentaires ;
- Par analogie à des cas antérieurs ou vis-à-vis d'éléments de structures types ;
- Par le calcul selon des méthodes reconnues telles que les DTU (Documents Techniques Unifiés) ou, dans un proche avenir, les eurocodes (normes expérimentales européennes) ;
- Par application d'une combinaison des trois méthodes précédentes (par exemple, une détermination expérimentale des durées de satisfaction aux critères d'isolation et d'étanchéité et un calcul pour la stabilité).

Ces méthodes déterminent le classement de résistance au feu. L'élément testé obtient un degré : SF, PF ou CF en fonction du temps pendant lequel il a satisfait aux différents critères (par exemple, degré SF 2h, degré CF ½ h). Ces degrés sont : ¼ h, ½ h, ¾ h, 1 h, 1h ½, 2h, 3h, 4h ou 6h.

Les classements de réaction au feu et de résistance au feu présentés précédemment sont complétés dans la réglementation par des classements spécifiques pour des applications données. C'est le cas, par exemple, des couvertures et des façades vitrées.

Par ailleurs, les critères retenus par le Comité Européen de Normalisation dans le cadre de l'élaboration des Eurocodes (normes expérimentales européennes) sont les suivants : résistance ou stabilité mécanique (R) ; étanchéité aux flammes (E) ; isolation thermique (I). Ces critères, très proches des critères français actuels (SF, PF et CF), se définissent comme suit :

- Résistance (R) : critère permettant d'évaluer la capacité d'une structure ou d'un élément de structure à résister aux actions spécifiées pendant une exposition au feu donnée ;
- Etanchéité (E) : critère permettant d'évaluer la capacité d'un élément de séparation à empêcher le passage des flammes et des gaz chauds ;
- Isolation thermique (I) : critère permettant d'évaluer la capacité d'un élément séparatif à empêcher une transmission excessive de chaleur.

² Les essais conventionnels sont réalisés dans des laboratoires agréés par le CECMI selon une procédure normalisée (à titre d'exemple, éléments de construction placés dans un four et soumis à une élévation de température ambiante conforme à la courbe ISO 834).

4 EUROCODES STRUCTURAUX

Les eurocodes structuraux sont des normes européennes de conception et de dimensionnement des structures prenant en compte les hypothèses faites concernant les matériaux, la mise en œuvre et le contrôle.

Le présent chapitre a pour principal objet de présenter le contexte normatif ayant conduit à l'élaboration de ces Eurocodes ainsi que leur mode d'application au plan national.

4.1 HISTORIQUE

L'établissement au niveau européen de règles harmonisées de conception et de calcul des constructions a été engagé sous l'égide de la Commission des Communautés Européennes (CCE), après l'adoption de la directive européenne 93/37/CEE (ex 71/305/CEE) sur la coordination des procédures de marchés publics de travaux. En effet, l'absence d'harmonisation apparaissait comme un obstacle au libre accès des entreprises de travaux ou des bureaux d'études techniques aux marchés des autres états membres.

Ces règles ont été désignées sous le vocable d'Eurocodes Structuraux. Elles sont destinées, dans un premier temps, à être utilisées comme alternative aux différents règlements en vigueur dans les divers Etats membres puis, à les remplacer ultérieurement.

En 1990, après consultation de ses états membres, la CCE a confié au Comité Européen de Normalisation (CEN) les travaux d'élaboration, de diffusion et de mise à jour des Eurocodes. Le secrétariat de l'AELE (Association Européenne de Libre Echange) a accepté d'apporter son soutien à ce travail.

A titre d'information, les membres du CEN sont les organismes nationaux de normalisation des pays suivants : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse.

4.2 INSTANCES DE TRAVAIL

Au sein du Comité Européen de Normalisation, le comité technique qui gère ces travaux est le CEN/TC 250 "Eurocodes structuraux", dont la présidence et le secrétariat sont assurés par la Grande-Bretagne. Le CEN/TC 250 est divisé en neuf sous-comités, chacun de ces sous-comités ayant pour tâche la rédaction d'un Eurocode.

Les travaux du CEN/TC 250 sont d'ordre stratégique et de coordination. Ils sont préparés au niveau français par le groupe de coordination des Eurocodes, présidé par Monsieur Moreau de St-Martin (Conseil Général des Ponts et Chaussées), le secrétariat étant tenu par l'AFNOR (Association Française de Normalisation). Pour les neuf sous-comités, les travaux plutôt d'ordre technique sont préparés respectivement par neuf commissions dites homologues, animées par des bureaux de normalisation (BN), où travaillent des experts techniques.

4.3 PROGRAMME DE TRAVAIL

Les Eurocodes Structuraux 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 contractuelisable 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 européenne 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 conception 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 sur les 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, définit les 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, quant à eux, abordent respectivement le calcul géotechnique des bâtiments et ouvrages de génie civil et le comportement de structures soumises à des tremblements de terre.

Les neuf Eurocodes susmentionnés ont été subdivisés en plusieurs parties. Le programme de travail comprend au total 57 sujets. A titre d'exemple, les parties 1-2 de ces Eurocodes concernent le calcul du comportement de 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.

4.4 ELABORATION DES EUROCODES

Le CEN, en accord avec la CCE, a décidé d'élaborer les Eurocodes en deux temps :

- en premier lieu, les eurocodes sont rédigés et publiés en tant que Prénorme Européenne (ENV) pour être expérimentés pendant une durée théorique de 3 ans. Cette période est mise à profit pour expérimenter les eurocodes sur des projets de construction. Durant cette période « ENV », les règles nationales coexistent avec les eurocodes.
- au bout de 2 ans d'existence d'une partie d'Eurocode, les membres du Comité Européen de Normalisation se déterminent sur le devenir de cette prénorme qui peut être soit prolongée, soit transformée en Norme Européenne.

Ainsi, grâce à la période d'expérimentation et d'échanges que constitue la phase ENV, la rédaction de la norme est améliorée, puis publiée sous le statut d'EN.

Des schémas reprenant les différentes étapes d'élaboration des eurocodes pour les stades ENV et EN ont été reportés en annexe C.

A l'entrée en vigueur des normes européennes, les règles nationales en contradiction devront être annulées pour les pays membres de la CCE. Pour les pays membres de l'AELE, seuls les pays ayant voté positivement seront tenus d'appliquer les EN.

4.5 DOCUMENT D'APPLICATION NATIONAL

Lorsque les Eurocodes sont publiés en tant que norme expérimentale, ceux-ci sont accompagnés d'un Document d'Application National (DAN).

Le DAN précise les normes nationales auxquelles il se réfère mais apporte également des modifications à la prénorme européenne (ceci est permis pendant la période prénorme « ENV »). Le DAN a notamment pour objectif de spécifier les adaptations nationales qui sont apportées à l'ENV et qui, pour une part, définissent les conditions techniques d'application de l'ENV pendant la phase d'expérimentation et pour une autre part, préfigurent les améliorations techniques que les bureaux de normalisation nationaux proposeront d'introduire quand il sera question de convertir la prénorme ENV en norme européenne EN de plein droit. Les modifications clairement identifiées par rapport au texte original de la prénorme européenne sont de trois types : commentaire (C) avec un caractère réglementaire éventuel (CR), amendement ou ajout (A) ou invalidation (I). En particulier, il peut s'avérer que l'ENV ne soit pas compatible, dans tous ses points, avec la réglementation nationale. A titre d'exemple, pour ce qui concerne l'ENV 1991, partie 2-2, l'application de certains feux paramétrés n'est pas admise en France (cf. chapitre 4).

Au niveau français, la norme expérimentale publiée comprend donc l'eurocode tel qu'il a été voté au niveau européen dans sa totalité et le document d'application national, ce dernier ne faisant pas l'objet d'un document séparé mais étant intégré tout au long du texte. Ainsi, de façon générale, les eurocodes actuellement publiés au titre de norme expérimentale réunissent trois textes dans le même document. A titre d'illustration, un extrait de la norme expérimentale française XP ENV 1992-1-2 relative au calcul des structures en béton soumises à un incendie a été reporté en figure **Erreur! Liaison incorrecte.** ci-après.

3 PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

3.1 Généralités

- (1)P En situation d'incendie, il doit être tenu compte des modifications des propriétés des matériaux dues à la température.
- (2) Il convient de prendre en compte les propriétés des matériaux à 20°C telles qu'elles sont indiquées dans l'ENV 1992-1-1.
- (3) Cette section indique les valeurs des facteurs réducteurs à appliquer à la résistance caractéristique à la compression du béton et à la résistance caractéristique des aciers de précontrainte et de béton armé. Les méthodes de calcul simplifiées peuvent être utilisées avec ces facteurs. Ces valeurs des facteurs de réduction peuvent être aussi utilisées dans l'évaluation de la température critique du ferrailage, pour adapter les données figurant dans des tableaux à des températures critiques autres que 500°C (voir 4.2.2).
- (4) L'annexe informative A fournit des indications complémentaires sur les propriétés thermo-mécaniques des matériaux, pour l'utilisation des méthodes de calcul générales. Il est également possible d'utiliser les indications fournies dans des documents appropriés.
- (5) Il convient de n'appliquer les modèles de comportement des matériaux donnés en 3.2 et en 3.3 ci-dessous que pour des vitesses de montée de température du même ordre que celles provoquées par l'exposition au feu normalisé, sans dépasser la durée correspondant à la température maximale.
- (5) I Il convient de n'appliquer les modèles de comportement des matériaux donnés en 3.2 et en 3.3 ci-dessous que pour des vitesses de montée de température des matériaux inférieures à 50°C par minute d'une part, pendant la phase d'échauffement seulement d'autre part, et enfin, pour des températures inférieures à 1200°C. Par ailleurs, ces modèles ne peuvent être utilisés dans le cadre de vérifications d'une tenue au feu supérieure à 6 heures.
- (6) D'autres formulations de lois de comportement des matériaux (par exemple pour des feux paramétrés) peuvent être appliquées pour autant que les solutions obtenues restent à l'intérieur du domaine validé expérimentalement.
- (7) Les conditions de feu normalisé étant définies pour une gamme de température allant de 20°C à 1200°C, les propriétés sont alors définies seulement à l'intérieur de ces mêmes limites. Les valeurs montrées représentées en pointillé dans les figures 3.1, 3.2 et 3.3 aux températures plus hautes sont fournies à titre indicatif seulement.

Figure 2 : Extrait de la norme expérimentale française XP ENV 1992-1-2

Les règles de lecture permettant de distinguer les trois textes sont les suivantes :

- La norme expérimentale française comprend tout ce qui n'est pas grisé, y compris les encadrés du DAN ;
- Le DAN est délimité par les zones encadrées qui sont indexées (I), (C), (CR) ou (A) ;
- La version française de la prénorme européenne ENV comprend tout ce qui n'est pas dans les zones encadrées, mais comprend les zones grisées.

De plus, un statut prescriptif a été attribué à chacune des adaptations nationales. Les conventions de notations des différents statuts sont exposées dans le tableau ci-après.

<i>Statut de l'adaptation</i>	<i>Convention de notation</i>
Principe ³	P(1) Ecriture droite Caractère normal
Règle d'application ⁴	(1) Ecriture droite Caractère normal
Commentaire	Ecriture droite Petit caractère
Commentaire réglementaire	Ecriture droite Petit caractère gras

Tableau 3 : Statuts prescriptifs des adaptations nationales

Compte tenu de ce qui précède, et à titre d'exemple, le document définissant les bases de calcul et actions sur les structures exposées au feu est identifié de la façon suivante : ENV 1991-2-2, pour ce qui concerne la pré-norme européenne, et XP ENV 1991-2-2 (indice de classement P06-102-2), pour la norme expérimentale française.

A l'heure actuelle, les normes expérimentales françaises, et donc les eurocodes correspondants, ne sont applicables, en totalité ou en partie, dans le cadre contractuel d'un marché public ou privé, uniquement si les documents administratifs du type cahier des clauses particulières, spéciales ou administratives particulières y font explicitement référence. Cependant, pour les marchés publics, une recommandation pour l'utilisation des eurocodes en alternative des règles nationales, a été adoptée le 15 décembre 1994 par la section technique de la commission centrale des marchés (recommandation n° T1.93 du GPEM/TMO).

Par ailleurs, le processus de conversion des normes expérimentales ENV en normes européennes a commencé. Une approche volontariste a permis de fixer à 2005 l'utilisation effective des eurocodes pour le calcul des ouvrages d'art. Le projet de norme européenne relative à la qualification des entreprises dans le cadre de la passation de marchés publics a fait l'objet d'un accord au sein du TC et a été soumis à enquête fin 1999.

³ Les principes comprennent des formulations d'ordre général et des définitions ne comportant pas d'alternative ainsi que des prescriptions et des modèles analytiques pour lesquels aucune autre alternative n'est autorisée, sauf indication contraire. Les principes sont précédés de la lettre « P ».

⁴ Les règles d'application sont des règles généralement reconnues qui font suite aux principes et sont conformes à leurs prescriptions. Elles sont désignées par un numéro entre parenthèses.

5. EUROCODES FEU

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

- Règles FB (DTU P 92-701) : Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton,
- Règles FA (DTU P 92-702) : Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en acier,
- Règles BF 88 (DTU P 92-703) : Méthode de justification par le calcul de la résistance au feu des structures en bois,
- Règles FPM 88 (DTU P 92-704) : Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des poteaux mixtes (acier + béton).

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

En complément des DTU, un arrêté du ministère de l'Intérieur en date du 22 juillet 1997 (arrêté de la Direction de la Sécurité Civile pris en application de l'arrêté du 21 avril 1193) donne la possibilité d'utiliser les eurocodes structuraux européens (utilisables actuellement à l'état de normes expérimentales), pour déterminer le calcul du degré de résistance au feu des éléments de construction. A ce sujet, il peut être rappelé que la Directive européenne Produits de Construction (DPC), à l'origine des Eurocodes, fixe les exigences essentielles suivantes pour la limitation des risques d'incendie :

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

- la stabilité des éléments porteurs de l'ouvrage puisse être présumée pendant une durée déterminée ;
- l'apparition et la propagation du feu et de la fumée à l'intérieur de l'ouvrage soient limitées ;
- l'extension du feu à des ouvrages voisins soit limitée ;
- les occupants puissent quitter l'ouvrage ou être secourus d'une autre manière ;
- la sécurité des équipes de secours soit prise en considération. »

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

- Eurocode 1, partie 2-2 : Actions sur les structures exposées au feu,
- Eurocode 2, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures en béton,
- Eurocode 3, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures en acier,
- Eurocode 4, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures mixtes (acier + béton),
- Eurocode 5, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures en bois,
- Eurocode 6, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures en maçonnerie,
- Eurocode 9, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures en aluminium.

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

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

Pour les structures métalliques, l'eurocode 3, partie 1-2, décrit les propriétés de l'acier à température élevée, et les différentes méthodes qui permettent d'analyser son comportement au feu. Il présente notamment les méthodes de vérification de la résistance au feu conventionnel d'éléments tels que les tirants, les poutres et les poteaux. Ces méthodes prennent en compte l'échauffement des éléments soumis à un incendie et la diminution concomitante des caractéristiques mécaniques. Une annexe décrit une méthode pour les éléments de structure situés à l'extérieur des bâtiments. La possibilité d'utilisation de méthodes de calculs avancés est présentée.

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

5.1 METHODES DE CALCULS

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

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

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

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

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

5.2 CHARGEMENT DES STRUCTURES

5.2.1 Courbes d'élévation de température

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

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

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

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(.8t + 1),$$
 2. la courbe de feu extérieur : $\theta_g = 20 + 660.(1 - 0,687.e^{-0,32t} - 0,313.e^{-3,8t}),$
 3. la courbe hydrocarbure : $\theta_g = 20 + 1080.(1 - 0,325.e^{-0,167t} - 0,675.e^{-2,5t})$
- avec θ_g : température des gaz dans le compartiment en feu (en °C) ou température des gaz à proximité de l'élément, pour l'équation 2 ,
 t : temps après le début de l'essai (en minutes)

Enfin, des actions résultant d'une exposition à un feu « paramétré » sont envisageables sur la base de paramètres physiques prenant au moins en compte la densité de charge calorifique d'incendie (charge calorifique⁵ par unité de surface) et les conditions de ventilation. L'annexe B (informative) de l'ENV 1991-2-2 fournit des courbes température/temps en phase de montée en température et en phase de refroidissement.

⁵ la charge calorifique se définit comme la somme des énergies calorifiques dégagées par la combustion de tous les matériaux combustibles dans un espace (contenu des bâtiments et éléments de construction).

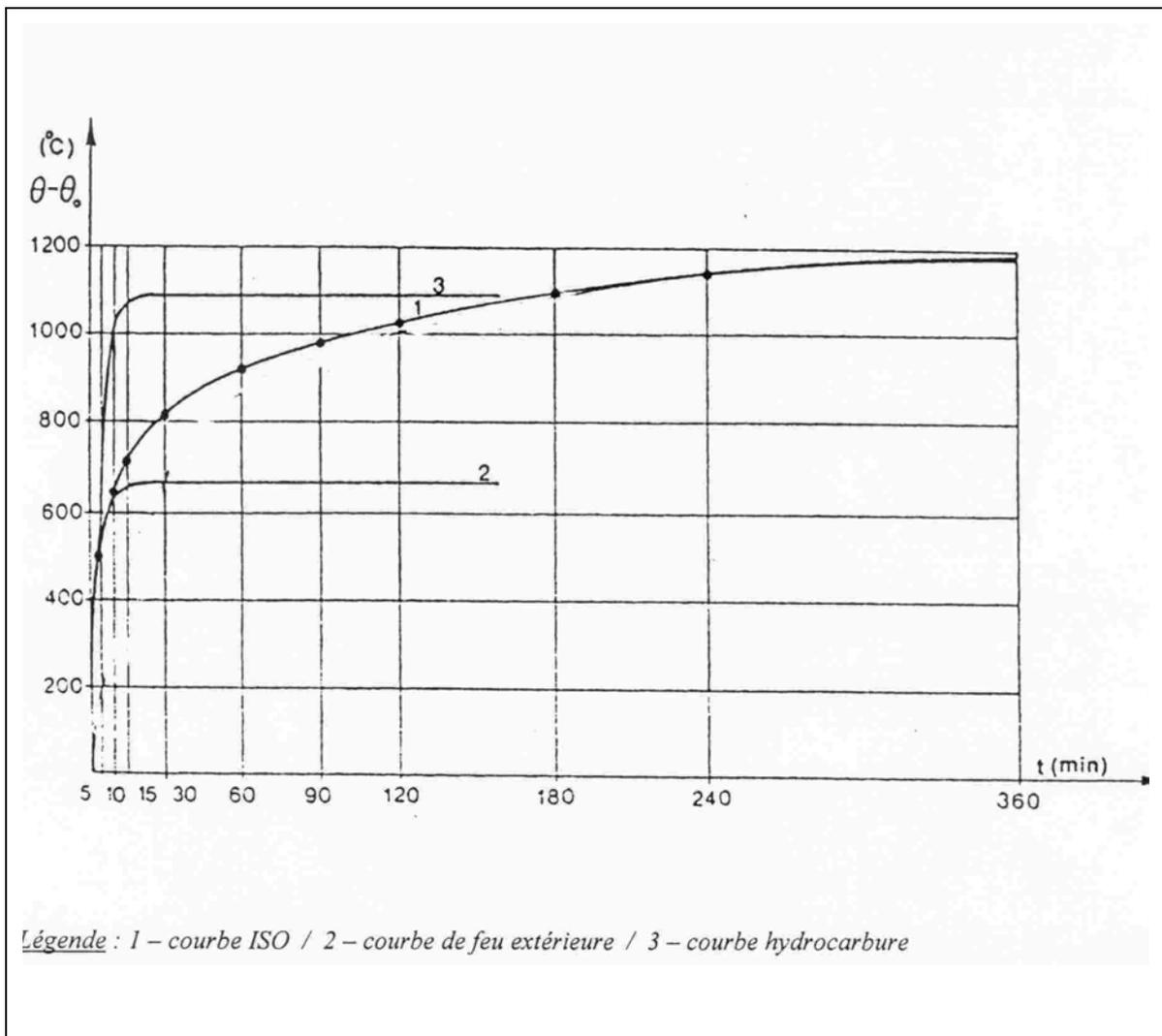


Figure 2

La 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 1 000 °C après 90 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 1 200 °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 dans des bâtiments. En effet, les éléments suivants peuvent être notés :

- la courbe ISO est une courbe théorique, qui peut être dépassée durant 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'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 combustibles ait brûlé ;
- il n'existe qu'une seule courbe ISO pour tous les types de bâtiments, quelles que soient les conditions de charge calorifique et de ventilation.

Une partie des propos susmentionnés sont illustrés sur le graphe reporté en figure 4 ci-après. Ce document présente en effet l'évolution temporelle des températures, dans un local et sur un composant, en considérant d'une part, la courbe ISO et d'autre part, les enregistrements obtenus lors d'essais dits d'incendies naturels (bûchers de lattes de bois).

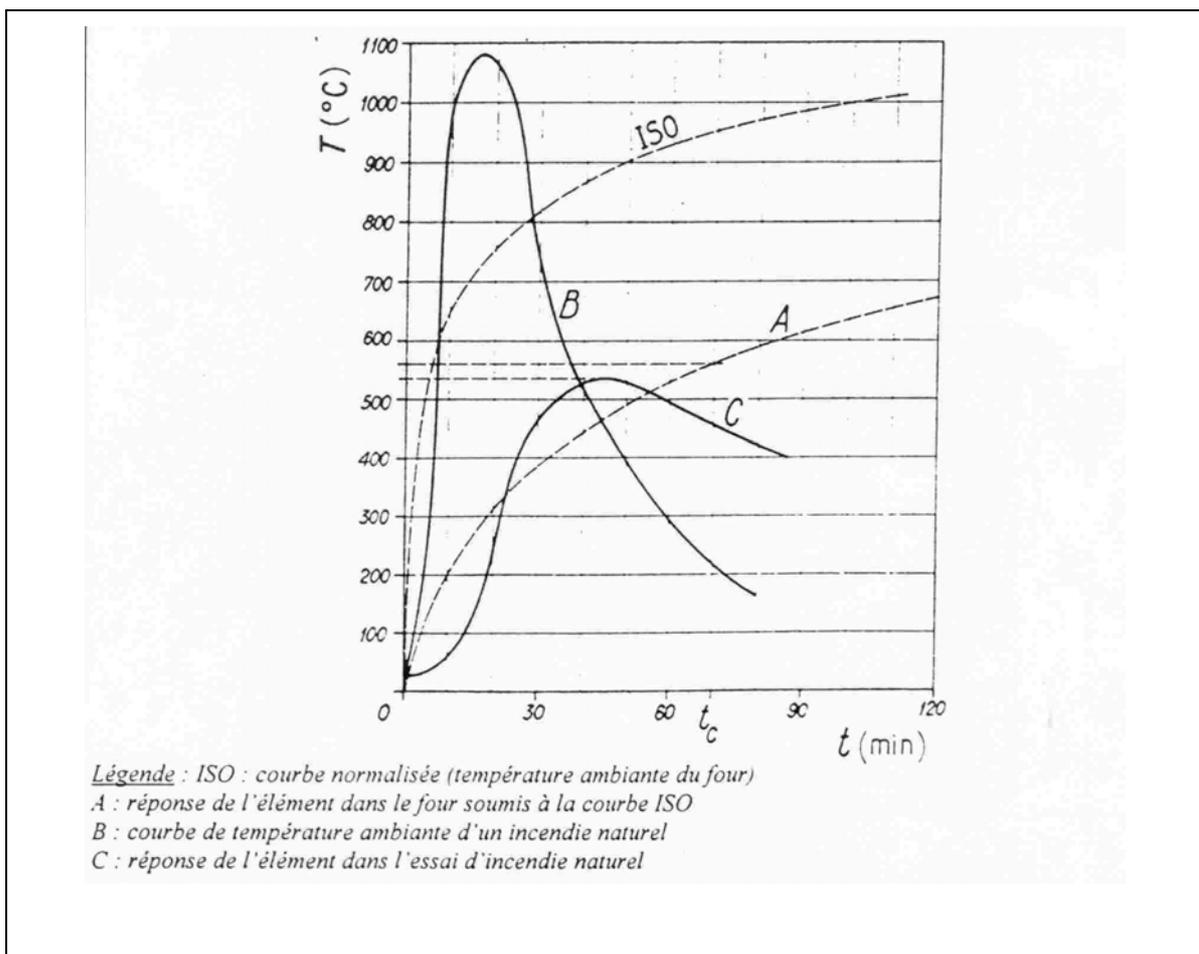


Figure 3 : Evolution des températures dans les essais (graphe extrait des « Techniques de l'Ingénieur »).

La courbe de feu extérieur est une courbe plafonnée à une élévation de la température égale à $20 + 660^{\circ}\text{C}$, c'est-à-dire à une température nettement inférieure à la courbe standard

(cf. figure 2). Elle s'applique à la face externe des murs extérieurs à fonction séparative, susceptibles d'être exposés au feu à partir de différentes parties de la façade, c'est-à-dire directement de l'intérieur du compartiment en feu concerné ou d'un compartiment se trouvant au-dessous ou à côté du mur concerné.

La courbe hydrocarbure augmente plus rapidement que la courbe standard. De plus, elle est plafonnée à $20 + 1080^{\circ}\text{C}$. Cette courbe est utilisée pour les feux de liquides de type hydrocarbures.

Un feu paramétrique est sensé reproduire les conditions plus réelles d'un incendie. L'allure de la courbe température/temps est ainsi déterminée à partir de modèles de feu et de paramètres physiques spécifiques définissant les conditions à l'intérieur d'un compartiment⁶. Il convient de noter que cette courbe température/temps paramétrée n'est pas reprise, à l'heure actuelle, dans la norme expérimentale française.

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

5.2.2 Actions thermiques

Les actions thermiques sont définies en calculant le flux de chaleur net h_{net} à la surface de l'élément considéré. Ce flux est déterminé en tenant compte des flux radiatif h_r et convectif h_c .

Le flux radiatif par unité de surface est généralement donné par la relation suivante :

$$h_r = \phi \varepsilon_f \varepsilon_s \sigma [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]$$

avec : ϕ : *facteur de forme*,

ε_f : *émissivité correspondant au compartiment de feu (généralement égale à 0,8)*,

ε_s : *émissivité concernant la surface du matériau*,

σ : *constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$)*,

θ_r : *température du rayonnement à proximité de l'élément (généralement égale à la température des gaz) [en $^{\circ}\text{C}$]*

θ_m : *température de surface de l'élément structurel [en $^{\circ}\text{C}$]*

Le facteur de forme est déterminé dans les parties des ENV 1992 à 1996 et de l'ENV 1999 relatives au calcul au feu. A défaut, il convient de prendre un facteur de forme égal à 1.

⁶ Le terme « compartiment » est défini comme un espace à l'intérieur d'un bâtiment, s'étendant sur un ou plusieurs niveaux et délimité par des éléments séparatifs tels que l'extension du feu au-delà soit empêchée pendant l'exposition au feu considéré. Il peut être noté que cette notion de compartiment doit être distinguée de celle de la réglementation nationale qui implique la satisfaction d'exigences additionnelles relatives notamment au contrôle des fumées.

L'émissivité concernant la surface du matériau est définie dans les parties des ENV 1992 à 1996 et de l'ENV 1999 relatives au calcul au feu. Si aucune donnée n'est spécifiée, il convient de prendre 0,7. La température du rayonnement est fournie par la courbe nominale température/temps retenu, dans la mesure où elle peut être représentée par la température des gaz. La température de surface de l'élément, quant à elle, résulte de l'analyse thermique, selon les parties des ENV 1992 à 1996 ou de l'ENV 1999 relatives au calcul au feu.

Le flux convectif, quant à lui, est fonction principalement des mouvements gazeux autour de l'élément structurel. Son expression analytique est la suivante :

$$h_c = \alpha_c (\theta_g - \theta_m)$$

avec : α_c : coefficient de transfert thermique par convection [en $W/m^2/K$],
 θ_g : température des gaz à proximité de l'élément [en $^{\circ}C$],
 θ_m : température de surface de l'élément structurel [en $^{\circ}C$].

Le coefficient de transfert thermique est fonction de la courbe température/temps retenu. Par ailleurs, sur la face non exposée des éléments séparatifs, le flux de chaleur dû au rayonnement peut être négligé et, pour la convection, on peut adopter une valeur de $9 W/m^2/K$.

La température des gaz peut être fixée par la courbe nominale température/temps retenue ou spécifiée en termes de paramètres physiques.

Pour vérifier la stabilité mécanique d'une structure, à cette action thermique doivent être ajoutées les actions mécaniques correspondant aux différentes charges possibles s'exerçant sur la structure, dont les combinaisons sont définies dans l'annexe F de l'eurocode 1, partie 2-2. Ainsi, lors de la vérification de la résistance au feu d'une structure, le feu est considéré comme une action accidentelle. Selon la partie 1 de l'eurocode 1, la combinaison des actions à considérer pour la vérification de l'état limite ultime admet des valeurs de calcul des actions permanentes agissant simultanément avec la valeur fréquente de l'action variable prépondérante, les valeurs quasi permanentes des autres actions variables et la valeur de calcul de l'action du feu. Pratiquement, cela revient à considérer les charges permanentes agissant en même temps que la charge fréquente d'utilisation dans le cas d'un plancher ou bien, en même temps que la valeur fréquente de l'action du vent dans le cas d'une paroi extérieure.

Ainsi, le chargement d'une structure en cas d'incendie est obtenu en appliquant la combinaison accidentelle suivante :

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

avec :

- G_k : valeurs caractéristiques des actions permanentes,
- γ_{GA} : coefficient partiel de sécurité pour les actions permanentes en situation accidentelle (en général, pris égal à 1),
- $\Psi_{1,1}$: coefficient partiel de combinaison de l'action variable dont on considère la valeur fréquente. En général, sa valeur est comprise entre 0,5 et 0,9 ; elle vaut cependant 0,3 pour le vent et 0 pour la neige,
- $Q_{k,1}$: valeur caractéristique d'une action variable (la principale),
- $\Psi_{2,i}$: coefficient partiel de combinaison de l'action variable d'accompagnement n° i , dont on considère la valeur quasi permanente. En général, sa valeur est comprise entre 0,2 et 0,9 ; elle vaut 0 pour le vent et la neige,
- $Q_{k,i}$: valeurs caractéristiques des autres actions variables,
- $A_{d(t)}$: valeurs admises des actions dues à l'exposition au feu (à titre d'exemple, il peut être nécessaire de prendre en compte des actions additionnelles telles que l'impact dû à l'effondrement d'éléments structuraux).

La formulation analytique de cette équation, assez complexe, traduit l'approche globale adoptée dans les eurocodes avec notamment la prise en compte de coefficients de sécurité et d'actions dues à l'exposition au feu de la structure (du type impact suite à un effondrement).

5.3 REPONSE DE LA STRUCTURE

L'évaluation de la résistance au feu concerne l'ensemble de la structure d'un compartiment, voire d'un bâtiment. L'analyse peut être une analyse globale de la structure, une analyse partielle de la structure ou une analyse individuelle des éléments constitutifs de la structure.

L'analyse globale de la structure doit être effectuée en prenant en compte le mode de ruine vis-à-vis de l'exposition au feu, les propriétés des matériaux et la rigidité des éléments, qui dépendent de la température.

Comme alternative à l'analyse globale de la structure, des analyses structurales de sous-ensembles comprenant les parties appropriées de la structure peuvent être effectuées. De même, il est possible d'analyser des éléments individuels en situation d'incendie (une analyse par éléments est suffisante pour vérifier les exigences de résistance à l'incendie normalisé).

Par ailleurs, une alternative à l'utilisation des modèles de calculs peut être le dimensionnement sur la base de résultats d'essais.

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

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

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

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

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

La réponse à l'action thermique correspond à une élévation de la température de la structure métallique qui conduit à une modification des propriétés mécaniques et donc une perte de résistance mécanique (cf. chapitre 2).

A partir de la courbe température-temps retenue comme sollicitation thermique, le flux net donné au sous-chapitre précédent peut être utilisé pour déterminer la température de l'élément considéré en fonction du temps.

Pour une distribution de température supposée uniforme dans la section de l'élément, l'augmentation de température d'un élément en acier non protégé, pendant un intervalle de temps Δt , peut être déterminée par la relation suivante :

$$\Delta\theta_{a,t} = h_{net,d} \Delta t (A_m / V) / (c_a \rho_a)$$

avec : $h_{net,d}$: flux thermique absorbé par les éléments par unité de surface [en W/m^2],

A_m : surface exposée de l'élément par unité de longueur,

V : volume de l'élément par unité de longueur,

A_m / V : facteur de massiveté de l'élément considéré (non protégé) [en m^{-1}],

c_a : chaleur spécifique de l'acier [en $J/kg/K$],

ρ_a : masse volumique de l'acier [en kg/m^3].

Pour information, l'ENV 1993-1-2 fournit également une relation permettant de déterminer l'élévation de température dans un élément en acier isolé avec un matériau de protection contre le feu.

Lorsque la température de l'élément est connue, son comportement mécanique à température élevée peut être étudié. Celui-ci peut être évalué, en première approche, d'une manière simplifiée en utilisant les formules simplifiées des Eurocodes, en considérant une température homogène en section et le comportement des éléments indépendamment. Une étude approfondie d'une partie de la structure globale peut être réalisée, en utilisant des logiciels aux éléments finis prenant en compte les éventuels gradients en section et l'interaction entre éléments (cf. annexe D).

La mise en œuvre des méthodes de calculs avancés et des modèles qui s'y rapportent est subordonnée à l'accord du Ministère de l'Intérieur (Direction de la Sécurité Civile).

Les modèles de calculs avancés peuvent être utilisés pour des éléments individuels, pour des sous-ensembles ou pour des structures complètes.

Les méthodes de calculs peuvent être utilisées pour tous les types de sections. Afin de fournir une analyse réaliste du comportement d'éléments de structures soumis à un incendie, elles doivent être basées sur des comportements physiques fondamentaux.

Les méthodes de calculs avancées peuvent comporter des modèles de calculs séparés pour déterminer d'une part, le développement et la distribution de la température dans les éléments de structure (modèle de réponse thermique) et d'autre part, le comportement mécanique de la structure ou d'une quelconque de ses parties (modèle de réponse mécanique).

Le modèle de réponse thermique doit prendre en compte les actions thermiques concernées et spécifiées dans l'ENV 1991-2-2 ainsi que la variation avec la température des propriétés thermiques des matériaux. De plus, les effets d'une exposition non uniforme à la chaleur et du transfert thermique vers des composants adjacents du bâtiment considéré, peuvent être pris en compte quant il y a lieu.

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

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

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

- soit à un surdimensionnement de l'élément de manière à diminuer son taux de chargement mécanique et diminuer sensiblement son échauffement ;
- soit à une protection thermique de manière à réduire notablement l'échauffement de l'élément (cf. chapitre 6).

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

6. MESURES DE PROTECTION

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

Le type de protection convenant le mieux à un ensemble donné dépend principalement du type de matériaux utilisés dans sa construction puisque chaque matériau se comporte différemment lorsqu'il est exposé à des températures élevées (cf. chapitre 2).

Les sous-chapitres suivants ont pour objet de présenter les modes de protection les plus courants pour les structures en bois (cf. sous-chapitre 6.1), en béton (cf. sous-chapitre 6.2) et en acier (cf. sous-chapitre 6.3).

6.1 LE BOIS

La combustion du bois produit à la surface de l'élément considéré une couche carbonisée qui isole le bois non brûlé de la chaleur dégagée par les flammes. Ce phénomène réduit considérablement la vitesse de carbonisation qui demeure relativement constante pendant toute la durée du feu. De plus, le bois a une très faible conductivité thermique, ce qui veut dire que l'intérieur de la pièce de bois est peu affecté pendant que les faces extérieures brûlent. En fait, il existe une assez bonne corrélation entre la résistance aux charges d'un élément de bois et sa section réduite.

La résistance au feu d'une structure en bois peut être améliorée par l'adjonction d'une protection thermique sur les faces susceptibles d'être soumises à l'action du feu. Cette protection peut être fixée mécaniquement par clouage ou vissage (bois, panneaux dérivés du bois, plaques de parements de plâtre) ou par enrobage (plâtre projeté sur grillage ou treillis).

Il peut être fait également appel à des procédés d'ignifugation qui ont pour objet de retarder l'inflammation et limiter le développement de l'incendie. En effet, l'ignifugation modifie la réaction au feu des matériaux et retarde leur combustion, en absorbant la chaleur. Les deux procédés suivants sont couramment employés :

- Incorporation de fibres de sels dilués qui pénètrent dans le bois par trempage, pulvérisation ou imprégnation ;
- Application de peintures, enduits et vernis qui constituent, soit une enveloppe isolante et protectrice par simple application, soit une barrière de plusieurs centimètres d'épaisseur entre les flammes et le bois en gonflant (intumescence) sous l'action de la chaleur (à partir de 180 °C).

Concernant ce dernier point, les peintures et vernis ignifuges se présentent sous forme liquide. Ils sont applicables sur du bois brut (palette, poutre) ou déjà traité contre les insectes ou les moisissures. Depuis juin 2000, le Groupement Technique Français contre l'Incendie (GTFI) a publié des règles professionnelles relatives à la mise en œuvre des vernis et peintures intumescents.

Avec le temps, le bois absorbe et élimine l'action des produits ignifugés. L'ignifugation n'est jamais une action totalement définitive. Il faut régulièrement la renouveler.

Toutefois, ce procédé n'est pas toujours satisfaisant, notamment pour les parquets ou les plafonds car les produits ignifuges ne supportent ni l'abrasion, ni les chocs, ni la présence d'eau. De plus, l'ignifugation améliore la réaction au feu en retardant l'inflammation du bois, mais elle ne participe pas directement à sa résistance.

6.2 LE BETON

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

Toutefois, le béton perdant graduellement sa résistance à la compression à mesure que les températures augmentent (cf. chapitre 2), il faut s'assurer que les éléments ont été calculés avec une résistance de réserve suffisante pour supporter les charges appliquées pendant toute la durée d'exposition au feu prévue.

Il est également important de s'assurer que l'armature d'acier noyée dans le béton est suffisamment isolée car l'acier subit une réduction considérable de sa résistance à la traction à des températures élevées (cf. chapitre 2). Le béton étant un assez bon isolant, il ne faut pas un recouvrement très épais pour maintenir la température de l'armature au-dessous des seuils critiques.

6.3 L'ACIER

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

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

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

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

ANNEXE A :
GLOSSAIRE

Glossaire

AELE :	Association Européenne de Libre Echange
AFNOR :	Association Française de NORmalisation
BAEL :	Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites
BPEL :	Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites
BN :	Bureau de Normalisation
CCE :	Commission des Communautés Européennes
CECMI :	Comité d'Etude et de Classification des Matériaux et éléments de construction par rapport au danger de l'Incendie.
CEN :	Comité Européen de Normalisation
CM :	Règles pour le calcul et l'exécution des Constructions Métalliques
CSTB :	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CTICM :	Centre Technique Industriel de la Construction Métallique
CUE :	Commission de l'Union Européenne
DAN :	Document d'Application Nationale
DSC :	Direction de la Sécurité Civile du Ministère de l'Intérieur
DTU :	Document Technique Unifié
EN :	Norme Européenne
ENV :	Prénorme Européenne
GTFI :	Groupement Technique Français contre l'Incendie
INERIS :	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

ISO :	International Standards Organisation
PS :	Règles de construction parasismiques
TC :	Comité Technique
VD :	Version allemande
VE :	Version anglaise
VF :	Version française
XP :	Norme expérimentale française

ANNEXE B :
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

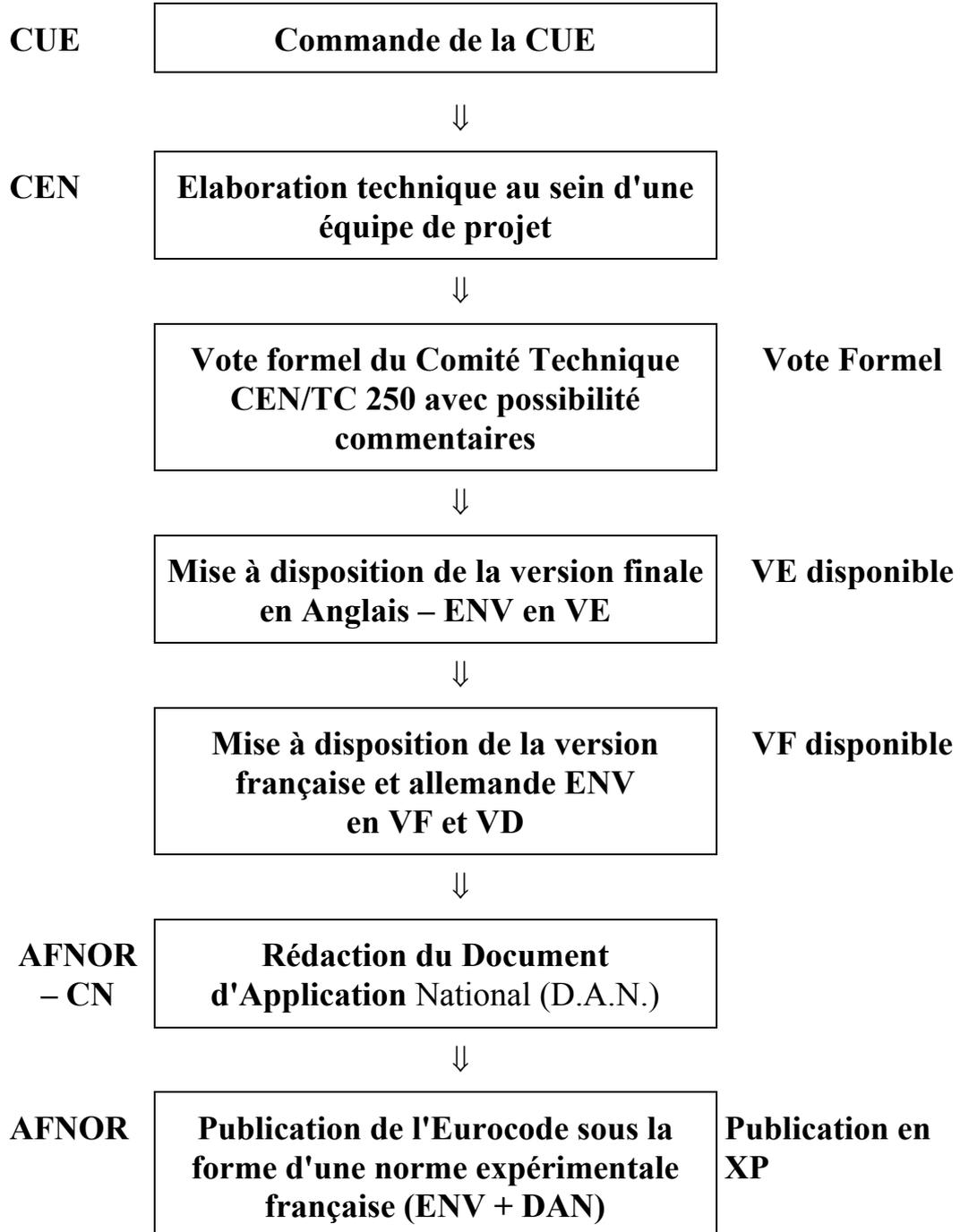
« Règles pour la conception des torches couramment implantées dans l'industrie »
pétrolière. American Petroleum Institute.
API RP 521. 1990.

« Les accidents de gaz liquéfiés (Le BLEVE) »
Rapport GESIP n° 91/05, 1991.

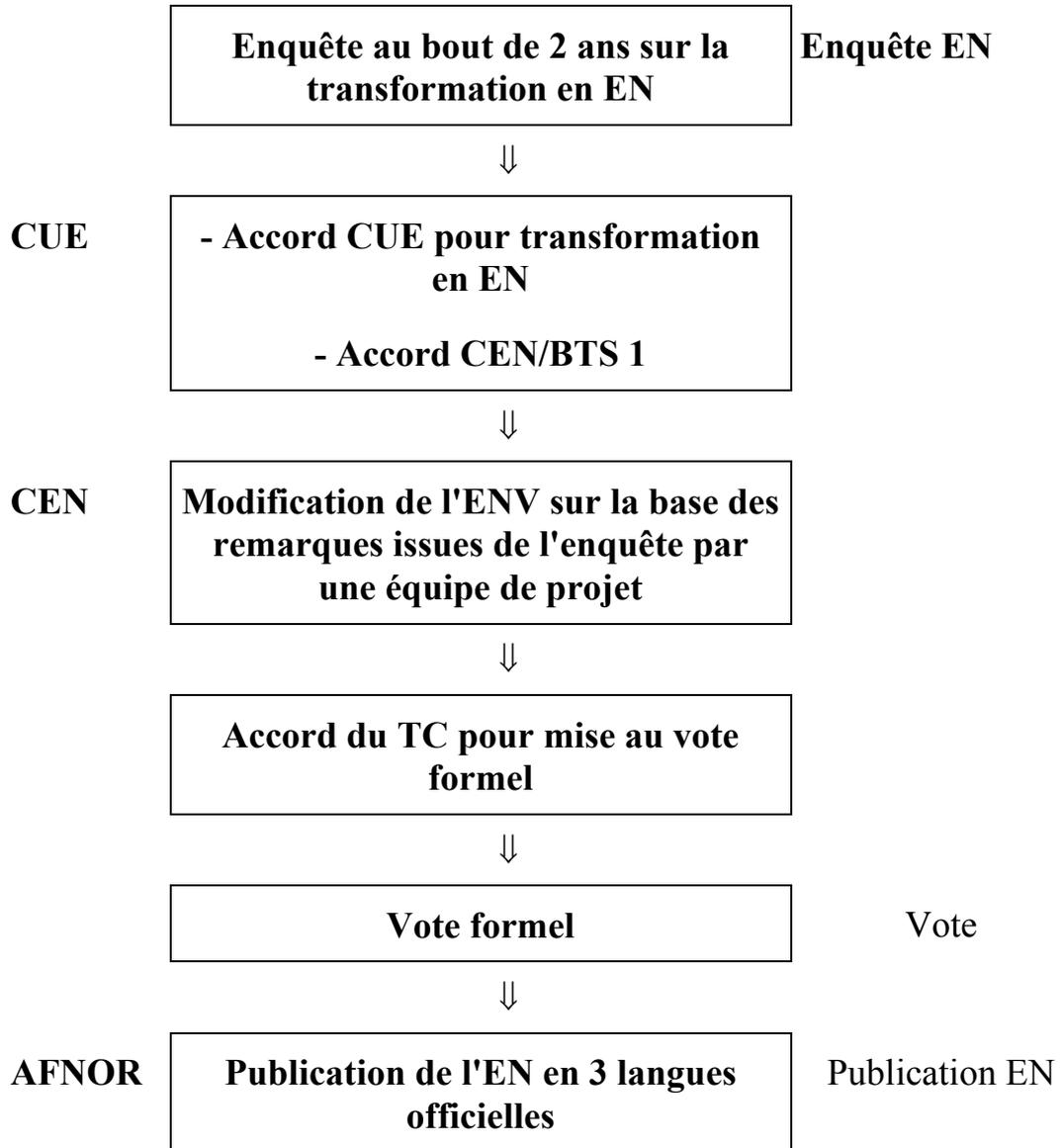
ANNEXE C:

**DIFFERENTES ETAPES D'ELABORATION DES
EUROCODES POUR LES STADES ENV ET EN**

***SCHEMA D'ELABORATION DES EUROCODES
POUR LE STADE ENV***



***SCHEMA D'ELABORATION DES EUROCODES
POUR LE STADE EN***



ANNEXE D :
CODES DE CALCULS

Les trois dernières décennies ont été marquées en mécanique des structures par la capacité d'effectuer des modélisations numériques de plus en plus affinées. Le savoir-faire a ainsi été capitalisé dans des codes de calcul utilisant notamment la méthode des éléments finis (MEF).

A partir des charges (permanentes d'exploitation ou accidentelles) et des caractéristiques de la structure (nature des matériaux, mode d'assemblage, ...), les logiciels de dimensionnement permettent d'éditer des notes de calcul et de comparer les contraintes réglementaires admissibles et les contraintes calculées.

Les techniques de modélisation (construction des maillages, choix des éléments, chargement, ...) font appel à la maîtrise des concepts mécaniques fondamentaux qui sous-tendent les éléments finis (appliqués au calcul des structures). En cela, quelle que soit l'automatisation des codes de calcul, le jugement du modélisateur reste déterminant.

1. Généralités

De façon simplifiée, deux grandes familles de logiciels de calcul peuvent être distinguées.

En premier lieu, les logiciels généralistes, utilisés pour des calculs statiques peuvent être cités. Pour eux, les éditeurs développent des modules communs aux différents matériaux de structure : ainsi, le calcul des moments fléchissants est le même pour le bois ou l'acier. Ces logiciels de dimensionnement général (éléments poutres ou poteaux) peuvent posséder des interfaces dédiées à des modules spécialisés permettant notamment de calculer et de vérifier les assemblages, le flambement des poutres ou la position des assemblages. Les logiciels généralistes coûtent de 10 000 à 80 000 F par poste, mais ils ont tendance à devenir des « logiciels presse-bouton », faciles à mettre en oeuvre mais présentant le risque d'être utilisés comme « boîte noire ».

En matière de logiciels de calcul de structures, le "haut de gamme" (la deuxième famille) est représenté par les programmes qui permettent de réaliser des dimensionnements sophistiqués par la méthode des éléments finis. Il existe sur le marché des codes de calcul éprouvés et approuvés. De façon non exhaustive, les systèmes suivants peuvent être cités :

- Au niveau français :
 - CASTEM 2000, développé par le CEA ;
 - CASTOR, développé par le CETIM ;
 - SYSTUS, développé par FRAMATOME ;
- Au niveau international :
 - ABAQUS, développé par la société HKS ;
 - ANSYS, développé par la société AS & I ;
 - MARC, développé par la société MSC (Mac Neal Scwendler);

Ces outils permettent de résoudre l'essentiel des situations de calculs de structures de génie civil et ceci dans des configurations statiques ou dynamiques et dans des comportements linéairement élastiques ou plus "avancés" (plasticité, fluage, grands déplacements, ...). La recherche des positions instables (flambage, ...) est également accessible par cette voie. Ces logiciels sont utilisés également pour des calculs spécifiques dans des domaines comme l'ingénierie incendie. Dans ce cadre, les cartes thermiques obtenues sont employées comme chargement (déformations imposées) dans le calcul mécanique (découplage thermo-mécanique).

Ces outils numériques demandent un bon niveau de formation pour les manipuler et une capacité à interpréter les résultats.

Leur coût varie de 80 000 à 300 000 F le poste, sans compter la formation, la maintenance, les modules complémentaires et le matériel adapté (PC lourd ou station de travail).

2. Quelques cas particuliers

Depuis 1975, le CSTB a mis au point un ensemble de trois logiciels qui permettent d'une part, de simuler le développement d'un incendie dans un bâtiment (logiciel « Fisba ») et le mouvement des fumées (logiciel « Cifi »), et d'autre part, d'évaluer la stabilité des structures (logiciel « Nat »). Ces outils peuvent prendre en compte les bâtiments dans toute leur complexité (organisation des espaces, propriétés des matériaux, caractérisation des systèmes de ventilation et de désenfumage, ...).

Le logiciel « Fisba » simule le développement d'un incendie dans un local à partir d'un premier foyer. Parmi les applications, on peut ainsi calculer le moment d'allumage d'un élément soumis au rayonnement thermique d'une flamme, le rayonnement émis par un bâtiment en feu jouxtant un autre bâtiment ou encore la température des gaz s'échappant d'un conduit.

Le logiciel « Cifi » permet de simuler les conséquences d'un feu dans un bâtiment, son enfumage et son contrôle « éventuel par un système naturel ou mécanique ».

Le logiciel « Nat » permet la détermination des sollicitations thermiques (densité de flux thermique incident) sur des éléments de structure et de construction causées par un feu intense. Il tient compte de l'influence de la nature des parois du bâtiment, des caractéristiques de son système de ventilation (naturel ou mécanique), et des foyers potentiels (amplitude et durée de l'apport de chaleur). L'utilisation des résultats de calcul permet l'analyse thermique des effets du feu sur des éléments tels que poteau, poutre, paroi ou porte. On peut ensuite prédire leur comportement mécanique.

Ces trois types de modèles numériques correspondent à des modèles de « zones », c'est-à-dire qu'ils reposent sur un découpage de l'espace en gros volumes finis. Des modèles dites de « champs » peuvent également être mis en œuvre. Ils proposent un maillage plus fin et des représentations plus précises des phénomènes. Toutefois, leur mise en œuvre nécessite des moyens de calculs importants.

Par ailleurs, dans le domaine des constructions métalliques, le CTICM (Centre Technique Industriel de la Construction Métallique) dispose également d'outils de simulation du comportement mécanique de structures. Parmi ceux-ci, on peut citer notamment LENAS, outils de modélisation du type thermo-élasto-plastique aux éléments finis, qui permet de modéliser le comportement de structure métallique complexe.

3. Conclusion

De façon générale, il paraît évident que l'utilisation d'outils numériques, et notamment ceux mettant en œuvre la méthode des éléments finis, permet d'évaluer le comportement mécanique d'une structure en fonction des efforts qui lui sont appliquées. Toutefois, la résistance des matériaux classiques peut permettre de dimensionner, en terme d'ordres de grandeur, des ouvrages en déployant des moyens plus simples.

Par ailleurs, la généralisation des Eurocodes va probablement transformer le marché des codes de calculs dans les années à venir.