

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE

EN GENIE CIVIL

Option : Construction métallique

Présenté par : Kahlouche Amel

THEME :

Analyse de la réponse au feu des structures métalliques dans un environnement d'incendie naturel



Devant les membres du jury composé:

Bouafia youcef
Sadaoui Arezki
Illouli Said

Professeur
Professeur
Maitre assistant A

U.M.M.Tizi-Ouzou
U.M.M.Tizi-Ouzou
U.M.M.Tizi-Ouzou

Président
Rapporteur
Examineur

Soutenu le :

2014-2015

TABLE DES MATIERES

Chapitre 1 : Introduction

1-1 Généralités	1
1-2 Etat de la problématique	2
1-3 Cadre de ce travail et objectifs	3
1-4 Cheminement du travail suivi	3

Chapitre 2: Revue de la physique générale de l'incendie et analyse des principaux scénarios de feu utilisés dans la pratique

2-1 Généralités	5
2-2 Relation entre la sécurité incendie et la résistance au feu des structures.....	6
2-2-1 Origine, risque, causes et probabilité de développement d'un incendie.....	6
2-2-2 Propagation du feu dans un bâtiment.....	10
2-2-3 Moyens de prévention contre la propagation	11
2-2-4 Objectifs de la sécurité incendie	12
2-2-4 Dangers de l'incendie.....	13
2-2-6 Options possibles pour atteindre les objectifs.....	14
2-3 Bases de la dynamique du feu.....	18
2-3-1 Combustion et ses effets.....	18
2-3-2 Mécanismes et processus de développement d'un incendie.....	21
2-3-3 Principaux facteurs influençant l'évolution des températures dans un compartiment.....	23
2-4 Actions thermiques- Modèles de représentation de l'incendie selon l'Eurocode 1....	26
2-4-1 Courbes normalisées.....	27
2-4-2 Modèles de temps équivalent.....	28
2-4-3 Courbes paramétriques.....	29
2-4-4 Modèles de zone et modèles CFD.....	40
2-5 Mécanismes de transfert de chaleur.....	42
2-5-1 Problèmes liés aux mécanismes de transferts de chaleur.....	42
2-5-2 Transfert de chaleur par rayonnement.....	43
2-5-3 Transfert de chaleur par convection.....	44
2-5-4 Transfert de chaleur par conduction.....	45
2-5-5 Coefficient de transfert de chaleur dans les phénomènes d'incendie.....	46

Chapitre 3 : Calcul de l'élévation des températures dans les éléments en acier avec ou sans protection du substrat métallique

3-1 Généralités	48
3-2 Caractéristiques des propriétés thermo-physiques et mécaniques de l'acier de construction	48
3-2-1 Définition des propriétés mécaniques de l'acier	49
3-2-2 Définition des propriétés physiques de l'acier	49
3-2-3 Evolution en fonction de la température des propriétés thermo-mécaniques	50
3-2-4 Evolution en fonction de la température des propriétés thermo-physiques	54
3-3 Calcul de la répartition de la température dans un élément métallique.....	57
3-3-1 Idéalisation de l'environnement thermique crée par un incendie.....	57

3-3-2	Hypothèses simplificatrices.....	58
3-3-3	Cas des profilés non protégés.....	59
3-3-4	Cas des profilés protégés.....	62

Chapitre 4 : Bases théoriques de calcul de la réponse structurale en situation d'incendie

4-1	Généralités	74
4-2	Formulation de l'équation d'équilibre incrémentale de la structure	75
4-2-1	Description cinématique du mouvement d'un élément	76
4-2-2	Expression de la déformation dans le cas particulier d'une poutreolon-colonne....	77
4-2-3	Expression incrémentale du principe des travaux virtuels	77
4-3	Discrétisation par éléments finis	79
4-3-1	Choix des fonctions d'interpolation	79
4-3-2	Expression discrétisée incrémentale du PTV élémentaires	80
4-3-3	Assemblage de la forme globale discrétisée	82
4-3-4	Détermination du module d'élasticité tangent et de la contrainte	83
4-3-5	Méthodes d'implémentation numériques.....	85
4-4	Critères de résistance et principes de vérification au feu.....	88
4-4-1	Classification et critères de résistance au feu.....	88
4-4-2	Principes de vérification de la résistance au feu.....	89

Chapitre 5 : Expérimentation numérique et analyse paramétrique

5-1	Généralités	91
5-2	Description du programme PASAT.FOR_version 2015	91
5-2-1	Fichier de données : pasat.inp	91
5-2-2	Organigramme général de calcul	94
5-3	Expérimentations numériques	97
5-3-1	Description des données	98
5-3-2	Discrétisation de la structure	100
5-3-3	Détermination des charges mécaniques équivalentes	101
5-3-4	Réponse thermique	104
5-3-5	Réponse structurale	105
5-4	Analyse paramétrique	107
5-4-1	Effet du scénario de feu	108
5-4-2	Effet du type de protection.....	111

Chapitre 6 : Conclusions générales

6-1	Rétrospective	113
6-2	Organisation du travail	114
6-3	Résultats obtenus	115
6-4	Recommandations futures	116
	Références	117

Annexe A : Subroutine de calcul des températures dans les éléments

Annexe B : Méthode de prédimensionnement des éléments

Annexe C : Fichiers types de données .INP et de sortie .OUT

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1-1 Généralités

Dans notre société moderne, il existe une grande probabilité de rencontrer un incendie dans les constructions telles que les hôtels, les écoles et les hôpitaux ainsi que dans les bâtiments à usage notamment industriels et d'habitation. Cela dépend sans aucun doute de leur état de vétusté et du degré de fiabilité des mesures de sécurité adoptées. La probabilité d'occurrence de l'incendie ne peut malheureusement jamais être complètement écartée malgré les précautions aussi sévères qu'on peut imaginer. C'est à cause non seulement de l'impossibilité d'écarter d'une manière systématique tous les matériaux combustibles mais aussi dans l'imagination d'un monde à l'abri des défaillances et des malveillances.

Il faut bien néanmoins garder à l'esprit et se résoudre à admettre le caractère inéluctable du risque permanent d'incendie dont selon les recommandations des normes européennes de l'Eurocode 3 [1,2,3,4], ce risque doit être pris en considération lors de la réalisation ou de réhabilitation de la construction. On convient évidemment de limiter l'incendie au strict minimum en réduisant ses effets par la mise en œuvre d'une panoplie de mesures bien connues telles que la détection et l'alarme en cas d'incendie, l'extinction automatique par sprinklers, la disposition rationnelle de portes et de parois coupes feu qui interviennent dans le compartimentage du bâtiment, le placement judicieux d'exutoires de fumées et le choix de matériaux ne dégagant pas de gaz toxiques [5]. Ces mesures de sécurité, si importantes soient-elles n'éliminent cependant pas pour l'ingénieur ou pour le praticien en général, la nécessité de concevoir des structures portantes présentant une résistance au feu judicieusement adaptée au type de bâtiment et susceptible de se maintenir dans le temps. Une telle résistance au feu est évidemment indispensable pour sauvegarder les vies humaines à courte et moyenne échéance, pour minimiser les dégâts occasionnés au bâtiment et limiter les frais colossaux aux compagnies d'assurances et pour permettre une intervention efficace des sapeurs-pompiers, sans craindre l'arrivée d'un effondrement prématuré de la structure. De ce point de vue, une bonne résistance au feu d'une structure est une condition non suffisante mais nécessaire pour limiter les effets néfastes d'un incendie.

La construction en acier, à cause de sa légèreté et de sa ductilité, est réputée depuis fort longtemps comme particulièrement bien adaptée à des sollicitations exceptionnelles telles que les tassements anormaux et les tremblements de terre. Cependant, lorsque des exigences de sécurité au feu sont imposées, le caractère de compétitivité de ce mode de construction devient moins affirmatif comparé au béton qui affiche plutôt une meilleure résistance au feu; lui étant naturellement propre et restant stable dans le temps. Un désavantage qu'on attribue principalement à la forte conductivité thermique de l'acier de construction qui entraîne une augmentation très rapide de la température en un laps de temps très court. Les températures dans une telle situation dépassent largement 1200°C. C'est pourquoi le comportement des structures métalliques est généralement vulnérable vis-à-vis du feu et s'avère en conséquence peu favorable au feu dans certaines situations par exemple lorsqu'elles sont non protégées. Quand les exigences de résistance au feu sont très sévères, il est recommandé d'utiliser une association de matériaux permettant d'améliorer, de façon significative et économique, la

résistance au feu des éléments métalliques. En guise d'exemple, citons l'isolement de l'acier par un matériau de protection contre le feu, ou protégé par des écrans thermiques ou par tout autre moyen qui limite l'augmentation de la température de l'acier telle que l'irrigation des structures et la protection partielle par incorporation dans les parois et les planchers [6].

1-2 Etat de la problématique

La durée de résistance au feu des structures en occurrence métalliques dépend sensiblement des températures qui vont se développer dans un environnement d'incendie, conditionnées entre autres, par les matériaux combustibles présents et la ventilation. Les paramètres qui gouvernent les conditions dans lesquelles un incendie réel peut prendre naissance et se développer, sont très nombreux. Chacun d'entre eux intervient d'une manière complexe pour influencer dans sa durée, sa violence et dont la façon dont il va affecter la structure. Parmi ces facteurs, nous pouvons citer la forme, la quantité et la nature des matériaux combustibles, leurs dispositions dans le local incendié, les dimensions des ouvertures de ventilation, la géométrie du compartiment et les propriétés thermiques des différentes parois constituant ce compartiment incendié. Ce problème relève principalement de la thermique mais présente une importance capitale, car si par exemple la distribution de la température dans les éléments d'une structure n'est pas évaluée correctement, le calcul au feu proprement dit sera automatiquement entaché d'erreur.

Le problème de calcul de la répartition des températures dans les éléments en occurrence métallique, protégées ou non, nécessite l'étude d'un certain nombre de phénomènes en liaison avec le développement au feu. Le premier est sans doute le plus délicat, concerne la modélisation de l'environnement créé par un incendie où il nécessite l'examen approfondi des différents problèmes liés à la combustion, le dégagement de chaleur qui en résulte, et enfin, la façon dont l'incendie est simulé qui constitue un point de départ de toute simulation concernant la résistance au feu des structures.

L'Eurocode 1 en sa partie 2 propose plusieurs façons de modéliser un incendie dont essentiellement le modèle température-temps normalisé et le modèle d'exposition au feu dit paramétré ou naturel. Le plus simple est le premier modèle qui consiste d'utiliser des courbes nominales ou standards comme celle issue des travaux de la commission ad hoc de l'I.S.O (International Organisation for Standardisation) communément appelée courbe ISO834. C'est une courbe normalisée qui donne les variations des températures en fonction du temps des gaz dans un four d'essai. Elle est de forme logarithmique dont les températures sont constamment croissantes au cours de l'incendie. Historiquement, les courbes nominales ont été développées pour tester expérimentalement les éléments de construction, en vue d'en établir un classement de leur résistance au feu. Cependant, pour ce qui est de la modélisation d'un incendie dans un bâtiment, ces courbes fournissent une représentation assez pauvre de la réalité et représentent surtout les incendies très sévères et complètement développés.

Le deuxième modèle se rapporte à la simulation sous incendie naturel ou réel où les considérations de calcul se reposent sur l'hypothèse d'une combustion complète de la charge calorifique concernée. Contrairement au scénario conventionnel ISO834, celui-ci conduit à des courbes température-temps qui comportent, en plus de la phase d'échauffement où les températures atteignent une valeur maximale, une branche de température décroissante qui caractérise la phase de refroidissement ou d'extinction de l'incendie. La durée de combustion, c'est-à-dire le temps nécessaire pour atteindre les températures maximales avec un apport suffisant de comburant est évidemment fonction de la charge d'incendie ou de la

capacité calorifique, des conditions de ventilation, de la géométrie et des caractéristiques thermiques des parois du compartiment.

Ces deux modèles qui feront l'objet de ce travail présentent un grand avantage par la facilité de leur implémentation dans un code de calcul par éléments finis aussi bien lors de l'analyse de la réponse thermique que structurale. L'Eurocode 1 propose par ailleurs d'autres approches plus élaborées comme les modèles de zones et les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics) mais l'évolution des températures en fonction du temps n'est pas prescrite comme dans le cas des modèles de feu paramétré. Les températures résultent à la suite d'une intégration dans le temps des équations différentielles d'équilibre exprimant à tout instant les équations de masse et d'énergie. L'application de ces modèles exige toutefois des codes numériques très sophistiqués qui dépassent largement le cadre de travail.

1-3 Cadre de ce travail et objectifs

Le premier objectif fixé consiste d'abord d'analyser le modèle paramétrique sous incendie naturel proposé par L'Eurocode 1 et de l'implémenter ensuite dans le code PASAT.FOR version 2014 en tenant compte des recommandations des Eurocodes sur le comportement du matériau sous incendie naturel.

Le code PASAT.FOR version 2014 (**P**rogramme d'**A**nalyse des **S**tructures en **A**cier sous l'action des gradients **T**hermiques, [7, djettou]) est un programme essentiellement par éléments finis, écrit en langage d'ordinateur FORTRAN, capable d'analyser le comportement au feu des structures en acier, pouvant être éventuellement protégées par peintures intumescentes, en se basant fondamentalement sur le modèle température-temps normalisé ou conventionnel type ISO834 ou hydrocarbonné.

Le deuxième objectif fixé dans ce travail, aussi important que le premier, consiste de mettre en évidence, à travers une analyse paramétrique appropriée, l'effet de certains paramètres clés sur la résistance au feu tels que les scénarios de feu, les différents critères de ruine adoptés et les types de protection envisagés du profilé métallique.

1-4 Cheminement du travail suivi

Le travail présenté dans ce mémoire sera organisé en 6 chapitres dont le premier en guise d'introduction sera consacré essentiellement à la nature de la question et de la problématique ainsi à la description des objectifs fixés.

Le chapitre deux sera consacré à la revue de la physique générale de l'incendie et sur une analyse approfondie des principaux modèles de scénarios de feu rencontrés dans la pratique. Plusieurs points seront d'abord abordés afin d'encren la problématique et d'en comprendre la philosophie liée à l'analyse thermique en considérant le feu naturel avec phase de refroidissement. Particulièrement seront traités la relation entre la sécurité incendie et la résistance au feu des structures, les bases de la dynamique du feu, les modèles de représentation de l'incendie selon l'Eurocode et les mécanismes de transfert de chaleur qui conduisent à l'équation d'équilibre de la propagation de la chaleur de Fourier.

Le chapitre suivant sera consacré d'abord à l'examen des propriétés thermo-physico-mécaniques de l'acier de construction conformément aux recommandations de l'EC3 et suivra ensuite le problème de calcul de l'évolution de la température dans les éléments que nous supposons munis d'une couche de protection susceptible de protéger le substrat ou l'élément métallique soumis à l'action des températures élevées. Ce problème relève principalement de la thermique mais son importance est considérable pour notre étude. Soulignons que dans le cas des structures métalliques, le comportement au feu présente un certain nombre de particularités qui permettent d'envisager l'utilisation des méthodes simplifiées. Ceci est vrai en particulier pour le calcul de l'élévation de température. Par suite de la valeur élevée de la conductivité thermique de l'acier et de la grande surface exposée au feu dans le cas des profilés ordinaires, le problème de la température pourra se résoudre par une équation très simple aux différences finies.

Le chapitre quatre aura trait à l'analyse de la réponse structurale où seront rappelés brièvement les développements théoriques de la méthode de calcul en se basant sur l'expression incrémentale du principe des travaux virtuels dans le but de dériver les équations d'équilibre incrémentales de la structure. Les équations seront ensuite discrétisées par la méthode des éléments finis en utilisant l'algorithme de résolution de la formulation corotationnelle et un élément fini de type poutre-colonne ayant une continuité C^1 .

L'avant dernier chapitre sera consacré à l'implémentation numérique où dans un premier temps nous décrirons le programme établi en spécifiant le fichier type de données et l'organigramme de la procédure. Dans un deuxième temps, nous allons illustrer le programme par des applications numériques portant sur l'évaluation des réponses thermique et structurale d'un exemple d'une structure métallique sujette initialement à l'action de charges mécaniques instantanées suivi d'une élévation des températures occasionnées par à un scénario de feu de type paramétrique. Dans un troisième temps, nous effectuerons une analyse paramétrique appropriée afin de mettre en évidence certains paramètres clés les plus influents sur la résistance au feu de la structure.

Nous terminerons en guise de dernier chapitre par une conclusion générale suivie par quelques recommandations pour l'amélioration et la poursuite de ce travail.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA PHYSIQUE GENERALE DE L'INCENDIE ET ANALYSE DES PRINCIPAUX SCENARIOS DE FEU UTILISES DANS LA PRATIQUE

2-1 Généralités

Comme mentionné dans précédemment, le calcul de la répartition de la température dans les éléments structuraux constitue l'un des deux problèmes fondamentaux à résoudre pour déterminer la résistance au feu des structures sujettes à l'action de l'incendie. Ce problème nécessite l'étude d'un certain nombre de phénomènes en liaison avec le développement au feu. Le premier est sans doute le plus délicat, concerne la modélisation de l'environnement créé par un incendie. Dans ce but, il est nécessaire d'examiner les différents problèmes liés à la physique de l'incendie dont la combustion et le dégagement de chaleur qui en résultent, et particulièrement les différents scénarios de feu qui donnent l'évolution en fonction du temps de la température des gaz dans un compartiment en feu.

La courbe température- temps constitue le point de départ pour toute simulation concernant la résistance au feu des structures. Ces problèmes dépendent d'autres facteurs qui seront examinés très brièvement dans ce chapitre auxquels il faut connaître les mécanismes de transfert de chaleur pour évaluer les flux de chaleur pénétrant dans les éléments. A partir ainsi des données géométriques concernant la structure et des propriétés thermiques des matériaux, et en utilisant un code de calcul approprié, il est alors possible de calculer l'évolution de la température dans les éléments de cette structure. L'organigramme présenté dans la figure 2-1 permet de mettre en évidence les différents problèmes à examiner, ainsi que les données nécessaires pour y apporter des solutions.

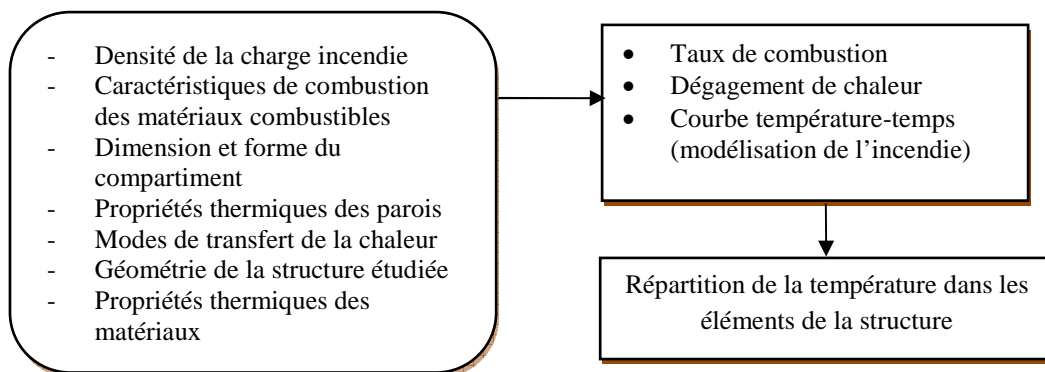


Figure 2-1: Organigramme général de calcul du champ thermique

2-2 Relation entre la sécurité incendie et la résistance au feu des structures

Jusqu'aux années 1970-80, les approches scientifiques de l'incendie étaient quasi inexistantes [7]. A l'heure actuelle, les choses ont complètement changées à un point que la sécurité incendie n'est plus une technique empirique ; c'est devenu une véritable science appliquée faisant appel à des compétences variées et de haut niveau. La sécurité incendie constitue une approche globale et logique dont le caractère est complexe. Elle repose sur un certain nombre d'objectifs ou exigences fondamentales que l'on veut atteindre et qu'il est important de définir avant de songer à adopter une stratégie de prévention et de protection contre l'incendie. Les objectifs de la sécurité contre l'incendie seront à la base des propriétés de résistance et de réaction au feu spécifiés dans les normes de base de calcul.

2-2-1 Origine, risque, causes et probabilité de développement d'un incendie

2-2-1-1 Origine d'un incendie

Pour qu'un incendie puisse prendre naissance, il faut la présence conjuguée de trois éléments à savoir, l'oxygène, des matériaux combustibles et une source de chaleur. Ces éléments forment ce qu'on appelle le triangle du feu, représenté à la figure 2-2. Les températures minimales d'auto-inflammation et de propagation sont liées à la nature du combustible, à sa forme, à sa surface et à sa porosité. L'oxygène est un élément essentiel du feu et la vitesse de combustion est influencée par l'apport de l'air frais.

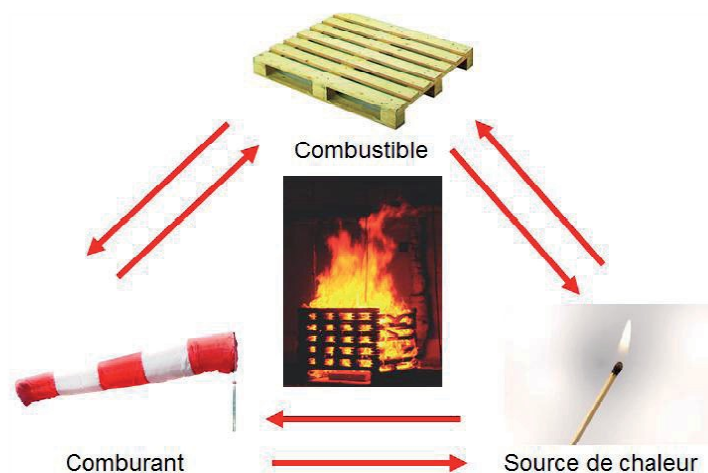


Figure 2-1: Triangle du feu

2-2-1-2 Risque d'incendie

Le risque d'incendie doit prendre en considération les facteurs suivants :

- La probabilité du déclenchement d'un incendie : des processus industriels, où de la chaleur est apportée à des matières combustibles par exemple, feront évidemment accroître la probabilité d'un incendie ;
- la puissance destructive de l'incendie qui est proportionnelle à la quantité du combustible où à la charge de l'incendie ;
- la vitesse de propagation de l'incendie ;

- la présence de risques particuliers éventuels, comme par exemple la présence de matières toxiques, d'éléments radioactifs, d'explosifs,...

Suivant l'origine du risque d'incendie, on peut distinguer :

- le danger intérieur provenant du bâtiment lui-même (le contenant), de son contenu ainsi que des activités qu'il abrite (processus de production par exemple).
- le danger présenté par les occupants du bâtiment (les fumeurs, le manque de propreté : poussière, déchets...).
- le danger extérieur provenant de bâtiments voisins (hangars d'aviation), des dépôts (réservoirs à gaz liquéfié par exemple) et des canalisations de gaz dans les rues.

2-2-1-2 Causes de l'incendie

A l'origine d'un incendie, il y a toujours une source de chaleur rapprochée d'un combustible en milieu comburant c'est-à-dire en présence d'un oxydant tel que l'oxygène par exemple. Ce risque dépend non seulement de la présence d'un combustible, ce qui est de toute façon le cas pour la plupart des bâtiments, mais il dépend surtout de l'activité que le bâtiment abrite. On peut donc faire la différence entre un usage normal des locaux auquel correspond une charge d'incendie sans risques spéciaux, et un usage particulier ou spécial, auquel correspond une même charge d'incendie mais avec un risque d'incendie beaucoup plus important à cause de la présence d'un processus industriel par exemple.

Les causes de l'incendie sont très diverses et nous n'en énumérons que quelques unes ci-après sans que cette liste soit exhaustive:

Origines techniques: Thermiques (sources de chaleur), mécaniques (dysfonctionnement frottement, véhicule à moteur), chimiques (réaction de produits), biologiques (fermentation), électriques (court-circuit), emploi d'énergie.

Origines humaine: imprudence, erreur, ignorance, oubli, malveillance, négligence.

Origines naturels : chaleur solaire, foudre, combustion spontanée.

Origines accidentelles : cigarette mal éteinte, mauvaise utilisation d'un chalumeau...

2-2-1-3 Probabilité du développement d'un incendie

La probabilité du développement d'un incendie dans un bâtiment dépend des facteurs :

- la destination du bâtiment, qui permet de se faire une idée des activités qui auront lieu et de la probabilité d'y rencontrer des matériaux combustibles. La législation en distingue souvent [5] :
- les bâtiments de type A, destinés à l'habitation, comme les immeubles à appartements ;
- les bâtiments de type B, destinés à l'activité des personnes, comme les immeubles de bureaux, les écoles, les bâtiments industriels ;
- les bâtiments de type C à usage mixtes, comme les hôtels, internats, casernes, immeubles à appartements comprenant des magasins et des bureaux ;
- la présence de sources de chaleur, en particulier les sources avec flammes à l'air libre (fumeurs, appareils de chauffage à combustion) et les installations et les appareils électriques (tenant compte des protections incorporées) constituent des risques élevés

d'incendie. L'utilisation de liquides ou de gaz inflammables, beaucoup de procédés chimiques et la présence de poussières peuvent également être la cause d'incendies.

- la fiabilité des mesures de sécurité concernant le choix des matériaux dans les bâtiments et les installations techniques telles que la détection, l'alarme, le sprinklage, etc.

Le danger d'incendie s'évalue sur la base des facteurs mentionnés ci-dessus et d'autres facteurs, comme par exemple les difficultés d'évacuation des personnes (valides, handicapés, malades,...). Plus le danger est élevé, plus les règles de sécurité doivent être sévères.

2-2-1-4 Développement de l'incendie

L'évolution d'un incendie est un phénomène difficile à prévoir. Les paramètres qui gouvernent les conditions dans lesquelles un incendie réel peut prendre naissance puis se développer dans un compartiment sont très nombreux. Chacun d'entre eux intervient d'une manière complexe pour influencer l'incendie dans sa durée, sa violence et la façon dont il va lui-même affecter la structure du bâtiment. Parmi ces facteurs, nous citons par exemple :

- La quantité et la répartition des matériaux combustibles dans le compartiment. Cette quantité, appelée communément charge incendie, conditionne en grande partie la durée de l'incendie et la température qui sera atteinte au cours de celui-ci;
- La température d'inflammation et la vitesse de combustion des matériaux combustibles;
- Les conditions de ventilation du compartiment (ouvertures, système d'aération, etc.). Elles conditionnent également, par l'apport d'oxygène, la durée du feu et les températures atteintes au cours de l'incendie;
- La géométrie du compartiment incendié ;
- Les propriétés thermiques des parois du compartiment.

A- Cas d'un incendie réel : Le déroulement d'un incendie réel, si on exclut les cas particuliers tels que l'explosion, peut être décomposé en quatre étapes ou phases comme schématisées sur la figure 2-2.

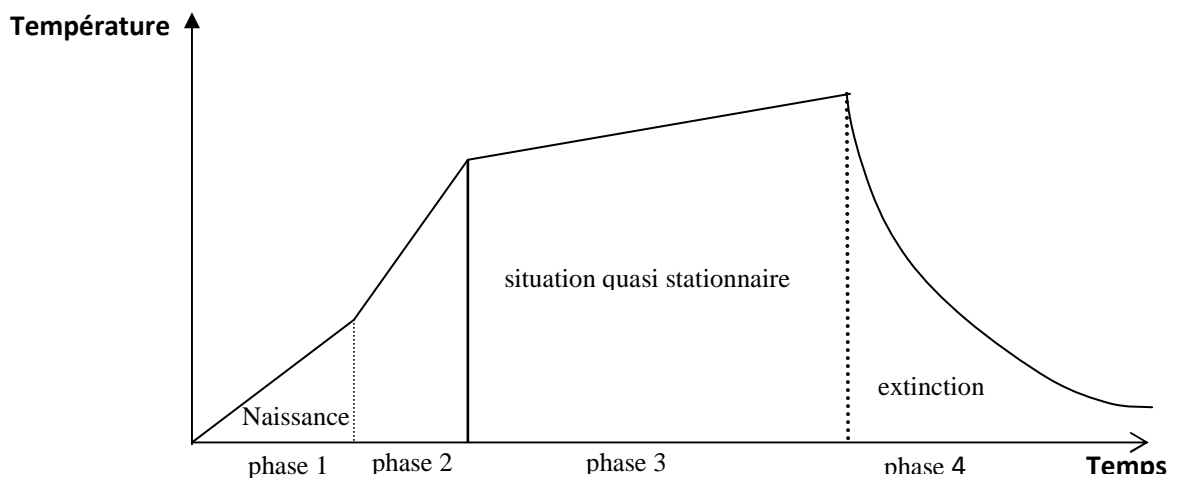


Figure 2-2: Différentes phases d'évolution d'un incendie

- **Phase 1 (Naissance) :** Après allumage par un point chaud (cigarette, allumette, court-circuit, etc.), le feu prend progressivement de l'ampleur dans le compartiment et les échanges thermiques avec l'environnement s'accroissent. Le feu chauffe les éléments situés à proximité, ce qui a pour effet de provoquer la pyrolyse de ces éléments, qui émettent des gaz et qui s'enflamment de proche en proche. La rapidité de croissance du feu sera fonction des matériaux combustibles en cause, de leurs formes, des conditions de ventilation du compartiment et du type de source d'allumage. La température à l'intérieur du compartiment augmente progressivement. De la fumée et des gaz chauds se dégagent formant une couche chaude qui se propage horizontalement sous le plafond du compartiment. Durant cette phase, l'incendie demeure localisé. Les conséquences du feu sur les éléments de structure restent généralement limitées et le risque d'effondrement du bâtiment est écarté.

Lorsque l'apport en oxygène par la ventilation est suffisant, le développement rapide du feu peut conduire à l'embrassement généralisé du compartiment où l'incendie a pris naissance. Notons que lorsque le feu est détecté suffisamment tôt et que les moyens d'action mis en œuvre pour éviter sa propagation sont efficaces, la température moyenne dans le local reste limitée, écartant ainsi le risque de généralisation de l'incendie. Cette phase cependant est d'une importance vitale puisqu'elle permet une détection et une maîtrise précoces.

- **Phase 2 (embrassement généralisé ou flash over) :** Durant cette période de transition de très courte durée, entre l'incendie localisé et l'incendie entièrement développé, les particules imbrûlées des fumées et tous les objets combustibles présents dans le compartiment dans lequel le sinistre se développe s'enflamment brutalement. Une telle température ambiante provoque l'éclatement des vitres des fenêtres, créant un apport d'air important qui se mélange aux gaz de combustion. Ce phénomène appelé « flash-over » intervient habituellement lorsque la température moyenne de la couche chaude atteint de 500 à 600°C dans le compartiment. Combattre l'incendie dans le compartiment dans cette est alors totalement impossible. Les pompiers ne peuvent que protéger le voisinage.

- **Phase 4 (extinction du feu ou Phase de décroissance ou de refroidissement) :** Par manque de combustible ou d'oxygène, le feu s'éteint ou tend à s'éteindre. La température dans le compartiment diminue progressivement, mais demeure encore suffisamment élevée pour endommager la structure du bâtiment. S'il y a eu intervention, le refroidissement dû à l'extinction est global, mais l'échauffement des éléments de construction est encore possible et les risques d'effondrement persistent à cause des phénomènes de dilatation et de contraction des matériaux.

B- Cas d'un incendie normalisé ou standard

Chacune des phases est d'une grande importance lors du développement d'un incendie. Seulement il n'est pas possible de reproduire les conditions réelles d'un incendie, car ces conditions sont différentes à chaque fois. Les courbes d'incendie réel se distinguent donc de la courbe normalisée. Cette dernière n'a pas de réalité expérimentale, mais elle est intéressante car elle rend possible la comparaison entre différents matériaux et éléments de structures pour la simulation des évolutions de températures lors des essais de résistance au feu.

L'élévation de température en fonction du temps correspond à la courbe ISO 834 définie par l'équation ci-dessous et représentée sur la figure 2-3:

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2-1)$$

où t : temps en minutes, θ_g : température normalisée en °C, θ_0 : température initiale en °C.

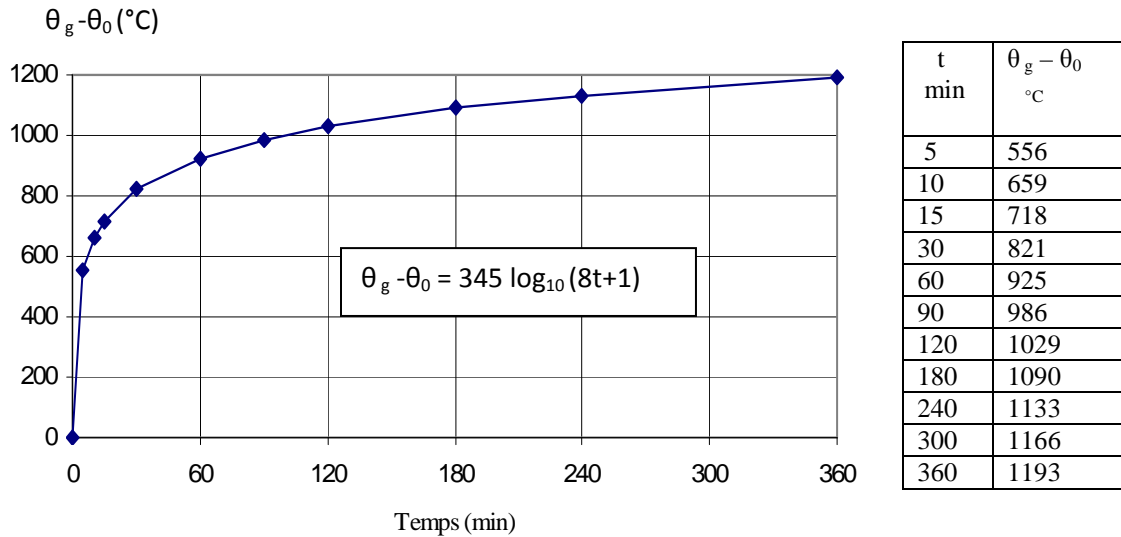


Figure 2-3 : Courbe d'incendie standard ISO834

La courbe correspond à un incendie complètement développé, c'est à dire l'évolution de la température qui règne dans un local après embrasement général. On retrouve d'ailleurs clairement ces deux phases qui se produisent lors d'un incendie réel : la période d'embrasement généralisé, durant laquelle se produit une augmentation très rapide de la température, les éléments y subissent un choc thermique (la température y augmente jusqu'à 800°C en moins de 30 min), suivie de la période où l'incendie est entièrement développé durant laquelle l'augmentation de température est beaucoup moins rapide (la température y augmente jusqu'à 1200 °C en 360 min).

2-2-2 Propagation du feu dans un bâtiment

Lorsqu'un feu a pris naissance par la réunion en milieu comburant (oxygène) d'un combustible et d'une source de chaleur, la combustion produit de la chaleur, des gaz et de la fumée, et le feu tend à se propager.

2-2-2-1 Mode de propagation du feu

De manière générale, la propagation du feu se fait essentiellement par les trois modes de propagation suivants :

- **Rayonnement:** la chaleur dégagée par le foyer (émission de radiations électromagnétiques) conduit à l'inflammation des matériaux combustibles qui se trouvent à proximité. Lorsque ce rayonnement atteint un solide, une partie est réfléchiée, tandis que l'autre est absorbée et transformée en chaleur. L'échauffement ou l'inflammation de l'élément qui en résulte va émettre un flux thermique vers les

éléments voisins, qui sera susceptible de les enflammer à leur tour : c'est la propagation par rayonnement ;

- **Conduction:** la chaleur transmise le long d'un élément conduit à l'inflammation des combustibles qui se trouvent au contact de cet élément (exemple d'un élément très conducteur traversant un mur et propageant le feu de l'autre côté du mur) : c'est la propagation par conduction ;
- **Convection:** Les gaz émis lors d'une combustion sont chauds, ils tendent à s'élever ou à s'étendre s'ils rencontrent un obstacle horizontal. Lorsqu'une température voisine de 600 °C est atteinte, ces gaz chauds qui se sont répandus sont à des niveaux supérieurs, soit à d'autres compartiments contigus peuvent, à leur tour, s'enflammer ou enflammer des matières combustibles éloignées du foyer ; c'est la propagation par convection.

Suivons à l'aide d'exemples le cheminement du feu :

- Partir d'une pièce où se situe un bureau, le feu va se propager au reste de l'immeuble par rayonnement, conduction et convection.
- Il se propage par le couloir : c'est la *propagation horizontale*, avant d'envahir les étages supérieurs par les cages d'escaliers, ascenseurs ou gaines diverses ; c'est la *propagation verticale*.
- La propagation verticale peut se faire également par l'extérieure, soit parce que les fenêtres sont ouvertes, les vitres brisées ou qu'une mauvaise conception du bâtiment due à la mise en place d'éléments de façade en allèges sous dimensionnés en hauteur, a pour effet de trop rapprocher les ouvertures des différents niveaux de l'immeuble.

La propagation du feu peut se faire aussi :

- Par projection de matières combustibles enflammées après éboulement, explosion, flammèches portées par le vent, étincelles, etc. ...
- Par écoulement accidentelle de liquide inflammable sur le sol ou par des caniveaux, des égouts, etc. ...
- Par rupture accidentelle de canalisation de ligne de gaz combustible.

2-2-3 Moyens de prévention contre la propagation

Des moyens propres à éviter la propagation d'un feu doivent être mis en place lors de la construction ou de l'aménagement du bâtiment. Ces moyens concernent :

- Les communications horizontales : qu'ils s'agissent d'éviter la propagation par les produits combustibles ou par les appels d'air, pour assurer un arrêt au feu, il faut lui opposer des barrières. Ces barrières, ce sont les moyens fixes (cloisons et murs coupe-feu) et les moyens mobiles (portes, rideaux coupe-feu à fermeture automatique ou manuelle). Contre la propagation des feux liquides, il sera prévu des bacs ou des cuvettes de rétention, des fosses ou des puisards munis de dispositifs d'étouffement.

- Les communications verticales : Des moyens pris pour éviter la propagation verticale peuvent consister en cloisonnement des gaines et des passages des monts charges et convoyeurs, en cloisonnement des cages d'escaliers.
- Les exutoires : Afin d'éviter l'accumulation des gaz chauds et l'embrassement général qui peut en résulter, on peut prévoir en partie haute des locaux ou des cages d'escaliers, des orifices ou ouvertures automatiques ou manuelles qui permettront l'évacuation des ces gaz. Ces exutoires peuvent activer localement le foyer, mais bien employés, évitent la propagation, éliminent les fumées et permettent le sauvetage et l'intervention dans de bonnes conditions.

2-2-4 Objectifs de la sécurité incendie

Les normes de base ne définissent que trois objectifs suivants :

- Prévenir la naissance, le développement et la propagation d'un incendie
- Assurer la sécurité des personnes
- Faciliter l'intervention du service d'incendie

Il faut lors de projets de plus grande envergure définir d'autres objectifs en relation avec la sécurité des personnes, des biens, de l'environnement et de l'héritage culturel. Tous ces objectifs ne correspondent pas toujours à un bâtiment, mais il faudra garder ceux qui s'appliquent au projet, dépendant de son usage, de sa localisation et de son contenu. Nous allons revoir plus en détail deux objectifs fondamentaux à savoir i) la réduction des pertes en vies humaines dans les incendies de bâtiments et dans leur voisinage ii) la réduction des pertes matérielles ou financières dans les incendies de bâtiments ou dans leur voisinage

2-2-4-1 Réduction des pertes en vies humaines

La réduction des pertes en vies humaines est souvent l'objectif le plus important à atteindre. En effet, si les pertes financières préoccupent plus les assurances et les chefs d'entreprise, tout le monde s'accorde à dire que la valeur la plus cruciale est la vie d'un homme. Cet objectif est néanmoins divisé en deux :

- **La sécurité des occupants:** le bâtiment doit être conçu pour qu'en cas d'incendie, un occupant puisse, soit rester sur place et attendre du secours, soit évacuer le bâtiment en toute sécurité. Pour cela, il faut prendre en considération la propagation de l'incendie dans le bâtiment et la facilité d'évacuation. Il y a donc des exigences quant au compartimentage, la résistance au feu, les distances et dimensions des chemins d'évacuation, mais aussi la propagation des fumées, leur toxicité et leur densité. De plus, les exigences particulières doivent être prises suivant les types d'occupations. Les temps d'évacuation de personnes à mobilité réduite, d'enfants ou de lits d'hôpitaux sont en effet souvent plus importants pour la majorité de la population.
- **La sécurité des services d'intervention (service d'incendie) :** Les services d'incendie sont censés aider l'évacuation, secourir des personnes en difficulté, prévenir la propagation incontrôlée de l'incendie et enfin éteindre le feu. Même si les sapeurs pompiers sont entraînés à prendre plus de risque que les occupants du bâtiment, un degré de protection au feu doit toutefois leur être assuré pour qu'il puisse mener à bien leur intervention. Ici, la résistance au feu, non seulement des éléments de séparation, mais

aussi la structure doit être assurée. La densité des fumées joue sur la visibilité des secouristes et donc sur la bonne marche de leurs opérations.

2-2-4-2 Réduction des pertes matérielles ou financières

Même si la protection des biens n'est pas explicitement demandée dans les normes, beaucoup d'entreprises et d'assureurs attendent un degré minimum de protection de ceux-ci dont différents groupes de protection sont identifiables :

- Protection de la structure du bâtiment

Le but de la protection de la structure du bâtiment est de limiter les dommages liés au feu, pour que le bâtiment puisse être réparé et/ou reconstruit rapidement et au moindre frais. L'idéal serait que la structure du bâtiment tienne tout au long de l'incendie afin de faciliter la reconstruction et de protéger les services d'intervention ou d'autres personnes à proximité.

- Protection du contenu

Dans de nombreux cas, le contenu du bâtiment a plus de valeur que le bâtiment lui-même. On demandera alors une protection plus accrue du contenu. La destruction du contenu peut aussi signifier la perte de données essentielles à une société, voire même l'interruption de l'exploitation de celle-ci. Dans certains cas, l'incendie peut causer des dommages aux systèmes essentiels à une activité sociale normale comme par exemple un incendie dans un centre de télécommunications.

Notons que non seulement la chaleur provenant de l'incendie, mais aussi les dégagements de fumées sont à l'origine de dommages irréversibles dans le cas de produits électroniques de plus en plus présents dans notre société. En effet, si les compagnies de nettoyage spécialisées peuvent remédier aux dégâts produits par la fumée sur la plupart des objets, les produits électroniques, comme les ordinateurs, sont irrécupérables. A ces deux objectifs, on pourrait encore rajouter celui de la protection de l'environnement qui demande une réduction du dégagement des gaz, liquides ou solides toxiques dans l'atmosphère. C'est un objectif à ne pas négliger dans les constructions de certaines industries chimiques ou autres.

2-2-5 Dangers de l'incendie

Les objectifs de la prévention incendie sont mis en danger à cause des phénomènes suivants :

- **Propagation de fumées et gaz toxiques dans le bâtiment :** Les fumées et gaz toxiques peuvent migrer sur de longues distances dans un bâtiment (par exemple dans les faux plafonds) sans qu'ils soient détectés. Poussés par les effets thermiques et la ventilation forcée, ces fumées et gaz ressortent à un endroit du bâtiment, souvent là où on les attend le moins. La fumée et les gaz toxiques sont très nuisibles à la protection des vies humaines. Dans la plupart des accidents mortels dus à un incendie, c'est l'intoxication des occupants qui les a tués. De plus, certains gaz toxiques peuvent être inodores et incolores, ce qui les rend indétectables par les occupants. A côté de l'intoxication, les fumées réduisent la visibilité et rendent dès lors l'évacuation du bâtiment plus difficile, voire impossible si l'occupant n'est pas familiarisé avec les lieux. La sauvegarde du contenu elle aussi est mise en péril à cause de fumées qui peuvent engendrer des dégâts irréparables.

- **Propagation du feu en termes de transfert de chaleur dans le bâtiment :** Le feu se propage au travers du bâtiment grâce à la dynamique d'un feu, enflammant les objets à proximité, mais aussi grâce aux transferts de chaleur au travers d'éléments de construction ou aux déformations ou démolitions des composants du bâtiment. Le feu va naturellement présenter un danger vis-à-vis des occupants, leur causant des brûlures plus ou moins graves dans le meilleur des cas et vis-à-vis du bâtiment et de son contenu. Il faut donc limiter la propagation du feu pour permettre l'évacuation des occupants et la sauvegarde de la structure et des biens. La propagation du feu hors du bâtiment ne présente pas un grand danger pour le voisinage, mais permet au feu de se propager d'un étage à l'autre dans le même bâtiment ou d'un bâtiment à l'autre s'ils sont contigus.
- **La destruction d'éléments de structure :** Le feu, s'il est assez puissant, peut provoquer la destruction de certains éléments de la structure du bâtiment. Ces ruines structurelles proviennent de déformations excessives dues à l'élévation de température et de la réduction de résistance des éléments structuraux exposés au feu. Même si tout le bâtiment ne s'écroule pas la ruine de ces éléments est un danger pour les occupants et les services d'intervention. En plus, elle cause des dégâts lourds au niveau du bâtiment et de son contenu. L'effondrement de tout le bâtiment est dangereux aussi pour le voisinage par la dispersion du feu aux alentours.

2-2-6 Options possibles pour atteindre les objectifs

Dressons une liste d'actions possibles de la prévention incendie pour les objectifs suivants :

- Empêcher l'éclosion du feu
- Faciliter l'évacuation
- Eviter le développement et l'extension de l'incendie
- Eviter l'effondrement de la structure

2-2-6-1 Empêcher l'éclosion du feu

- **Choix des matériaux:** Les matériaux utilisés dans les bâtiments devraient autant que possible être ininflammables de manière à éviter les risques d'éclosion du feu. Il est tout à fait impossible de concevoir un bâtiment complètement ininflammable, de par ses matériaux de construction et son contenu qui est incontrôlable. C'est la réaction au feu des éléments de construction et du mobilier qui joue un rôle important pour satisfaire cet objectif. En effet, la naissance et l'extension d'un incendie à l'intérieur d'un local peuvent être retardées en utilisant des matériaux peu ou pas favorables au développement d'un incendie. Mis à part la chaleur, les matériaux devraient produire un minimum de fumées chaudes pouvant propager le feu à d'autres locaux. De plus, le dégagement de fumées et gaz toxiques doit rester limité pour maintenir la visibilité lors de l'évacuation ou de l'intervention des services d'incendie et réduire le risque d'asphyxie.
- **Gestion et entretien des bâtiments:** Les exploitants ont un rôle à jouer dans la réduction des risques d'éclosion du feu. La propreté des locaux, l'entretien des circuits électriques, le contrôle périodique des extincteurs, l'utilisation correcte des portes coupe-feu etc... sont autant de mesures nécessaires à réduire les risques d'incendie. Mais toutes ces mesures peuvent s'avérer inutiles si on ne sait pas les utiliser correctement et au moment

voulu. Une formation et un entraînement du personnel à la sécurité au feu doivent être prévus.

2-2-6-2Faciliter l'évacuation

- Moyens d'évacuation : Le moyen le plus efficace pour réduire les accidents mortels est la possibilité pour les occupants de s'échapper rapidement des bâtiments en feu. Dans tous les règlements de construction nationaux figurent des dispositions concernant l'évacuation des personnes en toute sécurité. En plus des moyens de prévention passive qui concernent surtout le dimensionnement des chemins d'évacuation et des exigences quant à la propagation du feu dans ces chemins, il est important que les occupants du bâtiment soient avertis le plus tôt possible de l'incendie afin qu'ils puissent procéder à l'évacuation pendant qu'il en est encore temps. Pour cela, il faut aussi prévoir des mesures de prévention active comme l'installation des détecteurs de fumées et de chaleur et les alarmes d'évacuation.
- Formation et entraînement : Des occupants bien entraînés à un risque d'incendie dans le bâtiment qu'ils occupent vont être beaucoup plus performants face au danger réel. Dans un environnement qui leur est familier, les gens vont traverser des fumées avec une visibilité de seulement 3 à 5m pour échapper à l'incendie alors que les personnes qui ne connaissent pas la disposition des lieux, n'essayeront de s'échapper que si la visibilité est d'au moins 15 à 20m. C'est pour cela que les itinéraires d'évacuation clairement signalés et le contrôle des fumées sont tout aussi importants que la formation du personnel.

2-2-6-3Eviter le développement et l'extension de l'incendie

- Sprinklers : Les sprinklers ne servent pas seulement à éteindre l'incendie et limiter l'extension du feu. Ils réduisent aussi la fumée, augmentent ainsi la sécurité des personnes et diminuent la température, limitant ainsi la destruction du contenu, les dégâts aux structures et les pertes d'exploitation.
- Détection de fumée et de chaleur : Les alarmes d'incendie permettent d'avertir précocement les occupants d'un bâtiment et portent au maximum la durée permettant l'évacuation. De plus, ils permettent une intervention rapide des services d'intervention et réduisent donc fortement la probabilité de propagation du feu et des pertes importantes.
- Murs mitoyens et façades : Pour éviter l'extension du feu à des bâtiments voisins ou contigus, les règlements prévoient des distances minimales d'implantation par rapport aux bâtiments voisins ou des exigences en termes de résistance au feu pour les façades et les murs mitoyens.
- Compartimentage : La division à l'intérieur des bâtiments par des écrans retenant le feu et la fumée est reconnue comme un des moyens les plus efficaces pour limiter les conséquences d'un incendie. La notion du compartimentage figure dans les documents nationaux. Ces obstacles verticaux ou horizontaux, en empêchant ou en ralentissant l'extension de l'incendie va permettre de limiter le plus possible le volume des zones présentant des risques particuliers pour les personnes et les biens.

- Ventilation : Evacuer fumées et chaleur dans l’atmosphère est préférable plutôt que de les retenir dans le bâtiment où elles peuvent mettre les occupants en danger et entraver l’action des pompiers. Le désenfumage, s’il est bien conçu, rend praticable les locaux en contact avec le feu et empêche la propagation du feu hors du volume sinistré. Une bonne ventilation maintient une visibilité suffisante, diminue la teneur en gaz toxiques, conserve un taux d’oxygène acceptable et évacue la chaleur produite par le foyer.

2-2-6-4 Eviter l’effondrement de la structure

- Protection passive : Dans la plupart des bâtiments, l’isolation de la structure pour éviter l’effondrement est le moyen le moins efficace pour réduire les pertes en vies humaines ou les pertes financières. Si dans un compartiment en flammes la température atteint un niveau tel que la structure risque de s’effondrer, les pertes en vies humaines et les pertes du contenu se seront déjà produites. Cette protection passive des structures ne convient que pour les bâtiments élevés où l’effondrement de la structure peut mettre en danger des bâtiments voisins.
- Conception de la structure : Les structures porteuses des bâtiments peuvent atteindre des niveaux de résistance au feu importants sans protection passive. La conception, le dimensionnement, les assemblages, les détails constructifs, etc... peuvent agir sur la résistance au feu de ces éléments. D’ailleurs aujourd’hui, la résistance au feu des éléments de structure peut être calculée à partir des Eurocodes spécifiques à chaque matériau (béton, acier, mixte acier-béton...).
- Ingénierie du feu : Des méthodes quantitatives d’évaluation des températures qui seront atteintes dans des incendies naturels sont maintenant au point. Ces techniques permettent de déterminer des exigences de résistance au feu plus précises que par les méthodes traditionnelles basées sur l’incendie normalisé. Cela permet en particulier au concepteur de déterminer avec une plus grande précision l’épaisseur de protection passive requise lorsqu’elle est nécessaire pour assurer la stabilité de la construction.

Nous venons de voir les différents moyens possibles pour atteindre les objectifs fondamentaux de la sécurité incendie. Parmi ces moyens nous pouvons faire la différence entre deux grandes catégories de la prévention contre l’incendie :

- **Prévention active contre l’incendie** : Les techniques actives permettent la détection d’une inflammation primaire et le déclenchement d’une réponse par la mise en action d’un dispositif manuel ou automatique. La plus répandue est celle de l’extinction automatique à eau. Il s’agit des sprinklers. Lorsque ce type d’installation n’est pas souhaitable, on peut utiliser des substances qui éteignent le feu par action chimique comme le gaz carbonique, qui étouffe le foyer d’incendie en diminuant la proportion d’oxygène. Pour déclencher ces systèmes d’extinctions, des détecteurs de chaleur et de fumées sont installés. Les appareils d’annonce d’incendie, les moyens d’extinction des incendies comme les extincteurs, les dévidoirs muraux, etc... sont autant de dispositifs de la prévention active qui nécessitent une intervention humaine.

- **Prévention passive contre l'incendie** : Les techniques passives utilisent des mesures de protection incendie incorporées ; elles ne nécessitent pas de déclenchement comme par exemple le compartimentage des bâtiments qui constitue un important moyen de protection incendie. Les revêtements protecteurs, les produits ignifuges, les conceptions des façades ne permettent pas le passage des flammes, l'inflammabilité des matériaux et le choix de l'emplacement des matières inflammables dans des locaux prévus pour sont autant de moyens entrant dans la classe de la prévention passive.

2-3 Bases de la dynamique du feu

L'incendie est la manifestation du processus chimique de combustion et se produit essentiellement en phase gazeuse. La combustion est une réaction exothermique où de l'énergie est libérée. La flamme est la région lumineuse à l'intérieur de laquelle l'oxydation a lieu telle que montrée sur la figure 2-4.

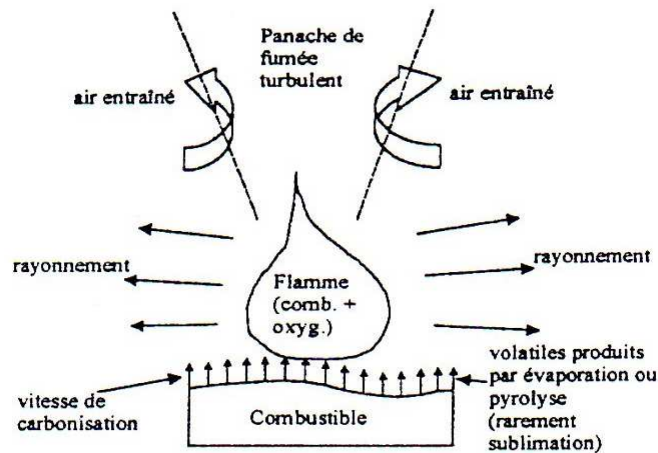


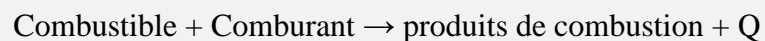
Figure 2-4 : Idéalisation la combustion

Les combustibles en phase liquide et solide doivent se volatiliser avant la combustion, ce qui requiert de l'énergie. La plupart des combustibles solides doivent être décomposés chimiquement : ils subissent la pyrolyse à l'exception de quelques rares solides qui subissent le phénomène de sublimation. Pour la plupart des combustibles liquides, il s'agit simplement d'une évaporation. Le processus est cependant complexe et demande une grande quantité d'énergie (températures de surface du combustible élevées).

2-3-1 Combustion et ses effets

2-3-1-1 Chimie du feu

La combustion est due à la réaction de 2 corps à savoir un combustible et un oxydant nommé comburant. Cette réaction ne peut avoir lieu qu'à partir d'une température bien définie variant d'un corps à l'autre. En résumé, le feu est une réaction d'oxydation rapide et exothermique qui peut s'écrire de manière tout à fait générale :



où Q est la quantité de chaleur produite par la réaction mettant en œuvre les trois éléments du triangle du feu qui sont indispensables à son éclosion et à sa continuité à savoir le combustible, le comburant et la source de chaleur. Chacun des 3 éléments est donc indispensable pour que se déclare un feu ; inversement si l'on peut supprimer un d'entre eux le risque disparaît.

- **Combustible** : c'est le produit qui va subir l'oxydation. Tous les corps susceptibles de s'unir avec l'oxygène sont dits 'combustibles'. De nombreux corps ont cette propriété mais tous ne brûlent pas aussi facilement et aussi vite les uns par rapport aux autres. Cela tient à leur structure et à leur état de division. Ainsi, une bûche de bois sera plus difficile à enflammer et brûlera moins vite que la même masse de copeaux de bois qui elle brûlera très rapidement en dégageant une forte chaleur. Généralement, une combustion est accompagnée d'un changement d'état pour les solides et les liquides. Des matériaux combustibles existent dans presque tous les bâtiments.
- **Comburant** : en pratique, il n'existe qu'un seul comburant : c'est l'oxygène. Mais cet oxygène peut se trouver soit à l'état pur, soit en mélange avec d'autres gaz, soit provenir de la décomposition de certains corps. Dans la plus grande partie des cas que nous rencontrons dans la vie courante, l'oxygène qui alimente la combustion se trouve dans l'air en mélange avec l'azote et d'autres gaz rares. L'air contient 21% d'oxygène et 78% d'azote. Il s'agit d'une composition moyenne. Si la teneur en oxygène est inférieure à 15 %, l'air ne peut plus être considéré comme comburant.
- **Source de chaleur- Energie d'activation** : ainsi que le rappelle le triangle du feu, la seule présence d'un combustible et d'un comburant n'est pas suffisante pour provoquer le phénomène de la combustion. Un apport d'énergie calorifique dite 'énergie d'activation' est nécessaire pour démarrer ce phénomène, qui s'entretiendra de lui-même par la suite, en raison de la quantité de chaleur (très supérieure à l'énergie d'activation nécessaire) que dégage cette réaction exothermique. Le combustible et le comburant étant naturellement présents dans les bâtiments, c'est donc la présence d'une source de chaleur qui est la cause même de la naissance d'un incendie.

2-3-1-2 Effets de la combustion

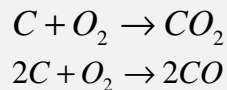
Un des effets de la combustion est évidemment le dégagement de chaleur et trop souvent on se contente de craindre les flammes. Or, deux autres conséquences d'un incendie ne sont pas à négliger : les gaz de combustion et les fumées.

- **Quantité de chaleur** : Il est évident que la quantité de chaleur dégagée lors d'un incendie est un danger non négligeable. Elle peut causer des brûlures aux occupants du bâtiment, voire entraîner leur mort. Les dégâts matériels du contenu ou de la structure proviennent eux aussi des conséquences de la chaleur d'un incendie. Pour déterminer la quantité de chaleur dégagée lors d'un incendie, on définit les deux termes suivants :
 - **Pouvoir calorifique** : le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1kg de ce combustible.
 - **Potentiel calorifique ou charge d'incendie** : le potentiel calorifique est déterminé par la quantité de matière combustible par unité de surface et par le pouvoir calorifique de ce combustible. Il s'exprime en kcal/m² ou kJ/ m². Par convention, on ramène cette mesure à la chaleur dégagée par 1kg de bois pour obtenir la charge d'incendie en kg de bois /m².

Notons qu'on pourrait penser que le potentiel calorifique reflète l'analyse d'un risque d'incendie. En fait, il n'en n'est rien, car il faut aussi tenir compte du temps que met le combustible à brûler, des effets de ventilation, le risque d'inflammabilité, etc...D'autant plus

qu'il est quasi impossible d'estimer la charge d'incendie dans un bâtiment, surtout quand celui-ci peut au cours de sa vie changer d'affectation et donc de contenu.

- **Les gaz de combustion** : la réaction chimique de la combustion met en combinaison deux corps, à savoir un combustible et l'oxygène. Ces combinaisons forment des gaz. Les plus connus sont les combinaisons du carbone avec l'oxygène de l'air qui donne le dioxyde de carbone ou l'oxyde de carbone suivant les deux équations stœchiométriques:

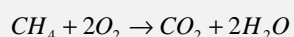


- Le premier n'est pas toxique car il n'engendre pas de réactions irréversibles dans l'organisme. Seulement, il est plus lourd que l'air et stationne donc dans les parties basses des locaux incendiés. Lors d'un incendie, on a tendance à ramper par terre pour éviter les fumées et on risque une asphyxie au CO₂. Le CO quant à lui est très toxique ; à 0.3% dans l'air il est mortel. Il s'agit donc d'un gaz très dangereux et le respirer a souvent des conséquences fatales.
 - A côté des concentrations élevées des gaz de combustion lors d'un incendie, notons qu'il y a aussi une diminution de la teneur en oxygène dans l'air très rapide. En effet, plus la quantité en oxydes de carbone est élevée, plus l'oxygène s'est lié avec le carbone lors de la réaction de combustion et plus la quantité en oxygène dans l'air est faible.
 - Quelques minutes suffisent dans le cas d'un feu mal ventilé pour réduire la concentration en oxygène à moins de 10 %, entraînant les victimes dans un état de syncope, sinon à la mort (O₂ ≤ 6 %).
- **Les fumées** : elles sont constituées par les trois états de la matière :
 - état solide (particules de solides imbrûlées, riche en carbone)
 - état liquide (aérosols et condensations divers, vapeurs d'eau...)
 - état gazeux (gaz de combustion, hydrocarbures...)

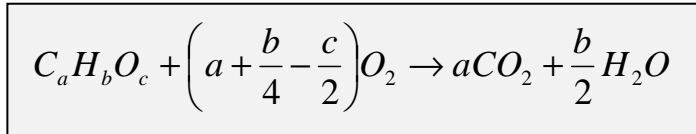
Les fumées présentent donc tous les dangers des gaz de combustion, mais en plus elles sont opaques à cause des particules dont elles sont chargées. L'opacité rend l'évacuation et l'intervention des services d'incendie difficiles. En plus, leur température est souvent très élevée. Elles peuvent donc être à l'origine de la propagation de l'incendie par transmission de la chaleur à distance. Pour diminuer ces risques, on cherche à évacuer les fumées soit de façon naturelle, soit de façon artificielle. C'est le but du désenfumage qui joue un rôle très important dans les constructions actuelles.

2-3-1-3- Equation stœchiométrique des fuels

Dans la plupart des cas, le fuel est un hydrocarbure. Lors d'une combustion complète, les principaux produits de la combustion sont CO₂ et H₂O. On considère la combustion stœchiométrique du méthane CH₄, pour laquelle l'air ambiant sec est caractérisé par (O₂ + 3.76 N₂). On a :



L'équation de combustion stœchiométrique généralisée pour les hydrocarbures peut être écrite comme suit :



Dans la plupart des incendies de compartiment, et spécialement dans les incendies à considérer dans le cas des structures, il n'y a, peu de temps après le développement de l'incendie, pas suffisamment d'oxygène disponible dans le compartiment pour permettre à la combustion d'être complète. Le manque d'oxygène conduit à la production de CO au lieu de CO₂.

2-3-2 Mécanismes et processus de développement d'un incendie

2-3-2-1 Panache de fumée et le ceiling jet

Les gaz chauds dans la flamme sont entourés des gaz plus froids dans le compartiment. La masse la plus chaude, moins dense s'élève alors par suite de la turbulence. Ce flux turbulent, incluant la zone de la flamme, s'appelle panache de fumée (plume). Lorsque l'air chaud s'élève, il entraîne l'air froid latéralement par diffusion. Ceci augmente la masse du panache, diminue la température et dilue les concentrations. Lorsque le panache s'élève, il heurte le plafond. A ce moment, il s'étale de manière radiale, circulaire, en un jet (courant) mu par la quantité de mouvement comme schématisé sur la figure 2-5. Il continue le long du plafond en entraînant de l'air jusqu'au moment où soit il heurte la paroi et continue son chemin vers le bas, soit il perd sa turbulence et sa quantité de mouvement suite au refroidissement du à l'air entraîné. Le 'Ceiling jet' est un phénomène important. C'est lui qui est à la base de l'activation des détecteurs conventionnels de fumée et de chaleur et des systèmes de sprinklage.

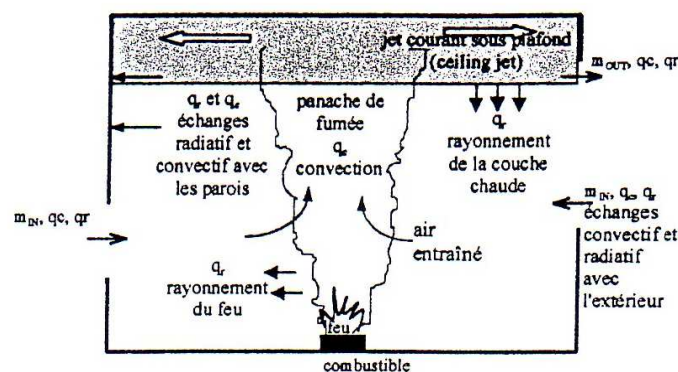


Figure 2-5: Représentation schématique d'un feu de compartiment montrant les transferts de masse et de chaleur [8]

2-3-2-2 Notion de couches supérieure et inférieure

En général, le local contient deux couches de gaz distinctes. La couche supérieure, chaude est composée des produits de la combustion et de l'air entraîné. Les propriétés des couches changent avec le temps, mais elles sont supposées constantes sur l'épaisseur d'une couche à chaque intervalle de temps, avec une interface distincte entre les deux. Les panaches continuent à entraîner de l'air et à transporter de la masse jusqu'à la couche supérieure. Il en résulte que la couche supérieure croît en volume et, au fil du temps, se rapproche du plancher. L'hypothèse de couches ou de zones est à la base des modèles de zone.

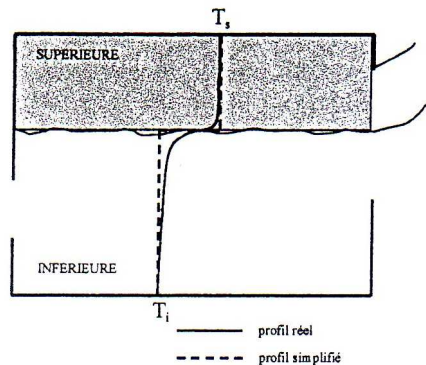


Figure 2-6 : Idéalisation en couches supérieure et inférieure [8]

Lorsque la couche supérieure descend elle est refroidie par l'air entraîné. Elle est aussi chauffée à un taux plus rapide à partir des produits de la combustion où des particules de suie (braises) transmettent de la chaleur par rayonnement vers les surfaces du compartiment, le combustible non brûlé et le feu lui-même ; ce qui accroît la vitesse de combustion. Il peut exister, au cours du développement de l'incendie, un moment où le rayonnement de la couche supérieure est suffisamment intense pour provoquer l'ignition de tout élément combustible dans le compartiment. C'est le phénomène du 'Flash over' ou de l'embrasement généralisé. Il correspond généralement à une température moyenne de la couche supérieure de 550-600 °C.

Au moment de l'embrasement généralisé, on constate un accroissement très rapide du dégagement de chaleur et des températures dans le compartiment. On aboutit alors à un incendie post-flash over, dans lequel les couches se mélangent. L'incendie post-flash over est aussi appelé de pleine intensité. Un incendie de pleine intensité peut continuer à se développer pendant plusieurs heures, en fonction de la quantité de matériaux combustibles, et, surtout, de l'air (oxygène) disponible pour la combustion.

2-3-2-3 Étapes du développement d'un incendie

Il y a en principe cinq étapes dans le développement d'un incendie comme indiqué dans la figure 2-7 soit l'ignition, le développement (ou propagation), le Flash over ou l'embrasement généralisé, la pleine intensité et la décroissance ou l'extinction. Notons que tous les incendies ne passent pas nécessairement par ces différentes phases; certains ne se développent pas jusqu'au Flash over, par manque d'oxygène ou de combustible.

Dans la phase de développement, l'incendie est dit contrôlé par le combustible car on peut supposer qu'il y a suffisamment d'oxygène disponible pour la combustion. Lors du flashover

et lorsque l'incendie se développe avec sa pleine intensité, il devient contrôlé par la ventilation, car il n'y a généralement pas suffisamment d'oxygène pour brûler tout le combustible disponible. Des fumées riches en combustible quittent alors le compartiment et s'enflamment à nouveau lorsqu'elles sont mélangées à l'oxygène à l'extérieur du local. Ce phénomène produit des flammes s'échappant par les fenêtres et les portes. Lors de la phase d'extinction ou de refroidissement caractérisée par la courbe descendante, l'incendie redevient contrôlé par le combustible.

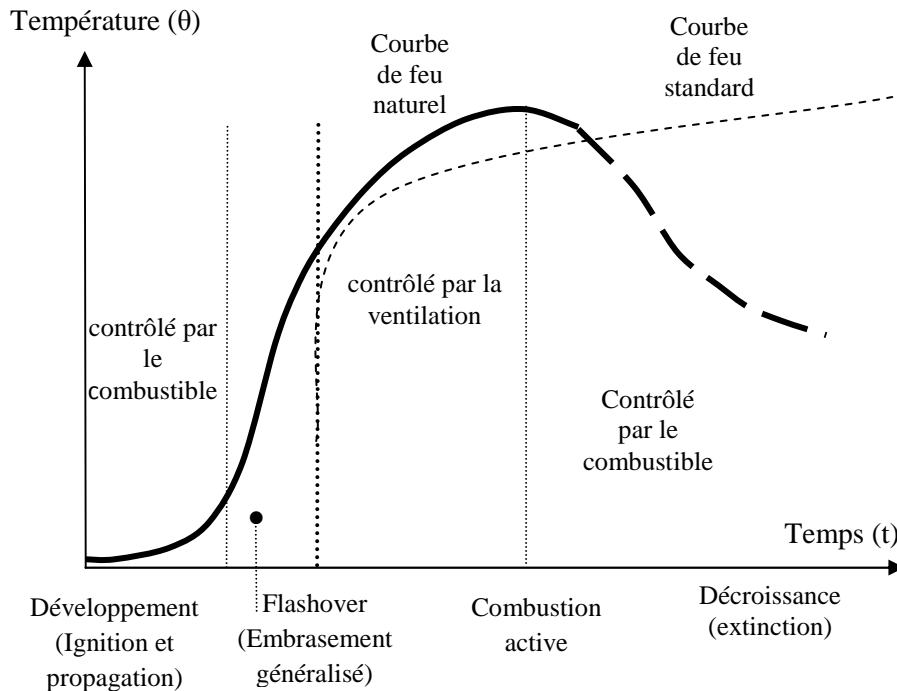


Figure 2-7 : Courbes de température-temps dans un incendie naturel

2-3-3 Principaux facteurs influençant l'évolution des températures dans un compartiment

Les principaux facteurs qui influencent l'évolution des températures dans un local ou compartiment incendié caractérisant la sévérité de l'incendie résultent de la charge d'incendie, de la ventilation, de la nature de parois et de l'interaction entre ces paramètres.

2-3-3-1 Charge incendie

La charge incendie ou charge calorifique est en relation avec la puissance destructrice d'un incendie éventuel et représente par définition l'énergie calorifique libérée lors de la combustion complète de la charge constituée par les matériaux combustibles, y compris ceux constituant les éléments de construction, contenus dans le local considéré, et rapportée à l'unité de surface de plancher. Elle s'exprime (en kJ/m^2) de la manière suivante :

$$B_t = \frac{\sum G_i P_{Ci}}{S} \quad (2-2a)$$

où S est la surface du plancher du local (en m^2), G_i = masse du matériau i (en kg) et P_{Ci} = potentiel calorifique du matériau (en kJ/kg).

Notons que pour des raisons historiques, la charge incendie est parfois encore remplacée par une charge équivalente de bois exprimée en kg bois/ m^2 , c'est-à-dire par une masse de bois, qui dégagerait la même quantité d'énergie, dans des conditions normalisées, que la masse des matériaux combustibles. Elle s'exprime comme suit :

$$B_{t,bois} = \frac{\sum G_i P_{Ci}}{S.P_{cr}} \quad (2-2b)$$

P_{cr} étant le potentiel calorifique du matériau bois de référence (= 1600 kJ/kg). En réalité, la valeur de la charge incendie 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. Elle doit aussi tenir compte de la répartition de ces matériaux dans le local, de l'importance de leur surface par rapport à leur masse et de leur aération. Elle s'exprime comme suit :

$$B_{tw} = K \times B_t \quad (2-2c)$$

où K est un coefficient qui varie entre 0.5 et 0.9, et est souvent voisin de 0.6.

Quand il s'agit d'une charge incendie industrielle, celle-ci s'exprime comme suit :

$$B_{ti} = \frac{\sum K_i G_i P_{Ci}}{S.h} \quad (2-2d)$$

où h = hauteur du local en m, B_{ti} = l'énergie calorifique libérée par unité de volume et s'exprime donc en kJ/m^3 . Pour la charge incendie industrielle, on fait souvent la distinction entre $B_{Bâtiment}$: charge attribuée au bâtiment lui-même (matériaux de construction) et $B_{production}$: charge incendie attribuée au processus de production industrielle

Cependant, le danger incendie ne peut pas être apprécié uniquement à partir de la charge incendie théorique. Les matériaux combustibles diffèrent entre eux par la facilité avec laquelle ils s'enflamment et par la vitesse à laquelle ils brûlent. La première caractéristique influence la fréquence avec laquelle les incendies apparaissent et la deuxième détermine la sévérité de l'incendie. Lorsque les autres paramètres restent constants, la durée d'incendie est à peu près proportionnelle à la charge incendie. Une augmentation de la charge incendie donne normalement lieu à un accroissement de la durée de l'incendie, mais influence beaucoup moins la valeur maximum de la température moyenne dans le local. La liaison entre la charge incendie et la sévérité d'un incendie est très importante à la lumière des exigences qui doivent être fixées pour les éléments de construction. Il y a cependant d'autres facteurs qui influencent fortement la sévérité d'un incendie.

2-3-3-2 Ventilation

La ventilation est un des éléments les plus importants qui influence fortement le développement d'un incendie. L'expérience montre que le débit de ventilation D (en kg d'air/s) est donné:

$$D = C^{te} \cdot \frac{A_v}{A_t} \sqrt{h} \quad (2-3)$$

où A_v : la surface des fenêtres en m^2 , A_t : la surface totale des parois du local ou du compartiment en m^2 et H : la hauteur des fenêtres en m. Le terme $\frac{A_v}{A_t} \sqrt{h}$ s'appelle facteur de ventilation et est exprimé en $m^{1/2}$. La formule est basée sur diverses hypothèses.

Plusieurs types d'incendie peuvent apparaître en fonction de la liaison ventilation-charge incendie où on distingue essentiellement deux régimes de combustion :

- Pour une charge incendie importante et une ventilation limitée, l'incendie est contrôlé ou conditionné par la ventilation. Dans ce cas, une augmentation de la ventilation provoque une élévation de la température dans le compartiment, une augmentation de la vitesse de combustion et une diminution de la durée d'incendie.
- Pour une charge incendie faible et une ventilation importante, l'incendie est contrôlé ou conditionné par le combustible, et plus particulièrement par ses caractéristiques de surface. Dans ce cas, une augmentation de la ventilation provoque une baisse de la température, mais n'influence que faiblement la vitesse de combustion et la durée d'incendie.

Les températures les plus élevées sont observées dans la zone de transition entre les deux régimes précédents, i.e. aux alentours du rapport stœchiométrique. Pour les autres cas (type 1 ou 2), les températures atteintes dans le local incendié sont moins élevées. La partie de l'énergie totale libérée, qui est disponible pour l'échauffement des éléments de construction, est fortement influencée par le facteur de ventilation. On peut envisager deux cas extrêmes :

- on considère un compartiment de grande taille avec une production d'énergie assez faible. On obtient une combustion complète à l'intérieur du compartiment. La production totale d'énergie est disponible pour l'échauffement des éléments de construction. Les températures restent cependant assez basses, vu la faible production d'énergie.
- on considère un compartiment de petite taille avec une ventilation assez importante. Une partie importante de la combustion a lieu à l'extérieur des fenêtres et la chaleur produite s'évacue vers l'extérieur. Une faible partie de l'énergie produite est disponible pour l'échauffement des éléments de construction.

Notons par ailleurs que des dispositifs spécifiques ou exutoires pour l'évacuation des fumées sont nécessaires (fig. 2-8). Leur activation se fait généralement d'une manière automatique par des détecteurs. On favorise ainsi l'apport en air, ce qui a tendance à renforcer l'incendie, mais ces dispositifs ont néanmoins un effet bénéfique pour les raisons suivantes :

- Ils permettent aux pompiers d'intervenir plus rapidement grâce à une meilleure visibilité ;

- Ils empêchent les fumées de s'étendre, ce qui entraîne moins de risques toxiques pour les personnes présentes et moins de dommages.

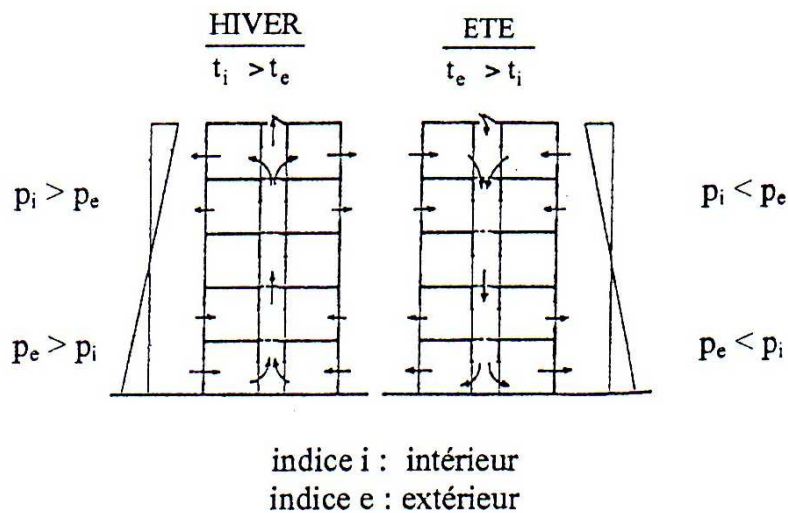


Figure 2-8 : Effet cheminée dans un bâtiment élevé avec cage d'escalier [8]

2-3-3-3 Caractéristiques thermiques des parois

Les caractéristiques thermiques des parois influencent le développement de l'incendie, mais dans une moindre mesure que la charge incendie et la ventilation. La chaleur qui est produite au début de l'incendie est en partie transportée vers l'extérieur par la ventilation et en partie absorbée par les planchers, les parois et le plafond. La température dans le local est déterminée par le bilan thermique entre production et transport de chaleur. Les paramètres déterminant constituants la perméance thermique sont respectivement la conductivité thermique λ (W/m. K), la masse volumique ρ (kg/m³) et la chaleur massique c (J/kg. K). On peut montrer que la quantité d'énergie qui s'écoule vers les parois s'accroît lorsque λ , ρ et c augmente. Il est aussi possible de montrer que le temps après lequel un accroissement déterminé de température est atteint, décroît lorsque λ , ρ , c diminue. Pour les parois et les murs isolants (λ petit, ρ petit), ceci signifie que les températures de surface dans le compartiment s'élèvent plus rapidement, et que moins de chaleur s'écoule vers les parois.

2-4 Actions thermiques- Modèles de représentation de l'incendie selon l'Eurocode 1

Il existe plusieurs façons de modéliser l'incendie à l'intérieur d'un bâtiment. Les modèles utilisés plus couramment sont revus ci-après, dans un ordre de complexité, soit :

- Courbes normalisées
- Modèle de temps équivalent
- Courbes paramétriques
- Modèles de zone
- Modèles CFD

2-4-1 Courbes normalisées

La façon la plus simple de représenter un incendie est d'utiliser une courbe nominale ou standard, soit une relation donnant l'évolution en fonction du temps de la température des gaz produits dans le compartiment soumis à l'action du feu. Historiquement, elles ont été développées pour tester expérimentalement les éléments de construction, en vue d'en établir un classement de la résistance au feu. Il était en effet hautement souhaitable que les éléments testés dans différents fours soient soumis à la même action thermique.

Pour ce qui est de la modélisation d'un incendie dans un bâtiment, ces courbes fournissent une représentation assez pauvre de la réalité. Cependant, pour des raisons historiques, elles continuent à être, et de loin, la représentation la plus souvent utilisée dans les applications pratiques. En plus de la courbe normalisée ISO834 correspondant à un scénario de feu conventionnel complètement développé, défini par l'équation logarithmique (équ. 2-1), l'Eurocode 1 [1] donne deux autres scénarios de feu normalisés suivant qui sont aussi fréquemment employés dans la pratique :

- Courbe de feu extérieur : elle est définie par l'équation :

$$\theta_g = 20 + 660(1 - 0.686e^{-32t} - 0.313e^{-3.8t}) \quad (2-4)$$

Ce scénario s'applique pour les murs ou éléments extérieurs coupe-feu i.e. ayant une fonction séparative où il convient de prendre en compte l'exposition au feu de l'intérieur soit à partir du compartiment en feu correspondant ou de l'extérieur soit à partir d'autres compartiments en feu adjacents. Soulignons que ce scénario de feu ne doit pas être utilisé pour les structures en acier vu qu'il existe un modèle spécifique pour ce genre de structure [12]. Nous pouvons aussi noter par ailleurs que les températures sont plafonnées à 20 + 660°C c'est-à-dire sont nettement inférieures comparativement aux températures données par la courbe normalisée.

- Courbe de feu hydrocarbure : elle est définie par l'équation :

$$\theta_g = 20 + 1080(1 - 0.325e^{-167t} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (2-5)$$

Les températures sont ici plafonnées à 20 + 1080 °C et qu'elles augmentent, notamment durant les premiers instants de chauffage, plus rapidement en comparaison à celles issues de la courbe normalisée ISO834. Ce scénario est utilisé pour représenter les effets de feu engendrés par les hydrocarbures dans les structures par exemple servant de stockage des produits pétroliers et dérivés qui rendent les incendies extrêmement sévères. Notons que dans chacune des deux équations précédentes, θ_g est la température, en °C, des gaz dans le compartiment ou au voisinage de l'élément considéré ; t étant le temps d'exposition au feu en minutes. Ces courbes nominales sont représentées à la figure 2-9 et elles ont toutes les caractéristiques suivantes :

- la température est uniforme dans le compartiment ;
- le seul paramètre dont elle dépend est le temps ;
- il n'y a pas de refroidissement i.e. de branche descendante.

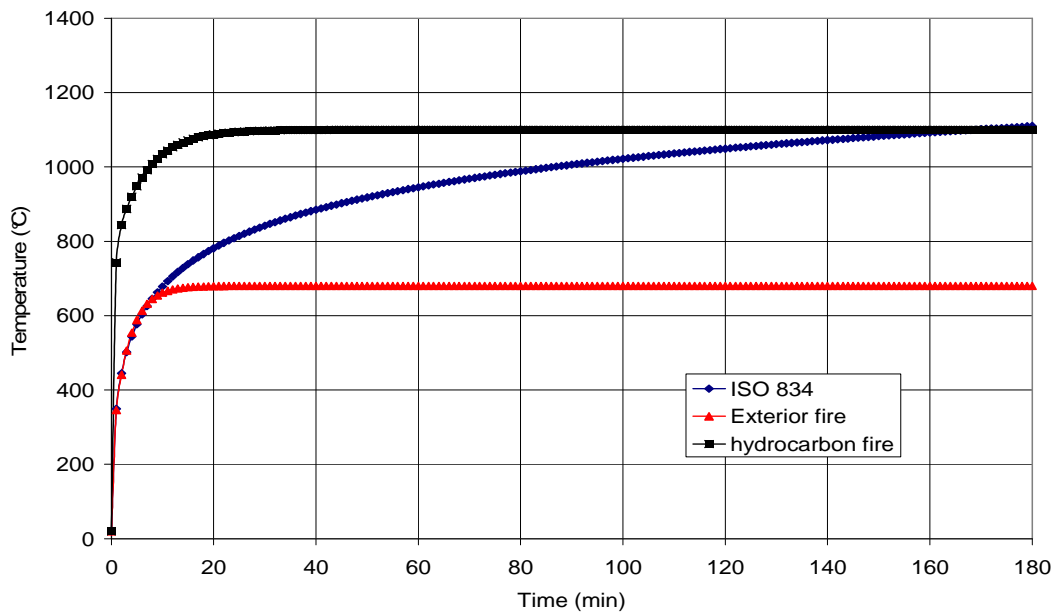


Figure 2-9 : Représentation des trois courbes nominales spécifiées dans l’Eurocode 1

2-4-2 Modèles de temps équivalent

L’annexe F de l’eurocode 1 contient une méthode donnant un temps équivalent d’exposition au feu qui ramène l’utilisateur à la courbe standard température-temps. Elle est basée sur trois paramètres représentant trois quantités physiques à savoir la densité de charge calorifique, le nombre et le type d’ouverture et les propriétés thermiques des parois du compartiment. Une équation assez simple, en fonction de ces trois paramètres, donne la durée d’une exposition au feu standard qui aurait le même effet sur la structure qu’un incendie réel se produisant dans des conditions appropriées (fig. 2-10). Cependant, les modèles de temps équivalents sont aujourd’hui considérés quelque peu dépassés [9] vu qu’il existe d’autres plus raffinées exposés ci-après permettant de mieux représenter les conditions de sévérité d’un incendie réel.

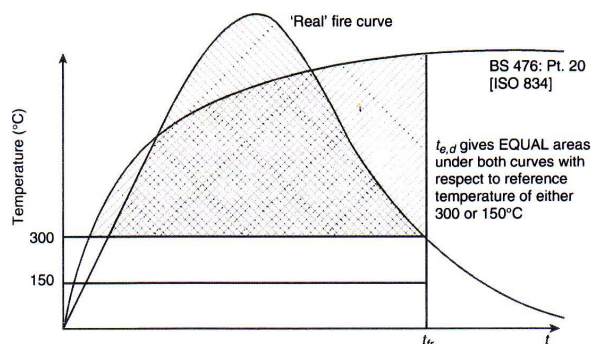


Figure 2-10 : Equivalence entre un incendie normalisé et un incendie réel [10]

2-4-3 Courbes paramétriques

Les premières recherches effectuées dans ce domaine ont été principalement menées, en Suède, par les chercheurs Petterson, Magnusson et Thor. Les travaux forment la base du rapport de l'institut Suédois de l'acier et de la construction [11].

2-4-3-1 Formulation de base

Le traitement théorique est basé sur une relation, qui à chaque instant, donne le bilan entre l'énergie calorifique produite et consommée par unité de temps dans le local incendié.

Cette équation de bilan calorifique s'écrit :

$$\dot{h}_c = \dot{h}_L + \dot{h}_W + \dot{h}_R + \dot{h}_B \quad (2-6a)$$

où \dot{h}_c : taux de quantité de chaleur libérée par la combustion, \dot{h}_W : taux de quantité de chaleur dissipée par convection suite au remplacement des gaz chauds par de l'air froid \dot{h}_L : taux de quantité de chaleur dissipée dans les parois, le plafond et les planchers, \dot{h}_R : taux de quantité de chaleur dissipée par radiation à travers les ouvertures du compartiment, \dot{h}_B : taux de quantité de chaleur accumulée dans le volume de gaz du compartiment par unité de temps ; terme généralement négligé.

Les différents termes de cette équation, définis ci-après, sont illustrés schématiquement sur la figure 2-11 et le calcul est basé sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La combustion est complète et a lieu exclusivement à l'intérieur du local incendié ;
- La température est uniformément distribuée dans tout le compartiment;
- Pour chacune des surfaces considérées, le coefficient de transmission calorifique est distribué uniformément ; le coefficient est défini par $b = \sqrt{\lambda \rho c}$ où λ est la conductivité thermique, ρ est la densité du matériau et c est la chaleur spécifique.
- Le flux de chaleur à travers les parois est unidirectionnel ;
- Le feu est allumé instantanément.

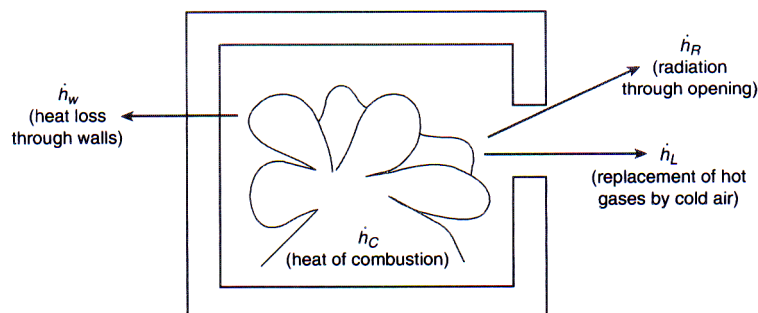


Figure 2-11 : Equilibre thermique dans un compartiment en feu

- Taux de quantité de chaleur libérée par la combustion (\dot{h}_c)

Le feu est supposé contrôlé par le combustible (feu contrôlé ↔ il y a suffisamment d'oxygène disponible pour la combustion) c'est-à-dire le taux de quantité de chaleur libérée sera proportionnelle au facteur de ventilation, soit :

$$\dot{h}_c = 0.09 A_v \sqrt{h} \Delta H_c \quad (2-6b)$$

où ΔH_c : est la chaleur de combustion du bois (= 18.8 MJ/kg). Au tableau 2-1, nous illustrons à titre indicatif les valeurs calorifiques pour les matériaux usuels rencontrés dans la pratique.

- Taux de quantité de chaleur dissipée par radiation (\dot{h}_R)

Ce terme est déterminé par la formule suivante en utilisant la loi de Stefan- Boltzman qui suppose négligeable les températures extérieures comparativement à celles des gaz produits à l'intérieur du compartiment :

$$\dot{h}_R = A_v \varepsilon_f \sigma \theta_g^4 \quad (2-6c)$$

où θ_g : est la température des gaz, σ est la constante de Stefan- Boltzman et ε_f est l'émissivité des gaz.

- Taux de quantité de chaleur dissipée par convection (\dot{h}_L)

$$\dot{h}_L = \dot{m}_F c_p (\theta_g - \theta_0) \quad (2-6d)$$

où \dot{m}_F est le taux du flux sortant des gaz, C_p est la chaleur spécifique des gaz et θ_0 est la température du milieu ambiant extérieur.

- Taux de quantité de chaleur dissipée dans les parois, plafond et planchers (\dot{h}_w)

Ce terme est dépendant des températures (θ_i) des gaz et de la surface interne du compartiment, de la conductivité thermique effective (λ_i) et du coefficient de transfert thermique (convection et rayonnement) des parois. Il est donné par la relation :

$$\dot{h}_w = \frac{(A_t - A_v)(\theta_g - \theta_i)}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\Delta x}{2\lambda_i}} \quad (2-6e)$$

où : Δx représente l'épaisseur de la couche utilisée afin de résoudre l'équation de l'équilibre thermique (2-6a). La résolution de l'équation de l'équilibre thermique (2-6a) permet de tracer des courbes en termes de l'évolution en fonction du temps des températures des gaz (θ_g) du

compartiment. A la figure 2-12, on montre quelques exemples de courbes température-temps obtenues pour différentes valeurs de la charge d'incendie q et du facteur de ventilation $\frac{A_v}{A_t} \sqrt{h}$.

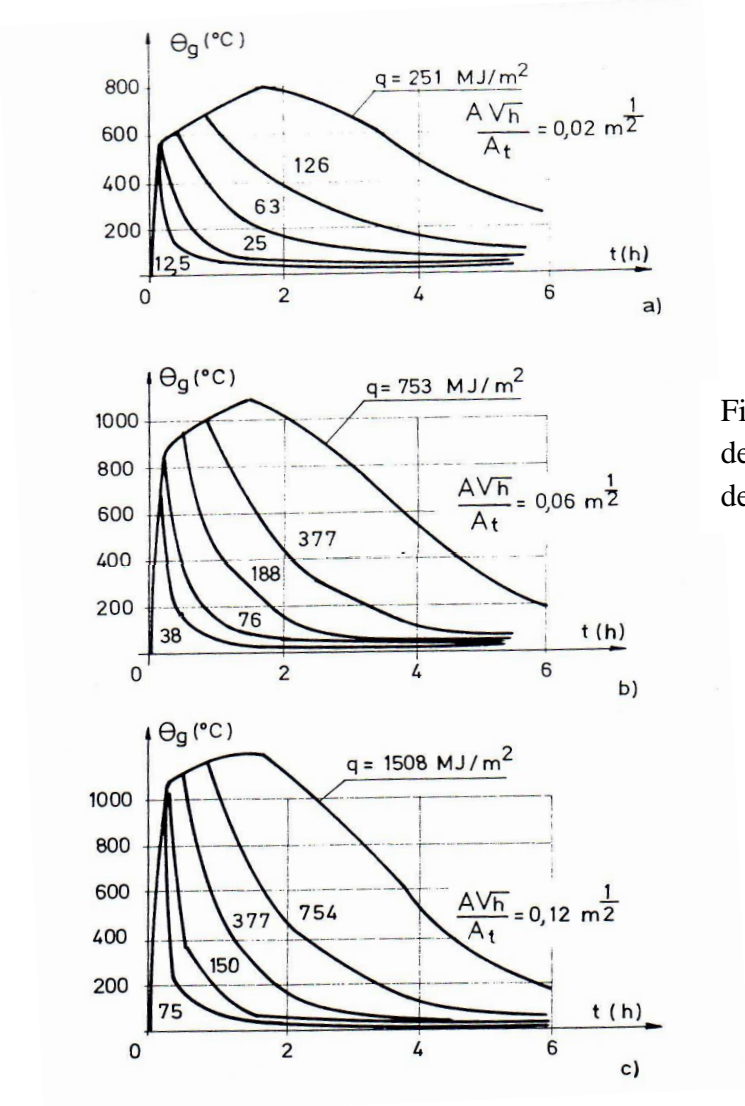


Figure 2-12 : Exemple de calcul des courbes température-temps des gaz de combustion [11]

Tableau 2-1 valeurs calorifiques de certains matériaux combustibles usuels

Matériaux	Valeurs de la charge calorifique (MJ/kg)
acétylène	48.2
alcool	27-33
cellulose	15-18
charbon	28-34
gasoil	43-44
grain (de céréale)	16-18
hydrogène	119.7
méthane	50
papier	13-21
polyéthylène	43-44
pvc	16-17
bois	17-20
laine	21-26
pneu en caoutchouc	31-33
paraffine	40-42
celluloïd	17-20

2-4-3-2 Approches par les équations paramétriques : EN1991-1-2

L'un des désavantages de la formulation de base de Petterson, Magnusson et Thor rapportée par Purkis [10] réside dans la présentation des résultats sous forme tabulaire ou graphique. Elle s'avère en fait peu compliquée dans des implémentations numériques par éléments finis afin de calculer la réponse thermique des éléments structuraux. Dans le but de palier à cette difficulté, plusieurs approches basées sur des équations empiriques ont été développées dont l'approche référencée dans l'EN1991-1-2 [1]. Historiquement, l'origine de cette approche remonte aux travaux effectués, en Suède, par Petterson, Magnusson et Thelandersson, et reformulée plus tard par Wickström [12] en proposant une relation température-temps complètement dépendante du facteur de ventilation sur l'inertie thermique. Elle est fondée essentiellement sur l'hypothèse selon laquelle la courbe normalisée d'un four d'essai standard (ISO834) peut être obtenue en considérant un facteur de ventilation de référence de valeur égale à $0.04 \text{ m}^{0.5}$ et une inertie thermique de référence de valeur $1160 \text{ W s/m}^2\text{K}$.

A- Etapes de calcul

Les équations permettant d'obtenir les courbes paramétrées température-temps des gaz (θ_g) dans le compartiment en feu sont données dans l'Annexe A de l'Eurocode 1 et s'expriment en fonction d'un paramètre temps t^* qui est en relation directe avec le temps réel t (en h). Elles sont en principe valables pour des compartiments ayant une surface de plancher inférieure à 500 m^2 , ne comportant pas d'ouvertures dans le toit et ayant une hauteur maximale ne dépassant pas 4m. Les mêmes équations sont données ci-après de façon un peu logique, i.e. dans l'ordre dans lequel elles doivent être utilisées. Les données d'entrées sont :

- Les propriétés thermiques du compartiment (murs, plafond et plancher) à savoir la conductivité thermique λ (W/m K), la chaleur spécifique c (J/kg K) et la densité ρ (kg/m³).
- Les quantités géométriques comme la surface totale (A_T en m²) des murs, du plafond et du plancher en incluant les ouvertures, de la surface totale des ouvertures verticales (A_v en m²) et de la moyenne pondérée des hauteurs des ouvertures de tous les murs (h_{eq} en m).
- La valeur de calcul de la densité de charge calorifique $q_{f,d}$ en MJ/m² rapportée à la surface A_f du compartiment ou bien égale à $q_{f,d} \frac{A_f}{A_t}$; $q_{f,d}$ étant la valeur de calcul de la densité de charge calorifique rapportée à la surface A_f du plancher (MJ/m²).
- Le taux de croissance du feu à savoir faible, moyen ou fort.

Les étapes successives de calcul sont :

- i) évaluer le coefficient des propriétés thermiques du compartiment b donné par la relation en J/m²s^{0.5}K:

$$b = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (2-7a)$$

Pour tenir compte des matériaux différents pour les murs, le plafond et le plancher, il convient d'introduire le coefficient b sous la forme :

$$b = \sum b_j A_{ij} / \sum A_{ij} \quad (2-7b)$$

où : A_{ij} : est la surface des parois de l'enceinte y compris les ouvertures, ayant la propriété thermique b_j .

- ii) évaluer le facteur d'ouverture O par la relation :

$$O = \frac{A_v}{A_t} \sqrt{h_{eq}} \quad (2-7c)$$

où : h_{eq} : est la moyenne pondérée des hauteurs des ouvertures ($\sum A_{vi} h_i / \sum A_{vi}$).

- iii) Evaluer le paramètre de l'échelle temps Γ donné par l'équation suivante :

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0.04}{1160}\right)^2} \quad (2-7d)$$

- iv) Déterminer la durée la plus courte possible (t_{lim} en heure) de la phase d'échauffement d'après le tableau 2-2 selon la nature du taux de croissance du feu.

v) Evaluer la durée de la phase d'échauffement ou de montée en température t_{\max} en h:

$$t_{\max} = \frac{0.2 \times 10^{-3} q_{t,d}}{O} \quad (2-8)$$

Tableau 2-2 Valeurs de t_{\lim} (selon le tableau E5, EN1991-1-2)

taux de croissance de l'incendie	Occupation	t_{\lim} (min)
faible	transport (espace public)	25
moyen	habitation ; hôpital (salle) ; hôtel	20

vi) Si $t_{\max} > t_{\lim}$ le feu sera contrôlé par la ventilation (i.e. feu contrôlé par la ventilation), dans ce cas, nous avons avec $t^* = \Gamma t$ (fig. 2-13a), t^* étant un temps modifié :

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{t^{*-1.7}} - 0.472e^{-19t^*}) \quad (2-9)$$

avec : θ_g température des gaz dans le local en °C et t : temps en h

La température dans la phase de refroidissement est donnée par les équations suivantes :

$$\theta_g = \theta_{\max} - 625(t^* - t_{\max}^*) \quad \text{pour } t_{\max}^* \leq 0.5 \quad (2-10a)$$

$$\theta_g = \theta_{\max} - 250(3 - t_{\max}^*)(t^* - t_{\max}^*) \quad \text{pour } 0.5 \leq t_{\max}^* < 2 \quad (2-10b)$$

$$\theta_g = \theta_{\max} - 250(t^* - t_{\max}^*) \quad \text{pour } t_{\max}^* \geq 2 \quad (2-10c)$$

où $t_{\max}^* = \Gamma t_{\max}$ et θ_{\max} est donnée par la relation (2-9) dans laquelle $t^* = t_{\max}^*$.

vii) Si $t_{\max} \leq t_{\lim}$ alors le feu sera contrôlé par le combustible (feu contrôlé par le combustible) et les étapes sont les suivantes (fig. 2-13b):

- évaluer le facteur modifié d'ouverture défini par la relation :

$$O_{\lim} = \frac{0.1 \times 10^{-3} q_{t,d}}{t_{\lim}} \quad (2-11)$$

avec : $q_{t,d}$ la charge au feu en MJ/m², rapportée à la surface totale des parois : sol, murs et plafond

- évaluer le paramètre modifié de l'échelle temps défini comme suit :

$$\Gamma_{\text{lim}} = \frac{\left(\frac{O_{\text{lim}}}{0.04}\right)^2}{\left(\frac{b}{1160}\right)^2} \quad (2-12)$$

Si $O > 0.04$ et $q_{t,d} < 75$ et $b < 1160$, il faudra multiplier Γ_{lim} de la relation 2-12 par un coefficient k défini par l'expression :

$$k = 1 + \left(\frac{O - 0.04}{0.04}\right) \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75}\right) \left(\frac{1160 - b}{1160}\right) \quad (2-13)$$

La température durant la phase d'échauffement ou de montée en température i.e. jusqu'à $t = t_{\text{lim}}$, est donnée par la relation (2-9) dans laquelle $t^* = \Gamma_{\text{lim}} t_{\text{lim}}$. La température durant la phase de refroidissement est donnée par les équations suivantes :

$$\theta_g = \theta_{\text{max}} - 625(t^* - t_{\text{lim}}^*) \quad \text{pour } t_{\text{max}}^* \leq 0.5 \quad (2-14a)$$

$$\theta_g = \theta_{\text{max}} - 250(3 - t_{\text{max}}^*)(t^* - t_{\text{lim}}^*) \quad \text{pour } 0.5 \leq t_{\text{max}}^* < 2.0 \quad (2-14b)$$

$$\theta_g = \theta_{\text{max}} - 250(t^* - t_{\text{lim}}^*) \quad \text{pour } t_{\text{max}}^* > 2.0 \quad (2-14c)$$

avec : θ_{max} température des gaz au temps modifié t_{max}^* où : $t_{\text{lim}}^* = \Gamma t_{\text{lim}}$ et $t_{\text{max}}^* = \Gamma t_{\text{max}}$; t_{max} étant donné par la relation (2-8).

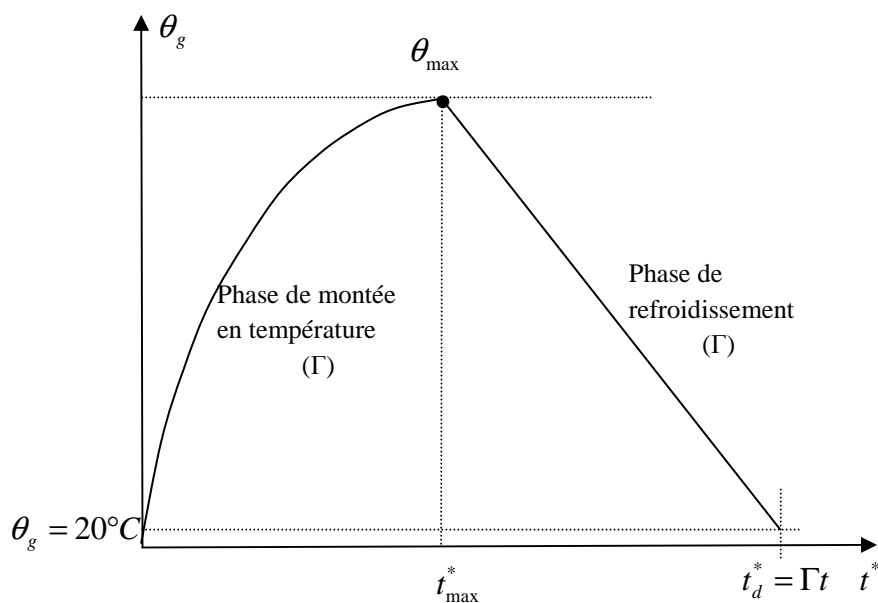


Figure 2-13a : Courbe paramétrique de l'EN1991-1-2 (feu contrôlé par la ventilation)

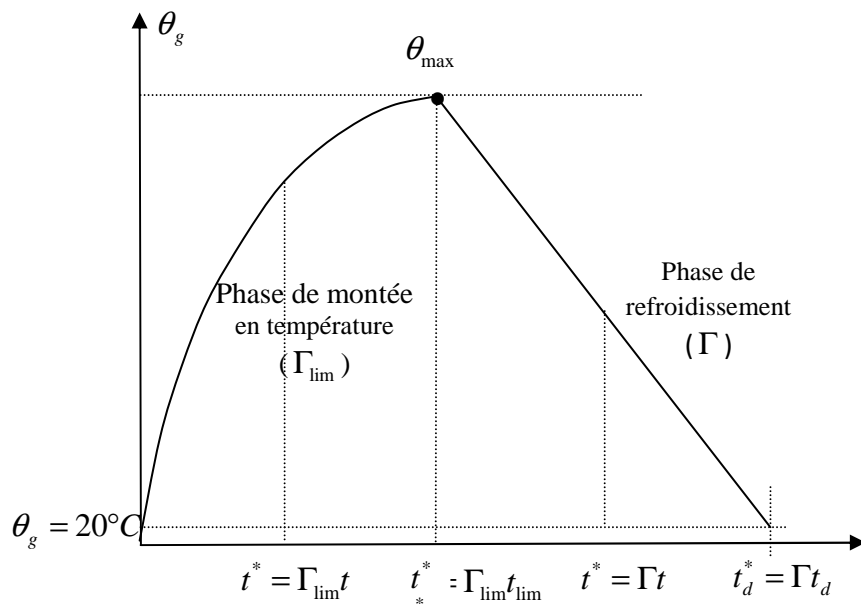


Figure 2-13b : Courbe paramétrique de l'EN1991-1-2 (feu contrôlé par le combustible)

Les relations (2-10) et (2-14) peuvent être obtenues de la façon suivante en considérant l'une des figures 2-14 selon que le feu est contrôlé par la ventilation ou par le combustible.

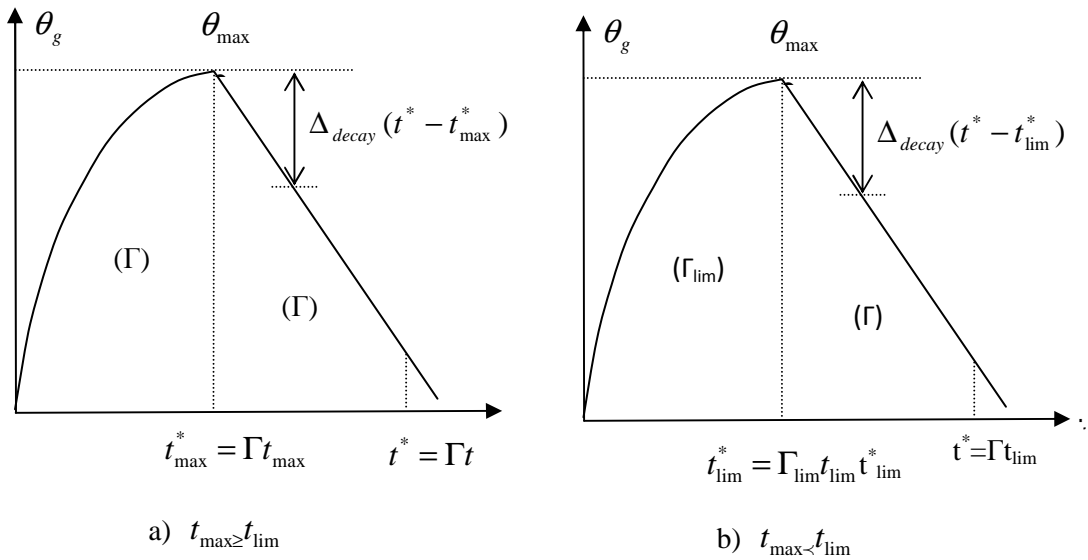


Figure 2-14 : Interprétation des relations décrivant la courbe descendante

$$\theta_g = \theta_{\max} - \Delta_{decay} (t^* - t_{\max}^*) \quad \text{si } t_{\max} > t_{\lim} \quad (2-15c)$$

$$\theta_g = \theta_{\max} - \Delta_{decay} (t^* - t_{\lim}^*) \quad \text{si } t_{\max} \leq t_{\lim} \quad (2-15d)$$

où Δ_{decay} représente la pente de la branche descendante (fig. 2-15) que l'Eurocode définit de la manière suivante :

$$\Delta_{decay} = 625 \quad \text{si } t_{\max}^* \leq 0.5h \quad (2-15e)$$

$$\Delta_{decay} = 250(3 - t_{\max}^*) \quad 0.5h < t_{\max}^* < 2.0h \quad (2-15f)$$

$$\Delta_{decay} = 250 \quad \text{si } t_{\max}^* \geq 2.0h \quad (2-15e)$$

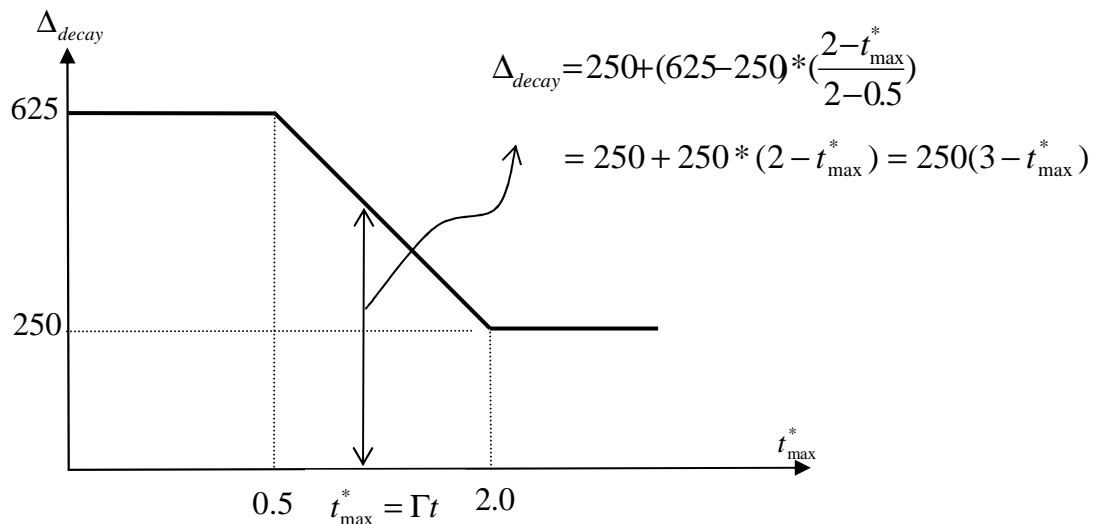


Figure 2-15 : détermination de la pente de la branche descendante

Remarques:

- Le concept de la durée minimale du temps de la phase d'échauffement, t_{\lim} , et du coefficient k ont été introduit par Franssen [13]. Le temps t_{\lim} marque la transition d'un feu contrôlé par le combustible à une situation de feu contrôlé par l'air. Le coefficient k est introduit pour tenir compte des effets de grandes ouvertures.
- Des valeurs différentes sont attribuées au coefficient des équations (2-9) et (2-12) à savoir 0.002 et 0.001 contrairement à la valeur unique de 0.0013 contenue dans la prénorme ENV 1991-2-2 [14].
- l'EN1991-1-2 [1] préconise de respecter les limites d'application des équations (2-9) à (2-14). Ces limites sont les suivantes : $0.02 \leq O \leq 0.20 \text{ (m}^{0.5}\text{)}$; $50 \leq q_{t,d} \leq 1000 \text{ (MJ/m}^2\text{)}$; $1000 \leq b \leq 2200 \text{ (J/m}^2\text{s}^{0.5}\text{K)}$.

B- Illustration des exemples d'application

Exemple 1 : Cas d'un feu contrôlé par la ventilation

Soit un compartiment en feu (fig. 2.16a) de forme rectangulaire en plan ayant les dimensions 3x6m et la distance du plancher au plafond est de 2.5 m. La densité de charge calorifique par m² de plancher est de 750 MJ/m² (= q_{f,d}) et la croissance du feu est supposée de type moyen. Les éléments du compartiment sont faits en béton normal (c = 1100 J/kgK, ρ = 2300 kg/m³, λ = 1.2 W/mK). Une fenêtre de 2 m de large et de 1m de hauteur, et une porte de 1 m de large et de 2.1 m de hauteur sont ouvertes dans les murs. On propose de représenter la courbe température-temps selon le modèle de l'Eurocode 1.

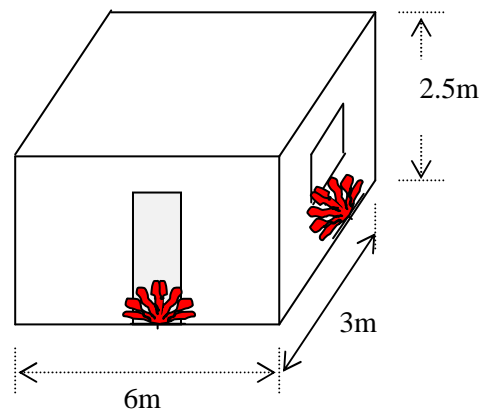


Figure 2-16a : Compartiment en feu

- facteur des murs : $b = (1100 \times 2300 \times 1.2)^{0.5} = 1742 \text{ J/m}^2 \text{ s}^{0.5} \text{ } ^\circ\text{K}$
- Surface totale des éléments du plancher : $A_t = 2(3 \times 6 + 3 \times 2.5 + 6 \times 2.5) = 81 \text{ m}^2$
- hauteur moyenne pondérée des ouvertures : $h_{\text{eq}} = (2 \times 1 + 2.1 \times 2.1) / 4.1 = 1.56 \text{ m}$
- Surface du plancher : $A_f = 3 \times 6 = 18 \text{ m}^2$
- Surface totale des ouvertures : $A_v = 2 \times 1 + 1 \times 2.1 = 4.1 \text{ m}^2$
- facteur d'ouverture : $O = 4.1 \sqrt{1.56} / 81 = 0.0633 \text{ m}^{0.5}$
- Facteur temps, $\Gamma = (0.0633 / 0.04)^2 / (1742 / 1160)^2 = 1.11$
- Densité de charge calorifique: $q_{t,d} = 750 \times 18 / 81 = 167 \text{ MJ/m}^2$
- Plus petite durée possible de la phase d'échauffement : $t_{\text{lim}} = 5 / 12 = 0.417 \text{ h} (= 25 \text{ min})$
- Durée de la phase d'échauffement: $t_{\text{max}} = 0.2 \times 10^{-3} \times 167 / 0.0633 = 0.528 \text{ h} (= 31 \text{ min } 41 \text{ s})$

Le feu est donc contrôlé par la ventilation du fait que $t_{\text{lim}} < t_{\text{max}}$. Les températures de la phase d'échauffement peuvent être dans ce cas calculées à l'aide de l'équation (2-9). Par exemple :

- Au temps $t = 30 \text{ min}$, i.e. $t = 0.5 \text{ h}$, $t^* = 1.11 \times 0.5 = 0.555$, $\theta_g = 856 \text{ } ^\circ\text{C}$.
- Au temps $t = t_{\text{max}}$, $t^*_{\text{max}} = 1.11 \times 0.528 = 0.586$, $\theta_g = 863 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Les températures de la phase de refroidissement peuvent être dans ce cas calculées à l'aide de l'équation (2-10). Par exemple:

- Au temps $t = 1.0$ h, $t^* = 1.11$: $\theta_g = 863 - 250(3-0.586)(1.11-0.586) = 547$ °C car $0.5 < t_{\max}^* < 2$
- Au temps $t = 1.787$ h, $t^* = 1.984$:
 $\theta_g = 863 - 250(3-0.586)(1.984-0.586) = 20$ °C car $0.5 < t_{\max}^* < 2$

Ainsi, La courbe température-temps est représentée complètement sur la figure 2-17 où le temps de refroidissement t_d est de 107 minutes.

Exemple 2 : Cas d'un feu contrôlée par la combustion

Reprenons l'exercice précédent mais en portant maintenant la largeur de la fenêtre à 3.4 m ; tous les autres paramètres restent inchangés.

les facteurs modifiés seront alors les suivants:

- Surface totale des ouvertures : $A_v = 3.4 \times 1 + 1 \times 2.1 = 5.5$ m²
- hauteur pondérée des ouvertures : $h_{eq} = (3.4 \text{ m}^2 \times 1 \text{ m} + 2.1 \text{ m}^2 \times 2.1 \text{ m}) / 4.1 = 1.42$ m
- facteur d'ouverture : $O = 5.5 \sqrt{1.42} / 81 = 0.0809$ m^{0.5}
- Facteur temps, $\Gamma = (0.0809/0.04)^{0.5} / (1742/1160)^{0.5} = 1.814$
- Durée de la phase d'échauffement, t_{\max} :
 $t_{\max} = 0.2 \times 10^{-3} \times 167 / 0.0809 = 0.413$ h (= 24 min 46s); $t_{\max}^* = 1.814 \times 0.413 = 0.749$

Le feu sera alors contrôlé par le combustible puisque $t_{\max} \leq t_{lim}$.

- facteur d'ouverture modifié, $O_{lim} = 0.1 \times 10^{-3} \times 167 / 0.417 = 0.04005$
- Facteur temps modifié, $\Gamma_{lim} = (0.04005/0.04)^{0.5} / (1742/1160)^{0.5} = 0.444$

Les températures de la phase d'échauffement peuvent être dans ce cas calculées toujours à l'aide de l'équation (2-9) mais dans laquelle $t^* = t \Gamma_{lim}$. Par exemple :

- Au temps $t = 20$ min, i.e. $t = 0.333$ h, $t^* = 0.444 \times 0.333 = 0.148$, $\theta_g = 680$ °C.
- Au temps $t = t_{lim}$, i.e. $t^* = 0.444 \times 0.417 = 0.185$, $\theta_g = 715$ °C.

Les températures durant la phase de refroidissement peuvent être dans ce cas calculées à l'aide des équations (2-14). Par exemple :

- Au temps $t = 1.0$ h, $t^* = 1.814 \times 1.0 = 1.814$
 $\theta_g = 715 - 250(3-0.749)(1.814-1.814 \times 0.417) = 120$ °C vu que $0.5 \leq t_{\max}^* < 2.0$
- Au temps $t = 1.1$ h, $t^* = 1.814 \times 1.10 = 1.991$
 $\theta_g = 715 - 250(3-0.749)(1.991-1.814 \times 0.417) = 20$ °C vu que $0.5 \leq t_{\max}^* < 2.0$

La courbe température-temps, en comparaison au cas contrôlé par la ventilation, est représentée sur la même figure 2-16b où le temps de refroidissement t_d est de 66 min.

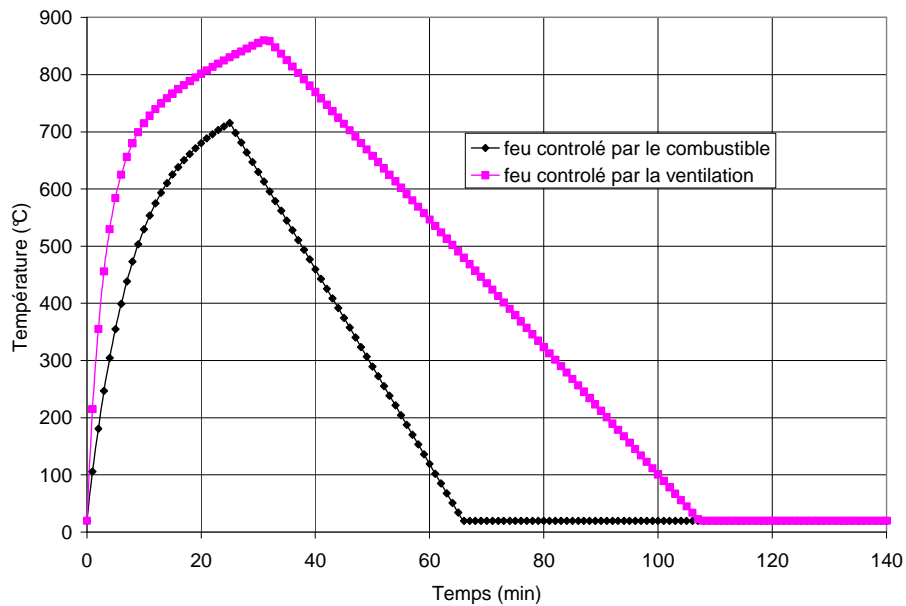
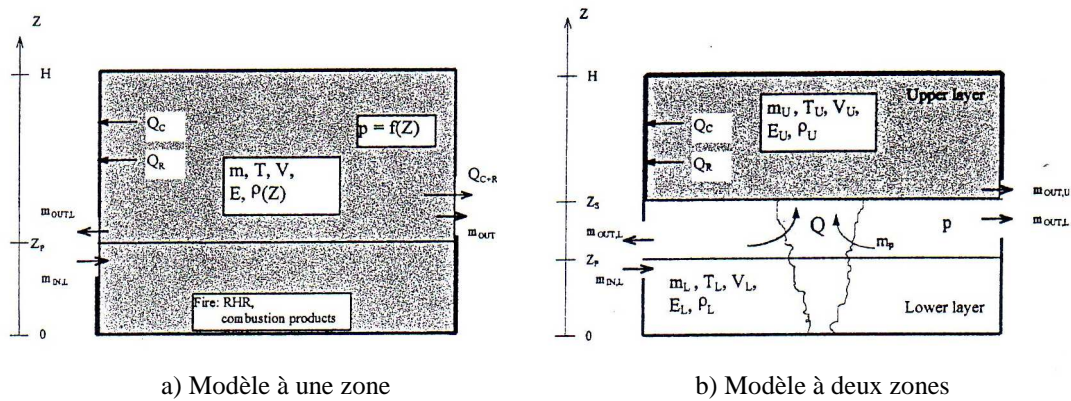


Figure 2-16b : Courbe température-temps selon le modèle de l’Eurocode 1

2-4-4 Modèles de zone et modèles CFD

Comme déjà mentionné dans le paragraphe sur la dynamique du feu, l’hypothèse de couche ou zone (supérieure et inférieure) constitue la base des modèles de zone. L’épaisseur de la couche inférieure, qui reste à température assez basse et ne contient pas de produits de combustion, est très importante pour apprécier les conditions de survie des occupants dans le compartiment.

Le modèle à une zone (one-zone model) est basé sur l’hypothèse selon laquelle les températures des gaz sont particulièrement homogènes dans tout le compartiment (Fig.2-17a). C’est par exemple le cas si l’épaisseur de la couche supérieure s’accroît tellement que celle-ci remplit à peu près tout le compartiment. Un autre cas est celui pour lequel la température de la couche supérieure est suffisamment élevée pour conduire au flash over dans l’ensemble du compartiment, ce qui détruit la notion stratification en couche et qui peut donc produire une situation plus proche de l’hypothèse d’un modèle à une zone. Il y a lieu cependant de vérifier constamment au cours du processus de l’hypothèse d’une stratification en deux zones. La modélisation d’un compartiment en deux zones (two-zone model) est représentée à la figure 2-17b. L’application de tels modèles nécessite l’utilisation des moyens numériques sophistiqués sur ordinateur comme le code OZONE développé à l’université de Liège [15]. Ces types de modèles offrent la possibilité d’analyser des bâtiments plus complexes (fig. 2-18), où le compartiment d’origine échange de la masse et de l’énergie avec l’environnement extérieur, mais aussi avec d’autres compartiments dans le building.



a) Modèle à une zone

b) Modèle à deux zones

Figure 2-17 : Compartiment dans un modèle à une zone [8]

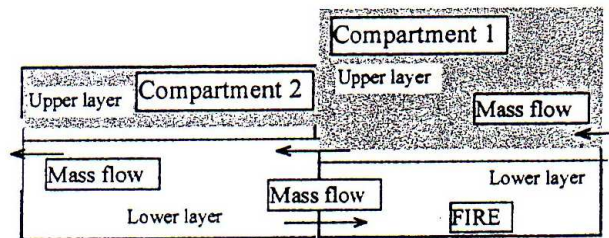


Figure 2-18 : Configuration multi-compartiments avec modèle à deux zones

Il existe aussi d'autres modèles encore plus avancés dits CFD (Computational Fluid dynamics : Méthodes Avancées en Dynamique des fluides) qui analyse des systèmes complexes en se basant sur les équations de la mécanique des fluides, des transferts de chaleur et les autres phénomènes associés. Les équations fondamentales ainsi obtenues constituent une représentation mathématique des lois de conservation de la physique. Dans ces modèles, les équations différentielles de la thermodynamique et de l'aérodynamique sont résolues en un très grand nombre de points du compartiment. Dans beaucoup de modèles, les équations de base sont exprimées en moyenne sur un certain intervalle de temps, ce qui permet d'éviter différents problèmes d'instabilité numériques.

2-5 Mécanismes de transfert de chaleur

Les mécanismes de développement et de propagation d'un incendie sont étroitement liés aux problèmes de combustion, mais aussi aux transferts de chaleur qui se produisent par conduction, convection et rayonnement entre le feu et son environnement. Il est donc important, quand on veut aborder le problème de la sécurité des constructions face à l'incendie, de bien connaître les lois fondamentales qui régissent ces trois modes de transmission, afin d'évaluer l'échauffement produit par le feu sur les éléments de la structure proche ou éloignée.

2-5-1 Problèmes liés aux mécanismes de transferts de chaleur

Afin de mieux comprendre les différents problèmes liés aux mécanismes de transferts de chaleur, considérons de nouveau un compartiment tel qu'il a été défini précédemment, présentant une ouverture par laquelle pénètre l'air frais (fig. 2-19) et examinons comment se pose le problème de transfert de chaleur.

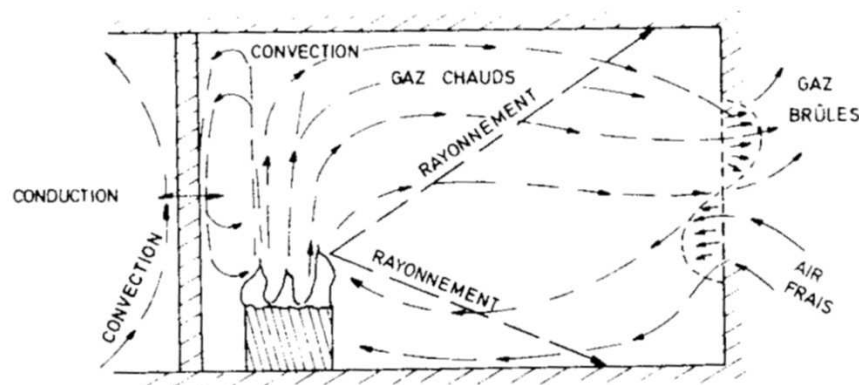


Figure 2-19 : Schématisation des transferts de chaleur dans un local incendié

A l'origine, l'incendie a souvent un caractère localisé : une colonne convective s'établit au-dessus du lit du combustible, atteint le plafond du local et sort par la partie supérieure de l'ouverture, alors que l'air frais pénètre par la partie inférieure. Un écoulement d'air s'établit par l'ouverture, la mise en mouvement étant provoqué par la combustion (convection naturelle). Les échanges de chaleur se produisent par convection sur les parois verticales et horizontales, par rayonnement de la flamme et des fumées vers les éléments directement visibles, et par conduction au sein des parois et dans le combustible non brûlé.

Les problèmes à envisager sont de différentes natures :

- Des problèmes de combustion et de problèmes de thermocinétiques, c'est-à-dire de mécanique des fluides et de thermique liés à l'écoulement gazeux que provoque le feu, l'écoulement de l'air frais et surtout, à cause des risques d'asphyxie, celui des gaz brûlés et des fumées ; ceux-ci ont été examinés amplement dans les paragraphes précédents.
- Des problèmes de transfert thermique qui constituent de déterminer la température dans les parois. En effet, il est nécessaire de savoir si une paroi n'a pas atteint une température critique au-delà de laquelle il y a risque d'auto-inflammation, de dégagement de gaz toxique, de ramollissement voir de fusion s'il s'agit de produits

plastiques. Dans le cas d'une structure portante, il est nécessaire d'évaluer la pénétration de la chaleur à l'intérieur de l'élément.

Dans les sections subséquentes, nous allons passer en revue les notions fondamentales concernant les transferts de chaleur par rayonnement, convection et conduction en indiquant quelques résultats particuliers directement applicables aux problèmes de propagation des incendies dans les structures.

2-5-2 Transfert de chaleur par rayonnement

Dans ce processus qui joue un rôle important dans la propagation du feu, la chaleur à la surface d'un corps, est transformé selon les lois de la thermodynamique en rayonnement thermique. Des modèles servent à représenter la propagation et les effets de ce rayonnement : l'aspect ondulatoire, qui assimile à un rayonnement électromagnétique, et l'aspect quantique, qui en fait un faisceau de photons. Le rayonnement thermique est analogue à la lumière visible, mais de longueur d'onde supérieure (infrarouge). Lorsqu'il tombe à la surface d'un autre milieu, il est en partie réfléchi, en partie transmis si le milieu est partiellement transparent, et en partie absorbé c'est-à-dire dégradé en chaleur. Le résultat équivaut à un transfert de chaleur d'un corps à l'autre. Ce qui se propage n'est cependant pas de la chaleur, mais du rayonnement.

Le phénomène de transformation de chaleur en rayonnement est l'émission, tandis que le phénomène de transformation du rayonnement en chaleur est l'absorption. Ces deux phénomènes sont indépendants l'un de l'autre. La différence entre les énergies quittant la surface d'un corps et y arrivant, donne la chaleur cédée. Le calcul des transferts de chaleur par rayonnement se ramène toujours à ce bilan. Pour l'effectuer, il faut pouvoir caractériser ces phénomènes.

Le flux d'énergie émis dans toutes les directions (émission hémisphérique) est caractérisé par l'émittance énergétique M . Les lois qui régissent, pour un corps quelconque, la variation de M avec la température sont complexes. On les détermine par référence à celles bien connues d'un corps idéal, dit absorbant parfait, ou corps noir. Ce corps a une émission diffuse et absorbe intégralement toutes les radiations qu'il reçoit. De plus, il a la propriété d'émettre, pour une température donnée, le plus d'énergie. La loi de Stefan-Boltzmann détermine l'énergie émise par le corps noir dans tout le spectre à une température donnée. Elle s'écrit :

$$M = \sigma_0 T_k^4 \quad (2-16)$$

σ_0 : constante de Stefan-Boltzmann = $5.68 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ et T_k : température absolue

L'énergie croît donc comme la puissance quatrième de la température. Ceci explique la prédominance, à température élevée, des échanges de chaleur par rayonnement sur les échanges par convection ou par conduction. Les corps non noirs émettent, à une température donnée, moins d'énergie que les corps noirs. On écrit que leur émission est égale à celle du corps noir à la même température T_k multipliée par un facteur qu'on appelle facteur $\varepsilon < 1$, qu'on appelle facteur d'émission. Le calcul des échanges de chaleur entre corps noirs est complexe et ne peut être effectué de manière analytique que pour des conditions géométriques relativement simples. Dans le cas particulier de deux plans parallèles infinis situés à des températures T_{k1} et T_{k2} , on peut montrer que le flux de chaleur échangé est donné par :

$$q_m = \sigma_0 (T_{K1}^4 - T_{K2}^4) \quad (2-17)$$

Dans le cas de surfaces non noires, les calculs deviennent très complexes, voire impossibles. Cependant, s'il s'agit de surfaces opaques grises à réflexion diffuse, il est encore possible de faire les calculs. Le corps gris est un corps dont le facteur d'émission est inférieur à l'unité, mais constant pour toutes les longueurs d'onde. Il constitue un échelon intermédiaire entre le corps noir et le corps coloré qui sont caractérisés par une absorption sélective dépendant de la longueur d'onde. Cette hypothèse du corps gris à émission diffuse est souvent faite pour les matériaux non conducteurs de l'électricité, mais elle ne s'applique pas aux métaux polis. Si on appelle ε_1 et ε_2 les facteurs d'émission relatifs aux surfaces 1 et 2, la relation (2-17) devient dans le cas d'un corps gris :

$$q_{rg} = \varepsilon_{12} \sigma_0 (T_{K1}^4 - T_{K2}^4) \quad (2-18)$$

où ε_{12} est un coefficient de rayonnement réciproque défini par :

$$1/\varepsilon_{12} = 1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1 \quad (2-19)$$

On voit que, dans le cas particulier de corps noir ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$), $\varepsilon_{12} = 1$, et on retrouve la relation établie dans ce cas. Le caractère simple est commode de la relation (2-24) a conduit à l'utilisation d'une formule du même type pour déterminer le flux de chaleur absorbé par une paroi à la température T_{kp} , lorsque les conditions géométriques sont beaucoup plus complexes. Dans ce cas, les autres surfaces entourant l'élément et les flammes sont désignées sous le terme global « environnement » dont la température de référence vaut T_{ke} est prise égal à la température des gaz dans le local (par exemple la courbe ISO ou paramétrique).

On définit alors l'échange par la formulation approchée suivante :

$$q_r = \varepsilon_{ep} \sigma_0 (T_{Ke}^4 - T_{Kp}^4) \quad (2-20)$$

où ε_{ep} est un facteur conventionnel représentant l'émissivité relative globale entre l'environnement et la paroi. Ce facteur ne peut évidemment, dans ce cas, être déterminé que de manière semi-empirique.

2-5-3 Transfert de chaleur par convection

Le phénomène de transfert de chaleur par convection apparaît lorsque les particules constitutives du milieu sont libres de se mouvoir (liquides et gaz). Elles emportent avec elles la chaleur qu'elles ont reçue, soit au contact des parties fixes plus chaudes, soit encore en leur sein même, par suite d'une dissipation interne (réaction chimique). Lorsque le mouvement du fluide est due à une action mécanique extérieur (pompe, ventilateur, ...), on dit que la convection est forcée. Lorsque se sont les effets thermiques eux même qui mettent en mouvement le fluide, on dit que la convection est naturelle ou libre. Ce mouvement est provoqué par une différence de masse volumique entre particules fluides chaudes ou froides.

Dans la plupart des problèmes de propagation du feu au sein de locaux plus ou moins clos, ces deux types de convection peuvent coexister (convection naturelle au dessus de la flamme, convection forcée entre paroi horizontal et gaz chaud).

Les échanges par convection obéissent à la loi suivante :

$$q_c = h(T_f - T_p) \quad (2-21)$$

où T_p : Température à la paroi du solide, T_f : Température du fluide et h : Coefficient d'échange par convection.

2-5-4 Transfert de chaleur par conduction

La conduction est le mécanisme de propagation de la chaleur dans un milieu matériel solide non isotherme. Le transfert calorifique par conduction est aussi présent dans les liquides et dans les gaz. Dans ce cas, il est cependant masqué par le phénomène de convection, dans lequel la chaleur est dissipée par un processus engendré par la turbulence. Le phénomène de conduction résulte de transferts d'énergie entre molécules, atomes et électrons (liés ou libres). Les mouvements microscopiques impliqués par de tels échanges ne peuvent être visualisés ni observés directement à l'aide des techniques usuelles. Les déplacements relatifs sont nuls en moyenne au cours du temps.

2-5-4-1 Loi de comportement de Fourier

On sait que la chaleur s'écoule d'une zone à température élevée vers une zone où la température est plus basse. Le flux de chaleur s'obtient par la loi de Fourier qui, dans le cas unidirectionnel, s'écrit :

$$q'_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (\text{W/m}) \quad (2-22)$$

où λ est la conductivité thermique (W/m.°K) ; $q'_x = (dq_x / dt) / A$, A étant la section, est perpendiculaire à la direction x , à travers laquelle la chaleur est transférée.

2-5-4-2 Equation d'équilibre du champ thermique

Les incendies sont des phénomènes transitoires, et les équations de base de la conduction doivent donc être établies en régime transitoire. La distribution de la température dans un corps solide est régie par une équation qui établit en chaque point du milieu la conservation de l'énergie pour un petit élément de volume centré en ce point. Cette équation s'écrit dans un milieu bidimensionnel:

$$\nabla^2(\lambda T) + Q = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-23)$$

où Q : puissance éventuellement dissipée par unité de volume (effet de Joule, réactions chimiques, réactions nucléaires...) et $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$ (opérateur de la divergence).

NB : **i)** Si T est indépendant de t et la puissance dissipée par unité de volume égale à 0, l'équation se simplifie encore $\nabla^2 T = 0$; Dans ce cas, le régime est dit permanent (ou stationnaire). **ii)** Si $Q = 0$, on obtient : $\nabla^2 T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$ où : $a = \lambda / c \rho$ s'appelle diffusivité thermique. L'équation (2-23) est assortie d'une condition initiale et de diverses conditions aux limites. Il faut noter que, en toute généralité, les variables λ , c , ρ et Q dépendent de la température.

2-5-5 Coefficient de transfert de chaleur dans les phénomènes d'incendie

La décomposition de l'échange thermique global en processus élémentaires a pour but de faciliter l'analyse du phénomène. En réalité tous ces processus se manifestent simultanément et ils interagissent les uns avec les autres. La convection est, par exemple, toujours accompagnée d'un échange de rayonnement. D'autre part, l'échange conductif dans un matériau poreux fait intervenir la convection et le rayonnement au sein de l'air qui remplit les pores. Dans les calculs pratiques, il n'est pas toujours nécessaire de décomposer l'échange thermique global en ses phénomènes élémentaires. On peut, dans certains cas, se borner à considérer le processus d'échange principal, quitte à tenir compte des processus secondaires en introduisant des facteurs de correction. Ainsi par exemple, dans un matériau poreux, la chaleur est principalement transmise par conduction. Les échanges convectifs et rayonnants qui se manifestent dans les pores interviennent indirectement dans le calcul par une majoration appropriée du coefficient de conductibilité. Lors d'un échange calorifique au voisinage d'une paroi, la convection et le rayonnement se manifestent souvent simultanément. On admet alors généralement que ces deux contributions sont additives.

Les formules présentées aux paragraphes précédents pour la convection et le rayonnement s'appliquent à des conditions d'échange relativement simples. Dans le cas d'un incendie, les contributions sont beaucoup plus difficiles à déterminer. S'il est possible d'estimer les échanges par convection, il n'en va pas de même pour les échanges par rayonnement, car ceux-ci dépendent du rayonnement des flammes, des fumées et des parois environnantes. Le plus simple est de considérer toujours l'environnement comme un tout conventionnel désigné par l'indice e , tandis que la paroi du spécimen est désignée par l'indice p . Les températures en valeurs absolues T_e et T_p sont celles définies par la courbe température-temps adoptée.

La densité de flux de chaleur q traversant la paroi est alors donnée par :

$$q = h(T_e - T_p) + \sigma_0 \varepsilon_{ep} (T_e^4 - T_p^4) \quad (2-24)$$

Dans cette relation, le paramètre critique à déterminer est l'émissivité relative ε_{ep} l'environnement et la paroi de l'éprouvette. Le coefficient d'échange par convection (h) a moins d'importance, car vu les températures atteintes lors de l'exposition au feu, l'échange radiatif devient rapidement prépondérant. On considère souvent un coefficient d'échange global par convection et rayonnement. Ce coefficient peut être obtenu à partir de la relation

(2-25), en faisant dépendre l'échange calorifique total d'un coefficient qui a la même forme que le coefficient de convection. On peut écrire :

$$\begin{aligned}
 q &= h(T_e - T_p) + \sigma_0 \varepsilon_{ep} (T_e^4 - T_p^4) & (2-25) \\
 &= h(T_e - T_p) + \sigma_0 \varepsilon_{ep} (T_e^3 + T_e^2 T_p + T_e T_p^2 + T_p^3)(T_e - T_p) \\
 &= \alpha (T_e - T_p)
 \end{aligned}$$

où α est appelé coefficient d'échange global et s'écrit :

$$\alpha = h + \sigma_0 \varepsilon_{ep} (T_e^3 + T_e^2 T_p + T_e T_p^2 + T_p^3) \quad (2-26)$$

On prend généralement dans le cas de l'acier de construction, fixe la valeur de $\varepsilon_p = 0.8$ et $\varepsilon_e = 0.625$; ce qui conduit à la valeur de l'émissivité relative $\varepsilon_{ep} = 0.5$. C'est la valeur réglementaire qui sera adoptée, sauf indication contraire, dans les calculs comme nous le verrons dans les chapitres subséquents.

CHAPITRE 3

CALCUL DE L'ELEVATION DES TEMPERATURES DANS LES ELEMENTS EN ACIER AVEC OU SANS PROTECTION DU SUBSTRAT METALLIQUE

3-1 Généralités

Comme vu dans le chapitre précédent, le problème de transfert de chaleur et de la répartition de la température dans les matériaux à une importance considérable dans les études de résistance au feu des structures. En effet, si la distribution de la température est mal évaluée, les résultats obtenus lors du calcul au feu proprement dit seront automatiquement erronés. Le calcul de l'élévation de température peut être effectué par des méthodes simplifiées lorsqu'il s'agit de profilés métalliques non protégés. Il n'est pas, par exemple, le cas des éléments massifs en béton ou en maçonnerie où il est indispensable d'utiliser des méthodes plus élaborées. Cependant, avant d'aborder ce problème, il est nécessaire d'abord de savoir comment évoluent, avec la température, les propriétés thermo-physiques et mécaniques de l'acier de construction.

3-2 Caractéristiques des propriétés thermo-physiques et mécaniques de l'acier de construction

En général, les variations de température affectent d'une manière significative les propriétés des matériaux constitutifs des constructions qui s'affaiblissent au fur et à mesure que la température s'élève. En ce qui concerne l'acier de construction employé dans les structures métalliques, diverses recherches ont été effectuées dans de nombreux laboratoires notamment en Belgique, Allemagne, Pays Bas, Suède ... et sont amplement revues dans le règlement Européen pour la sécurité au feu des constructions en acier [17] et dans les normes Européennes des Eurocodes [18] que nous allons récapituler ci-après.

Comme exemples de propriétés thermo-physiques, nous avons : la conductivité thermique (λ_a), la chaleur massique (c_a), la masse volumique (ρ_a) et le coefficient de dilatation thermique (α) ou, l'allongement $(\Delta l/l)_a = \alpha \Delta T$. Les trois premières interviennent dans l'analyse thermique dans la résolution de l'équation de la chaleur tandis que la dernière dans l'analyse structurale des éléments. Comme exemples de propriétés thermo-mécaniques, nous avons : la résistance à la compression f_y , la contrainte élastique (ou la limite de proportionnalité) f_p , le module d'élasticité (ou la pente du domaine élastique linéaire) E_a , la déformation élastique linéaire ε_p , la déformation plastique ε_y , la déformation limite en élasticité ε_t et la déformation ultime ε_u .

Les résultats des propriétés mécaniques et thermiques des aciers de construction type carbone qui suivent, sont donnés en conformité avec l'Eurocode 3. Les valeurs de ces propriétés sont des valeurs caractéristiques et les caractéristiques mécaniques à 20°C sont celles indiquées dans l'ENV 1993-1-1 pour le calcul à température ambiante [18]. Il y a lieu bien d'abord de définir le sens de ces propriétés physiques en vue d'une bonne compréhension.

3-2-1 Définition des propriétés mécaniques de l'acier

La résistance mécanique d'un matériau est déterminée par des essais de traction, de compression ou de flexion. Le diagramme contrainte-déformation (fig. 3-1) enregistré sur une éprouvette en acier conduit généralement aux propriétés suivantes :

- La résistance à la compression f_y est la contrainte obtenue lors d'un essai au moment de la rupture.
- La limite d'élasticité ou de proportionnalité ϵ_p correspond à la contrainte maximale, pour laquelle, après suppression de l'effort, l'éprouvette reprend pratiquement sa longueur ou sa position initiale. En l'absence d'un palier d'étirage, la limite d'élasticité est définie par un allongement permanent de 0.2%.
- La contrainte élastique f_p correspond à la contrainte maximale pour laquelle la déformation ϵ est proportionnelle à la contrainte : $\sigma = E.\epsilon < f_p$.
- Le module d'élasticité est le rapport entre la contrainte σ et l'allongement ϵ , lorsque la contrainte est inférieure à la limite de proportionnalité f_p .

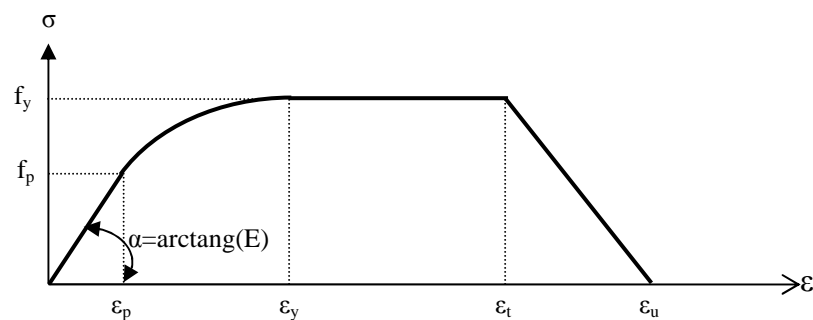


Figure 3-1 : Modèle de la relation σ - ϵ de l'acier à température ambiante ($T=20^\circ\text{C}$)

En service, sous les charges usuelles, les contraintes sont toujours nettement inférieures à la limite d'élasticité. Habituellement, le rapport entre ces valeurs est limité à $1/1.5$. Dans ce cas, l'élément est sollicité dans le domaine élastique, où la déformation est proportionnelle à la charge. Le coefficient de proportionnalité dépend en général de la section de l'élément et du module d'élasticité du matériau constitutif. Lorsqu'un matériau est soumis à des températures élevées, la résistance mécanique diminue comme on le verra plus loin on affecte les différentes quantités de l'indice Θ .

3-2-2 Définition des propriétés physiques de l'acier

- Conductivité thermique

La conductivité thermique caractérise l'aptitude d'un matériau à conduire de la chaleur. Elle est représentée par λ et exprimée en watts par mètre et degré centigrade ($\text{W/m}^\circ\text{C}$). Plus λ est faible, plus le matériau est isolant et plus la transmission de la chaleur est faible. Le coefficient λ augmente fortement avec la température pour certains matériaux et notamment pour les matériaux isolants.

Pour les matériaux poreux et compressibles, où le pourcentage des vides influence la convection à hautes températures, la masse volumique ρ est importante. Ainsi, en compactant

par exemple une laine minérale, ρ augmente et λ augmente à la température ambiante, mais λ augmente moins aux hautes températures parce que la définition des vides réduit la circulation de l'air et par conséquent les échanges thermiques. L'utilisation judicieuse d'un matériau isolant, où λ est faible, contribue fortement à l'obtention de l'isolation thermique exigée pour la résistance au feu des éléments de construction.

- Capacité calorifique

La capacité calorifique (ou la chaleur massique ou spécifique) est la quantité d'énergie qu'il faut apporter à 1 kg d'un matériau pour élever sa température d'un degré centigrade. Elle est représentée par c et exprimée en kilojoules par kilogramme et degré centigrade [kJ/kg°C]. Plus la capacité calorifique est grande, moins rapide est l'échauffement de l'élément exposé au feu.

- Diffusivité thermique

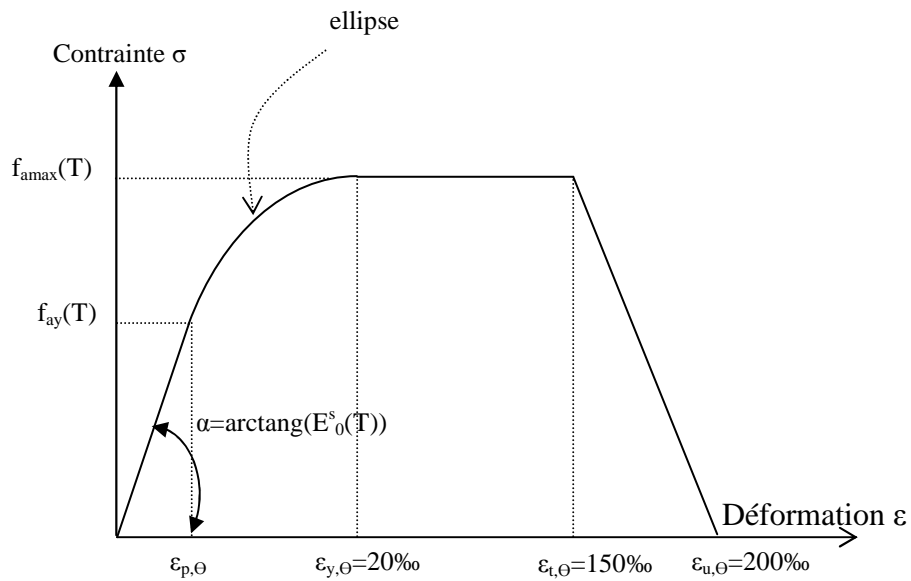
L'isolation thermique en cas d'incendie est un phénomène transitoire et elle n'est pas définie uniquement par le coefficient de conductivité thermique λ , mais seulement par la diffusivité thermique $a = \lambda / cp$ [m²/s]. La diffusivité thermique est une mesure de la vitesse à laquelle le nouvel équilibre thermique s'établit, après une perturbation thermique : plus a est grand, plus vite l'équilibre s'établit, ou dans ce cas présent, plus vite l'élément exposé au feu s'échauffe à l'intérieur et sur la face non exposée au feu.

3-2-3 Evolution en fonction de la température des propriétés thermo-mécaniques

La résistance et les propriétés de déformation de l'acier de construction aux températures élevées sont obtenues par la relation contrainte-déformation présentée à la figure 3-2. Notons que ces résultats sont valables en principe pour des vitesses d'échauffement comprises entre 2 et 50 K/min et il convient en outre d'utiliser cette relation pour déterminer la résistance à la traction, à la compression, à la flexion ou au cisaillement.

Le tableau 3-1 donne les 3 paramètres de réduction par rapport aux valeurs appropriées à 20°C pour la relation contrainte-déformation de l'acier de construction à température élevée en accord avec la figure 2-1. Ces paramètres sont comme suit :

- Résistance à la compression $f_{y,\theta}$, (limite d'élasticité efficace).
- Contrainte élastique $f_{p,\theta}$, (limite de proportionnalité).
- Module d'élasticité $E_{a,\theta}$.



Plage de déformations	Contrainte σ	Module tangent
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + (b/a) [a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00	-
Paramètres	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$ $\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$	$\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$
Fonctions	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c / E_{a,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$	

Figure 3-2 : Modèle mathématique exprimant les relations contrainte-déformation de l'acier de construction à température élevée

Tableau 3-1: Facteurs de réduction à température θ_a par rapport aux valeurs de f_y ou de E_a à 20°C

Température de l'acier θ_a [°C]	Facteurs de réduction à température θ_a par rapport aux valeurs de f_y ou de E_a à 20°C		
	Facteur de réduction (par rapport à f_y) pour la limite d'élasticité efficace $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Facteur de réduction (par rapport à f_y) pour la limite de proportionnalité $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Facteur de réduction (par rapport à E_a) pour la pente du domaine élastique linéaire $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20	1.000	1.000	1.000
100	1.000	1.000	1.000
200	1.000	0.807	0.900
300	1.000	0.613	0.800
400	1.000	0.420	0.700
500	0.780	0.360	0.600
600	0.470	0.180	0.310
700	0.230	0.075	0.130
800	0.110	0.050	0.090
900	0.060	0.0375	0.0675
1000	0.040	0.0250	0.0450
1100	0.020	0.0125	0.0225
1200	0.000	0.000	0.000

Note : Pour des valeurs intermédiaires de température de l'acier, une interpolation linéaire peut être utilisée

La variation de ces paramètres est montrée par la figure 3-3. Notons qu'éventuellement pour des températures inférieures à 400°C, la relation contrainte- déformation (figure 2.1) peut être complétée par l'option tenant compte de l'érouissage ; cela sous réserve que les proportions de la section ne soient pas telles qu'un voilement local soit susceptible d'empêcher d'atteindre la déformation accrue, et que l'élément soit correctement maintenue pour éviter son instabilité. Concernant les paramètres de déformation, on prend quelque soit la température les valeurs suivantes :

$$\varepsilon_{p,\theta} = 20\% ; \quad \varepsilon_{y,\theta} = 150 \% ; \quad \varepsilon_u = 200 \%.$$

En moyennant les résultats des 3 paramètres explicités au tableau 3-1, la variation de la relation contrainte-déformation avec la température comme spécifiée à la figure 3-1 est illustrée pour les nuances d'acier avec érouissage, par la figure 3-4.

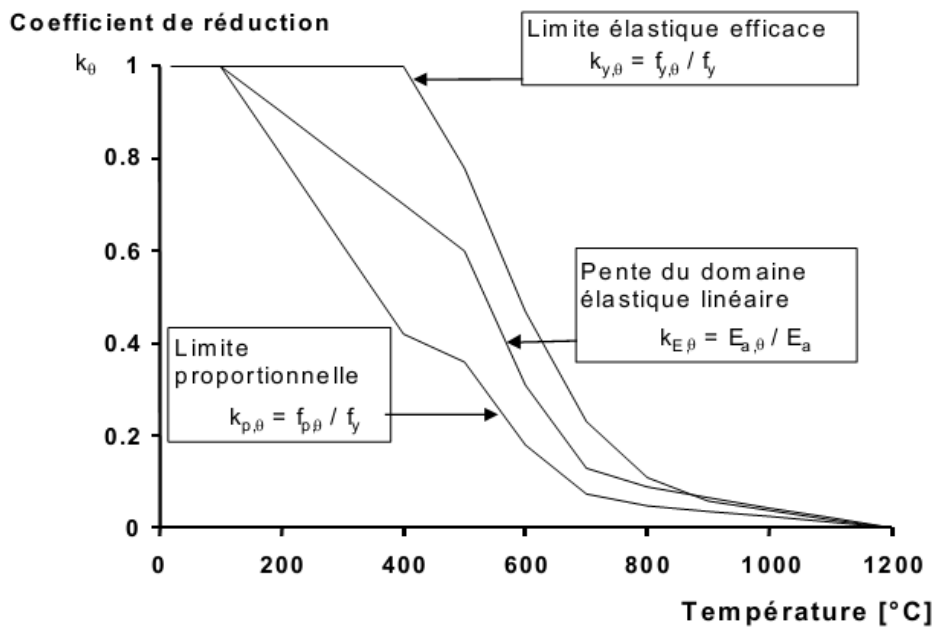


Figure 3-3 : Evolution des paramètres de la relation σ - ϵ de l'acier en fonction de la température d'après la figure 3-2 et le tableau 3-1

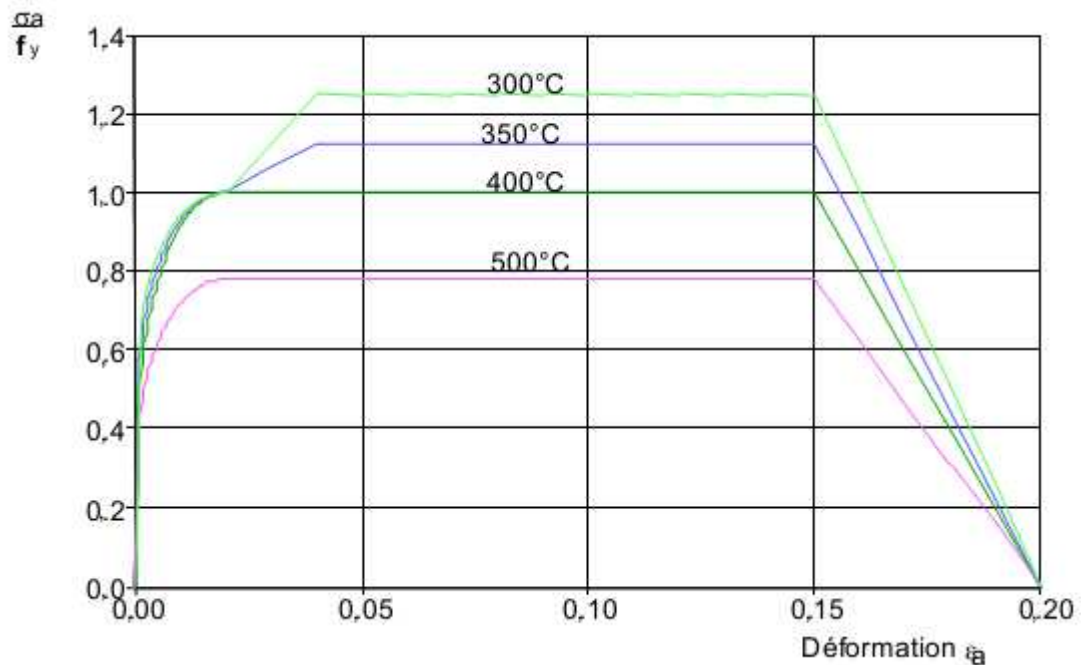


Figure 3-4 : Relation σ - ϵ de l'acier en fonction de la température d'après la figure 3-2 et le tableau 3-1

3-2-4 Evolution en fonction de la température des propriétés thermo-physiques

- Dilatation thermique :

La dilatation thermique relative de l'acier de construction $\Delta l/l$ peut être déterminée comme suit :

Pour $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C}$:

$$\Delta l/l = -2.416 \times 10^{-4} + 1.2 \times 10^{-5} \theta_a + 0.4 \times 10^{-8} \theta_a^2 \quad (3- 1a)$$

Pour $750^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 860^\circ\text{C}$:

$$\Delta l/l = 11 \times 10^{-3} \quad (3- 1b)$$

Pour $860^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$:

$$\Delta l/l = -6.2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} \theta_a \quad (3- 1c)$$

où : l est la longueur à 20°C , Δl est la dilatation de l'acier due à la température et θ_a est la température de l'acier [$^\circ\text{C}$]

La variation de la dilatation thermique relative avec la température est montrée par la figure 3-5. Dans le modèle de calcul simplifié, la relation entre la dilatation thermique relative et la température de l'acier peut être considérée comme constante. Dans ce cas, la dilatation relative peut être déterminée par :

$$\Delta l/l = 14 \times 10^{-6} (\theta_a - 20) \quad (3- 2)$$

- Masse volumique :

La masse volumique de l'acier de construction ρ_a peut être considérée comme indépendante de la température de l'acier. La valeur suivante peut être adoptée : $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$.

- Chaleur spécifique

La chaleur spécifique de l'acier c_a (en J/kgK), valable pour toutes les nuances d'aciers de construction et d'armature, peut être déterminée par les formules ci après:

$$c_a = 425 + 7.37 \times 10^{-1} \theta_a - 1.69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad \text{pour } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 600^\circ\text{C}$$

$$c_a = 666 - \frac{13002}{\theta_a - 738} \quad \text{pour } 600^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 735^\circ\text{C}$$

(3- 3)

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad \text{pour } 735^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 900^\circ\text{C}$$

$$c_a = 650 \quad \text{pour } 900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$$

où θ_a est la température de l'acier [$^\circ\text{C}$].

La figure 3-6 montre la variation de la chaleur spécifique en fonction de la température. Dans les modèles de calcul simplifiés la chaleur spécifique peut être considérée comme indépendante de la température de l'acier. Dans ce cas, on prend la valeur moyenne suivante :

$$c_a = 600 \text{ J/kgK}$$

- **Conductivité thermique :**

La conductivité thermique de l'acier λ_a , valable pour toutes les nuances d'acier (de construction et d'armature), peut être déterminée par les formules données ci-dessous. La variation de cette conductivité thermique est représentée sur la figure 3-7.

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_a \quad \text{W/m}^\circ\text{K} \quad \text{pour} \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 800^\circ\text{C} \quad (3-4a)$$

$$\lambda_a = 27.3 \quad \text{W/m}^\circ\text{K} \quad \text{pour} \quad 800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \quad (3-4b)$$

où θ_a est la température de l'acier [$^\circ\text{C}$].

Dans les modèles de calcul simplifiés, la conductivité thermique peut être considérée comme indépendante de la température de l'acier. Dans ce cas, on prend la valeur moyenne λ_a égale à 45 W/m $^\circ\text{K}$.

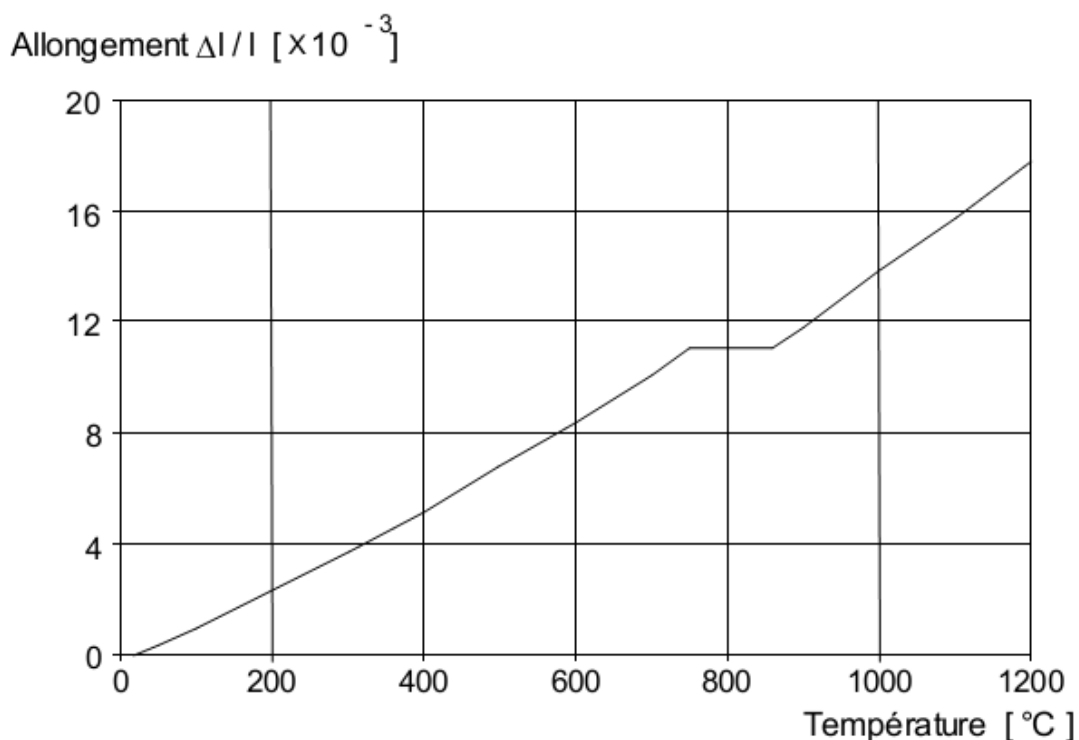


Figure 3-5 : Allongement thermique relatif de l'acier en fonction de la température

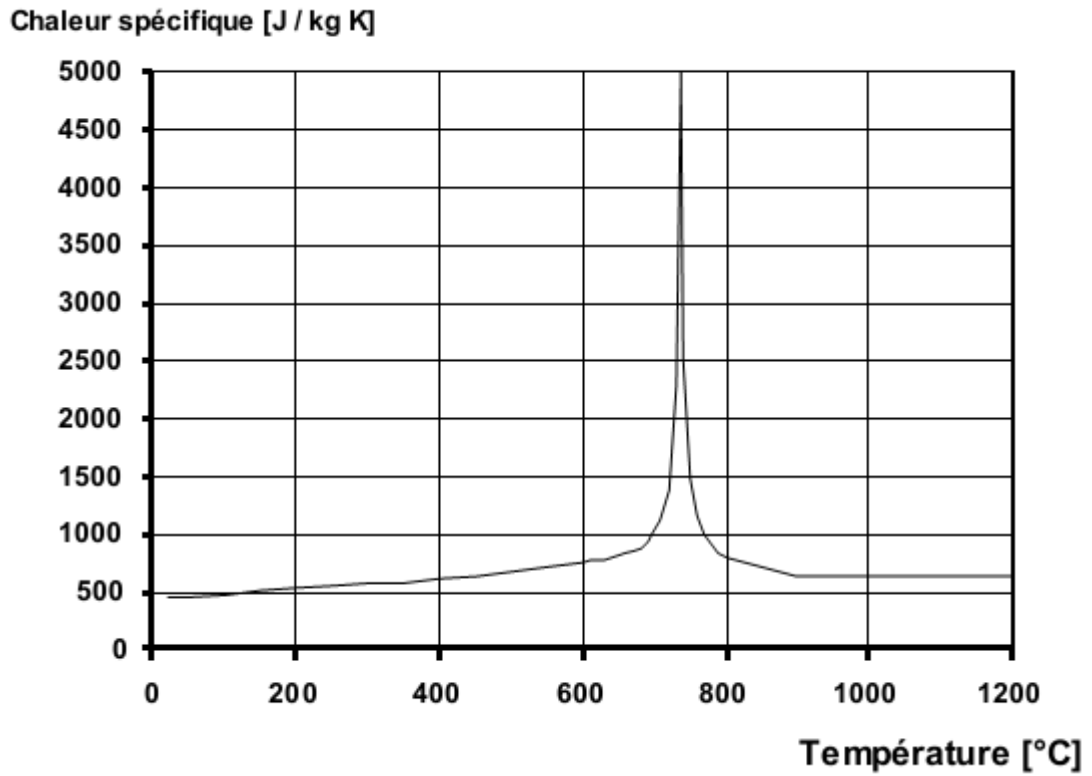


Figure 3-6 : Chaleur spécifique de l'acier en fonction de la température

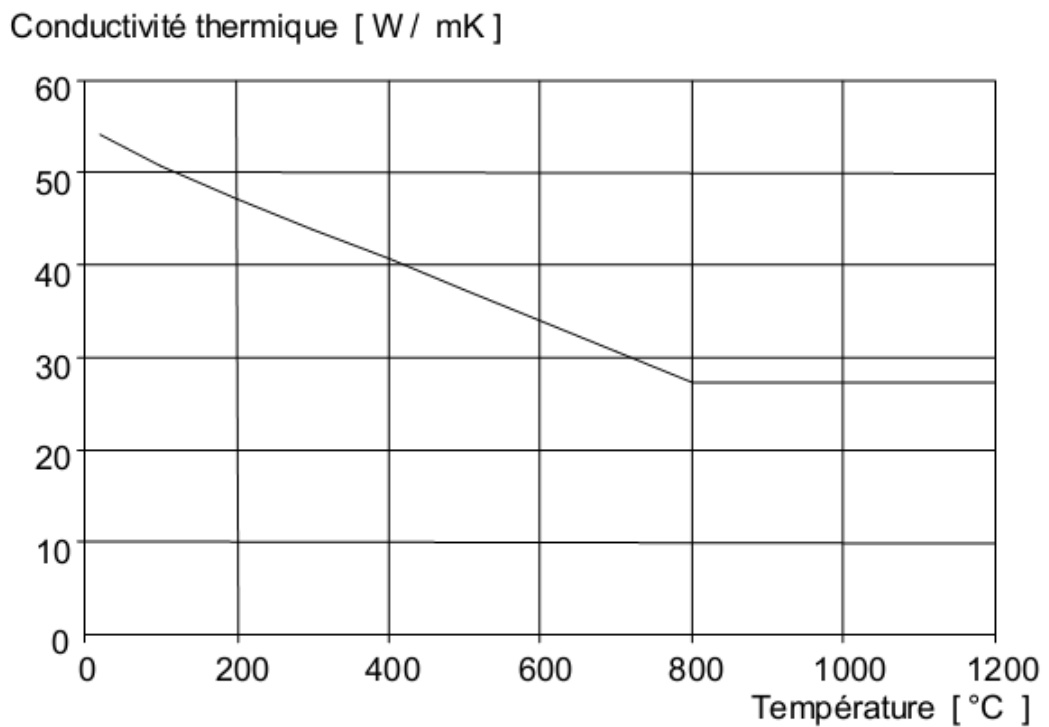


Figure 3-7 : Conductivité thermique de l'acier en fonction de la température

3-3 Calcul de la répartition de la température dans un élément métallique

La distribution de la température dans un corps solide est régie par l'équation de la conduction de la chaleur de Fourier-Kirchhoff que nous écrivons pour un milieu isotrope adiabatique sous la forme :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = \frac{c \rho}{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3- 5a)$$

Cette équation est assortie d'une condition initiale de température et de diverses conditions aux limites. Dans le cas d'incendie, la condition initiale est souvent prise égale à $\theta_o=20^\circ\text{C}$, tandis que la condition aux limites est une condition d'échange thermique entre l'environnement et la paroi de l'élément dont le flux thermique (q) dépend de la façon dont l'incendie est simulé ayant la forme de la relation (2-21), soit :

$$q = \alpha(\theta_g - \theta_p) \quad (3- 5b)$$

α étant le coefficient d'échange global par convection et par rayonnement et θ_p , température à la surface de contact paroi-gaz.

3-3-1 Idéalisation de l'environnement thermique créée par un incendie

Il s'agit tout d'abord de représenter les conditions de température rencontrées lors de l'incendie qui sont décrites par la relation température-temps dans le compartiment sujet à l'action du feu. Pour un scénario de feu standard soit ISO834[19] comme dans le cas de la section 2-2-1-4-B, la courbe température-temps des gaz est de la forme :

$$\theta_g = \theta_o + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (3- 6)$$

où : θ_g est la température des gaz dans le compartiment de feu [$^\circ\text{C}$], θ_o est la température initiale ($=20^\circ\text{C}$) et t est le temps exprimé en minutes.

Il faut ensuite évaluer le flux de chaleur \dot{h}_{net} [W/m^2] auquel l'élément est soumis permettant de calculer les actions thermiques. Celui-ci est généralement obtenu en additionnant la part transmise par convection $\dot{h}_{net,c}$ et celle transmise par rayonnement $\dot{h}_{net,r}$. L'Eurocode 3 suggère de prendre par analogie à la relation (2-25):

$$\dot{h}_{net} = \gamma_{n,c} \dot{h}_{net,c} + \gamma_{n,r} \dot{h}_{net,r} \quad (3- 7)$$

où $\gamma_{n,c}$ et $\gamma_{n,r}$ sont les coefficients représentant les différents types d'essais nationaux, ils sont égaux à l'unité. La composante de convection au flux de chaleur par unité de surface est déterminée par la relation :

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (3- 8)$$

où : α_c est le coefficient de transfert thermique par convection en $[\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}]$; il est pris égal à $25 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$; θ_g est la température des gaz à proximité de l'élément selon l'exposition au feu $[\text{°C}]$ et θ_m est la température de surface de l'élément $[\text{°C}]$.

La composante de rayonnement du flux de chaleur par unité de surface est déterminée par la relation :

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \cdot \varepsilon_{res} \cdot \sigma_o [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (3-9)$$

où : ϕ est le facteur de forme [sans unité] ; θ_r est la température de rayonnement à proximité de l'élément $[\text{°C}]$; θ_m est la température de la surface de l'élément $[\text{°C}]$ et $\sigma_o = 5.67 \cdot 10^{-8}$ est la constante de Stefan Boltzmann $[\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}^4]$.

Il convient de prendre l'émissivité résultante à :

$$\varepsilon_{res} = \varepsilon_f \cdot \varepsilon_m \quad (3-10)$$

où : ε_f est l'émissivité correspondant au compartiment du feu et ε_m est l'émissivité concernant la surface du matériau. L'Eurocode 3 préconise de prendre $\varepsilon_f = 0.8$ et $\varepsilon_m = 0.625$, ce qui conduit à $\varepsilon_{res} = 0.5$. Il est plus commode d'utiliser un coefficient d'échange global $\dot{h}_{net,d}$. Dans ce cas le flux thermique peut se mettre sous la forme en assimilant $\theta_g = \theta_r$:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,d} (\theta_g - \theta_m) \quad (3-11)$$

où :

$$\dot{h}_{net,d} = \alpha_c + \sigma_o \cdot \varepsilon_{res} [(\theta_g + 273)^2 + (\theta_m + 273)^2][(\theta_g + 273) + (\theta_m + 273)] \quad (3-12)$$

3-3-2 Hypothèses simplificatrices

Dans le cas des structures métalliques, il est possible d'admettre que la température du profil est uniforme sur la section droite et le long de l'élément. De ce fait, un tronçon de poutre ou de colonne compris entre deux nœuds est caractérisé par une seule température de référence. Cette hypothèse se justifie bien par suite de la conductivité thermique élevée de l'acier, et particulièrement dans le cas des profilés ordinaires en forme de I, par suite de la minceur de l'âme et des semelles, et de la grande surface exposée au feu. Les résultats expérimentaux démontrent cependant qu'il existe toujours un gradient thermique sur la section droite de l'élément [9]. De plus, au voisinage des nœuds, la température est sensiblement moins élevée qu'au centre de l'élément, parce qu'ils sont moins exposés et qu'il s'y produit une fuite de calories vers les éléments adjacents.

3-3-3 Cas des profilés non protégés

L'équation de l'augmentation de température peut être formulée de la façon suivante en considérant un élément de volume soumis à un flux de chaleur comme représentée sur la figure 3-8. Le bilan calorifique concernant cet élément pendant un intervalle de temps très court s'écrit :

$$Q \cdot dS \cdot dt = c_a \cdot \rho_a \cdot dV \cdot d\theta_a \quad (3-13)$$

où : Q : flux de chaleur pénétrant dans l'élément ; dV : Volume de l'élément ; dS : Surface extérieure de l'élément ; $d\theta_a$: Elévation de température dans l'acier ; dt : Intervalle de temps ; c_a : Chaleur massique ; ρ_a : Masse volumique.

On écrit le même bilan énergétique pour un profilé non protégé. Dans ce cas, on suppose que les calories absorbées se répartissent instantanément de manière uniforme dans toute la masse de l'acier (fig. 3-9). L'équation (3-13) s'écrit alors :

$$Q \cdot S_a \cdot dt = c_a \cdot \rho_a \cdot V_a \cdot d\theta_a \quad (3-14)$$

où : V_a : Volume du profilé ; S_a : Surface extérieure du profilé.

D'après l'expression (3-11), on a :

$$Q = h_{net,d} \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad (3-15)$$

On a donc avec $\theta_a = \theta_m$:

$$d\theta_a = h_{net,d} \cdot \frac{1}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{S_a}{V_a} \cdot (\theta_g - \theta_m) dt \quad (3-16)$$

Le rapport $\frac{S_a}{V_a}$ est appelé facteur de massivité de l'élément (généralement exprimé en m^{-1}). Il faut noter que ce facteur varie de manière inverse à la massivité.

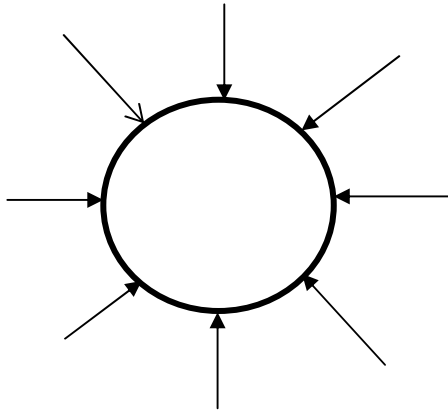


Figure 3-8 : Elément de volume soumis à un flux de chaleur

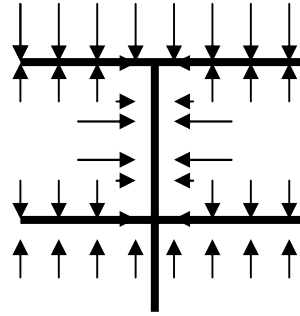


Figure 3-9 : Profil non protégé soumis à un flux de chaleur

Dans la littérature, on trouve plus souvent la formulation A_m / V pour représenter le facteur de massivité. C'est cette formulation qui a été adoptée dans l'Eurocode 3. Au tableau 3-2, on montre quelques formes permettant de calculer les valeurs du facteur de massivité A_m / V pour des éléments en acier non protégés. La relation (3- 16) s'écrit donc :

$$d\theta_a = h_{net,d} \cdot \frac{1}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{A_m}{V} (\theta_g - \theta_m) dt \quad (3- 17)$$

En passant directement aux différences finies, on obtient :

$$\Delta\theta_a = h_{net,d} \cdot \frac{1}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{A_m}{V} (\theta_g - \theta_m) \Delta t \quad (3- 18)$$

En fait, cette procédure correspond à utiliser la méthode d'Euler, dans laquelle on réalise l'intégration pas à pas en exprimant la fonction à partir des valeurs au début de l'intervalle. Cette formulation peut cependant conduire à un schéma numérique peu précis si le pas de temps est assez important. Il existe une autre formulation suivante du type prédicteur-correcteur suivante dite méthode d'Euler modifiée ; néanmoins, la valeur de l'incrément de temps de Δt doit être au plus égale à 5 secondes. Cette méthode peut être formulée en réécrivant l'équation (3- 17) par la façon suivante:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = h_{net,d}(\theta_m) \cdot \frac{1}{c_a(\theta_m) \cdot \rho_a(\theta_m)} \cdot \frac{A_m}{V} (\theta_g - \theta_m) = f(\theta_m, t) \quad (3- 19)$$

Si on écrit :

$$\Delta\theta_m = \theta_m^{i+1} - \theta_m^i = f(\theta_m^i, t^i) \cdot \Delta t \quad (3- 20)$$

On se ramène alors à l'équation (3-18). Dans l'approche d'Euler modifiée, l'équation de résolution s'écrit :

$$\Delta\theta_m = [f(\theta_m^i, t^i) + f(\theta_m^{i+1}, t^{i+1})] \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (3-21)$$

La valeur de θ_m^{i+1} intervenant dans $f(\theta_m^{i+1}, t^{i+1})$ est inconnue, mais lors de la première itération, elle peut être estimée par extrapolation en utilisant la relation (3-20) de la méthode initiale d'Euler.

Cependant, en raison de la simplicité de son implémentation dans un code de calcul, nous retenons seule la méthode d'Euler mais en réduisant sensiblement le pas de temps que nous convenons, dans le cadre de ce travail, de choisir la valeur de Δt au plus égale à 1 seconde. Cet algorithme ainsi traduit sur ordinateur nous donne les résultats que nous illustrons dans le tableau 3-3 pour diverses valeurs de la massivité et de temps d'exposition au feu. Ce tableau peut par exemple être utilisé pour des fins de vérification de la résistance au feu les éléments non protégés soumis à l'action d'un feu normalisé ISO834.

Tableau 3-2 : Facteur de massivité A_m/V pour quelques éléments métalliques [6]

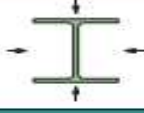
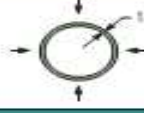
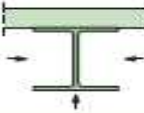
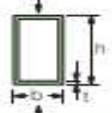
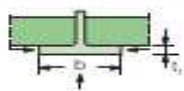
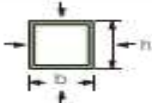

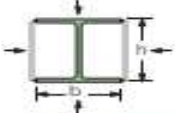

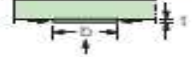
Section ouverte exposée au feu sur toutes les faces	Tube exposé au feu sur toutes les faces
$A_m/V = \frac{\text{périmètre}}{\text{aire de section transversale}}$	$A_m/V = 1/t$
	
Section ouverte exposée au feu sur trois faces	Profil creux (ou caisson soudé d'épaisseur constante) exposé au feu sur toutes les faces
$A_m/V = \frac{\text{surface exposée au feu}}{\text{aire de section transversale}}$	Si $t \ll b : A_m/V \approx 1/t$
	
Semelle de profilé en I exposée au feu sur trois faces	Caisson soudé exposé au feu sur toutes les faces
$A_m/V = (b + 2t)/(b \cdot t)$ Si $t \ll b : A_m/V \approx 1/t$	$A_m/V = \frac{2(b + h)}{\text{aire de la section}}$ Si $t \ll b : A_m/V \approx 1/t$
	
Cornière exposée au feu sur toutes les faces	Profilé en I avec renforts formant caisson, exposé au feu sur toutes les faces
$A_m/V = 2/t$	$A_m/V = \frac{2(b + h)}{\text{aire de la section}}$
	
Plat exposé au feu sur toutes les faces	Plat exposé au feu sur trois faces
$A_m/V = 2(b + t)/(b \cdot t)$ Si $t \ll b : A_m/V \approx 2/t$	$A_m/V = (b + 2t)/(b \cdot t)$ Si $t \ll b : A_m/V \approx 1/t$
	

Tableau 3-3 : Variation en fonction du temps des températures atteintes dans l'acier non protégés [9]

A_m^*/V [m^{-1}]	400	200	100	60	40	25
V/A_m^* [mm]	2.5	5.0	10.0	16.7	25.0	40.0
Time [min.]	Steel temperature in °C					
0	20	20	20	20	20	20
5	430	291	177	121	90	65
10	640	552	392	276	204	142
11	661	587	432	308	228	159
12	678	616	469	340	253	177
13	693	642	503	371	278	194
14	705	663	535	402	303	212
15	716	682	565	432	328	230
16	725	698	591	460	353	249
17	732	711	616	487	377	267
18	736	721	638	513	401	286
19	743	729	658	538	425	304
20	754	734	676	561	447	323
21	767	738	692	583	470	341
22	780	744	706	604	491	360
23	790	754	717	623	512	378
24	799	767	726	641	532	396
25	807	780	732	658	551	414
26	813	792	735	674	570	431
27	820	803	740	688	588	449
28	826	813	746	701	604	466
29	831	821	756	712	621	482
30	837	828	767	721	636	498
31	842	835	780	728	651	514
32	847	841	793	733	665	530
33	852	846	805	736	678	545
34	856	851	816	740	690	559
35	861	856	827	745	701	573
36	865	861	836	753	711	587
37	870	866	844	763	719	601
38	874	870	852	774	726	614
39	878	874	859	786	731	626
40	882	878	865	798	734	638
45	900	897	890	852	761	692

3-3-4 Cas des profilés protégés

Comme mentionné dans les chapitres précédents, il est nécessaire de recouvrir les éléments en acier, afin de retarder le moment où ils atteignent leur température critique, c'est-à-dire celle amenant la ruine de l'élément soumis à l'incendie. Parmi les protections, on distingue les protections légères des protections lourdes amplement revues dans [20,21,22]. Ce vocable est lié essentiellement à la capacité thermique de l'isolant, plus précisément à sa valeur par rapport à celle du profilé métallique. En pratique, on considère qu'une protection est légère si la condition suivante est réalisée :

$$\frac{2c_p \rho_p e_p}{c_a \rho_a} \frac{A_p}{V} \leq 1 \quad (3-22)$$

où l'indice « p » se rapporte à la protection et l'indice « a » à l'acier ; e_p : épaisseur de la protection et A_p/V : facteur de massivité compte tenu de la présence de l'isolant.

3-3-4-1 Principe de la protection des éléments de construction et principaux matériaux employés

La durée de résistance au feu correspond au temps nécessaire pour transmettre à l'élément de construction en acier un nombre de calories suffisant pour le porter à sa température critique. La mesure de protection est généralement appliquée consiste à interposer entre la

source de chaleur et l'élément un écran pour retarder cet apport de calories transmises. Cet écran est constitué d'un revêtement en matière isolante, dont l'efficacité dépend de sa nature, de son épaisseur et de sa fixation. Notons cependant que le problème de la protection n'est pas spécifique aux éléments en acier, mais c'est dans ce cas qu'il se pose avec le plus d'acuité.

La protection des éléments de construction peut être réalisée par l'emploi, sous forme d'enrobage, de différents matériaux. Dans ce but, les propriétés requises pour ces matériaux doivent être appréciées suivant les critères suivants :

- les propriétés thermiques ;
- la tenue du matériau dans le temps ;
- la tenue du matériau au cours de l'incendie;
- les aspects technico-économiques de l'application de la protection.

Quand les exigences de résistance au feu sont assez sévères, les principaux matériaux de protection employés se résument comme suit :

- Maçonneries de briques ou de blocs : Ces éléments, en particulier la maçonnerie de briques, ne sont plus guère utilisés en raison du coût de la main-d'œuvre, de l'épaisseur et du poids du matériau à mettre en œuvre. Ils constituent toutefois une protection durable et efficace.
- Béton : ce matériau qui n'est pas un isolant proprement dit, nécessite des épaisseurs de recouvrement relativement importantes. Son emploi est intéressant lorsque, dans le cas de colonnes notamment, il peut participer à la résistance mécanique de l'élément : il s'agit alors d'éléments mixtes. Le béton ordinaire peut être allégé par l'emploi de granulats légers qui, en augmentant le pouvoir isolant du béton ainsi réalisé, permettent de réduire les épaisseurs de recouvrement. Cette protection est également durable.
- Plâtre : il est composé du sulfate de calcium contenant une grande quantité d'eau. Le plâtre est certainement un des matériaux les plus efficaces et économiques sur le plan de la protection contre le feu. On se sert parfois d'un mélange de plâtre avec d'autres matières.
- Vermiculite : c'est de mica expansé se présentant sous forme de granulats très légers (fig. 3-10a), formé par l'hydratation de certains minéraux basaltiques. Elle peut être agglomérée à l'aide d'un liant adéquat pour être mise en œuvre sous forme de plaques, ou être mélangée au plâtre ou au ciment pour être projetée sous forme de mortier.
- Perlite : c'est un matériau qui a l'aspect de litière pour chat, de couleur blanche (fig. 3-10b) et utilisée dans les mêmes conditions que la vermiculite. Elle est fabriquée à partir d'une roche siliceuse volcanique broyée puis chauffée à haute température (1200°C). Cette opération provoque l'expansion de la perlite alors gonflée par des milliers de bulles d'air. Une fois refroidie, la perlite expansée peut atteindre 15 fois son volume initial.
- Amiante : il s'agit d'une fibre minérale qui peut être mise en œuvre, soit par projection sous forme de mortier, soit sous forme de panneaux. Actuellement, on n'utilise

pratiquement plus d'amiante projeté, par suite des dangers que présente ce matériau sur le plan physiologique.

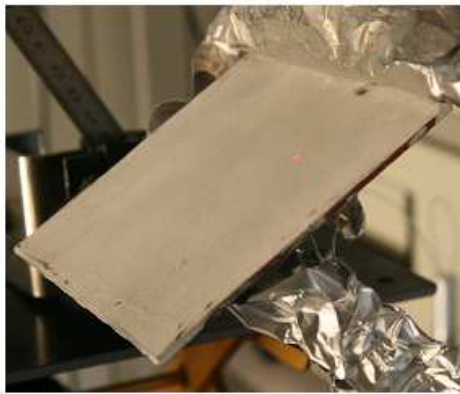
- Laines minérales ou laines de roche : sont des matériaux naturels nés de l'activité volcanique et du savoir faire humain. Elles peuvent être utilisées sous forme de matelas, rigides ou semi-rigides, fixés au support, ou être mise en œuvre par projection, sous forme de mortier. Il faut noter que la laine de verre, souvent utilisée comme isolant dans la construction, ne convient pas pour la protection contre l'incendie.
- Argile expansée : ce matériau se présente sous forme de grains plus ou moins sphériques de 3 à 10 mm de diamètre. Ils peuvent être mise en œuvre en vrac et sont, dans ce cas, maintenus en gaine, constituée de tôles minces d'acier, pouvant servir à la finition et la décoration de l'élément de construction.
- Peintures intumescentses ou enduits intumescents sont des produits qui gonflent à la chaleur, en formant une mousse microscopique ou meringue dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de fois l'épaisseur initiale, qui constitue l'isolation. A froid, l'épaisseur du film varie généralement de 0.5 à 4 mm d'épaisseur. Porté à une température entre 180°C et 300°C, le produit gonfle et se transforme en une épaisse couche carbonneuse qu'on appelle "char", atteignant des épaisseurs de 30 à 40 mm, qui assure ainsi la protection de l'élément métallique (fig. 3-12).



a) Vermiculite

a) Perlite

Figure 3-10 : Vermiculite et perlite après exfoliation prête à l'emploi



a) avant l'essai au feu



b) après l'essai au feu



c) Vue en coupe du char ainsi formé après l'essai

Figure 3-11 : Photographies de l'échantillon d'une plaque mince d'acier avant et après l'essai au feu

3-3-4-2 Techniques de mise en œuvre pratiques des matériaux de protection

Les matériaux de protection énumérés ci-avant peuvent être mis en œuvre suivant des procédés variés. Ceux-ci dépendent de la forme sous laquelle ces matériaux sont utilisés comme protection. On distingue généralement trois formes essentielles : les mortiers, les plaques ou panneaux assemblés et les peintures. Pour chacune de ces formes, il existe souvent plusieurs technologies. La plupart des matériaux de protection peuvent être utilisés sous forme de mortiers ou de panneaux rigides ou semi-rigides.

A- Mortiers : les bétons ou mortiers isolants sont obtenus en mélangeant au matériau de protection du ciment, des additifs pour en améliorer les propriétés rhéologiques. Le mortier peut alors être mis en place par coulage sur place dans des coffrages, par enduisage manuel ou par projection.

- Protection par moulage : du béton ou du mortier peut être coulé dans des coffrages réalisés autour de la colonne. Un treillis d'acier ou du métal déployé ceinturant l'élément assure, dans ce cas, une bonne adhérence au béton ou au mortier. Ce mode

de protection fournit une protection de bonne qualité, mais il demande beaucoup de temps, de mise en œuvre et de main-d'œuvre (coffrage, bétonnage, décoffrage) ; il est donc assez coûteux.

- Protection par enduisage : on peut aussi enduire manuellement l'élément à protéger, préalablement ceinturé d'un treillis ou de métal déployé, au moyen de plâtre ou de mortier. Ce mode de protection fournit aussi une protection d'assez bonne qualité, mais il est difficile de réaliser une épaisseur de protection uniforme. Il ne peut être envisagé que lorsque la surface à protéger est assez réduite.
- Protection par projection : cette technologie est beaucoup plus utilisée que les deux précédentes. Les matériaux isolants projetés, soit mécaniquement, soit pneumatiquement, sont ceux du type légers (vermiculite, perlite, fibres minérales). Le plus souvent, la projection s'effectue directement sur le profilé métallique, parfois sur un treillis en acier ou métal déployé fixé à celui-ci. La protection par projection exige cependant de machines à projeter qui effectuent le gâchage en continu du produit et assurent son transport dans des canalisations souples par voie humide, puis sa projection. Dans le cas des poutres, l'enrobage ne pose pas beaucoup de problème du point de vue esthétique; dans la majorité des constructions, elles sont en effet cachées par un faux-plafond. De plus, elles occupent généralement une position telle que des chocs ne sont pas à craindre. Il n'en va pas de même dans le cas des colonnes qui sont souvent exposées aux chocs dus à l'exploitation du bâtiment et pour lesquelles le système projeté est peu esthétique. Il faut donc généralement ajouter une protection supplémentaire présentant une certaine résistance mécanique

B- Systèmes en caisson

Une autre technologie très souvent utilisée est celle qui consiste à disposer des plaques ou panneaux autour de l'élément formant caisson. Le matériau constituant les plaques est réalisé à partir d'un ou plusieurs matériaux isolants généralement associés à un liant organique. Les panneaux d'isolation sont fixés entre eux généralement par collage, clouage, vissage, agrafage, etc... Ces opérations ont une grande importance vis-à-vis du comportement de la protection, les joints constituant, quel que soit le matériau isolant utilisé, les points faibles. Une mauvaise conception du joint ne prévoyant pas, par exemple, une différence de dilatation entre le matériau isolant et l'acier à protéger, hypothéquera gravement le bon comportement de l'ensemble sous l'action du feu. Les figures 3-12 et 3-13 représentent les différents modes de protection des colonnes et des poutres métalliques.

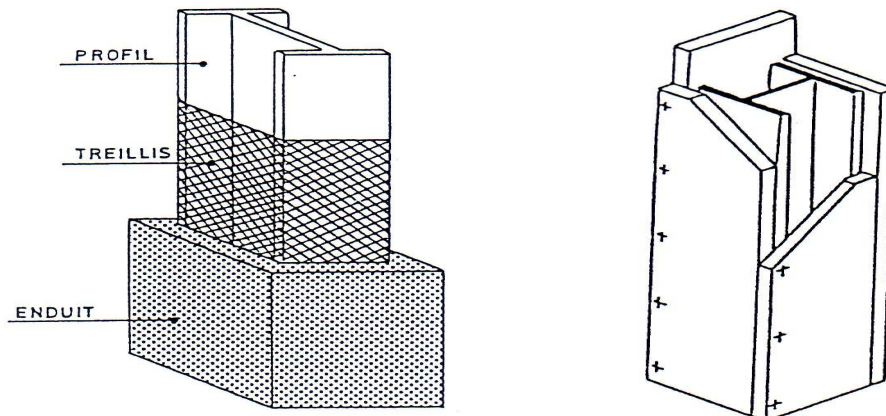


Figure 3-12 : Schémas de colonnes protégées

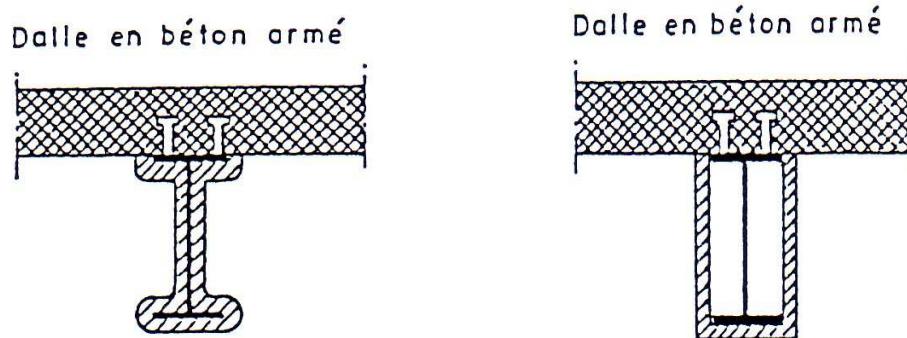


Figure 3-13 : Différents modes de protection des poutres

C- Peintures intumescentes

Ces peintures s'appliquent comme des peintures ordinaires en une ou plusieurs couches (fig. 3-14). La propriété de gonfler lorsqu'elles sont soumises à une agression thermique importante, les destine à des applications diverses qui vont de la protection incendie (structures métalliques, huisseries, cloisons, armoires électriques, etc.) au secteur militaire où les performances des peintures intumescentes permettent d'envisager la protection de matériels employés au combat contre des agressions spécifiques. On peut noter aussi diverses applications dans le domaine du textile.

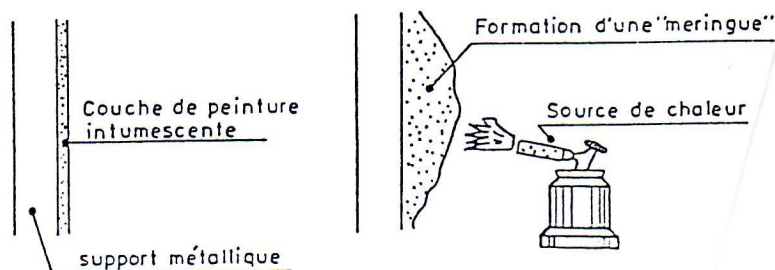


Figure 3-14 : Mode d'action des peintures

Dans le cadre d'applications civiles, les peintures intumescentes sont essentiellement utilisées dans le secteur du bâtiment. Bien que polyvalentes, et pouvant être adaptées sur de nouveaux types de supports (métaux, bois, plastiques, textiles, cartons, etc.), leur utilisation principale est la protection d'éléments de structures en acier en particulier les poutres qui composent les charpentes métalliques de certains immeubles (fig. 3-15). Dans le cadre d'applications militaires, elles sont utilisées à protéger des tubes d'armes ou des têtes d'explosives.

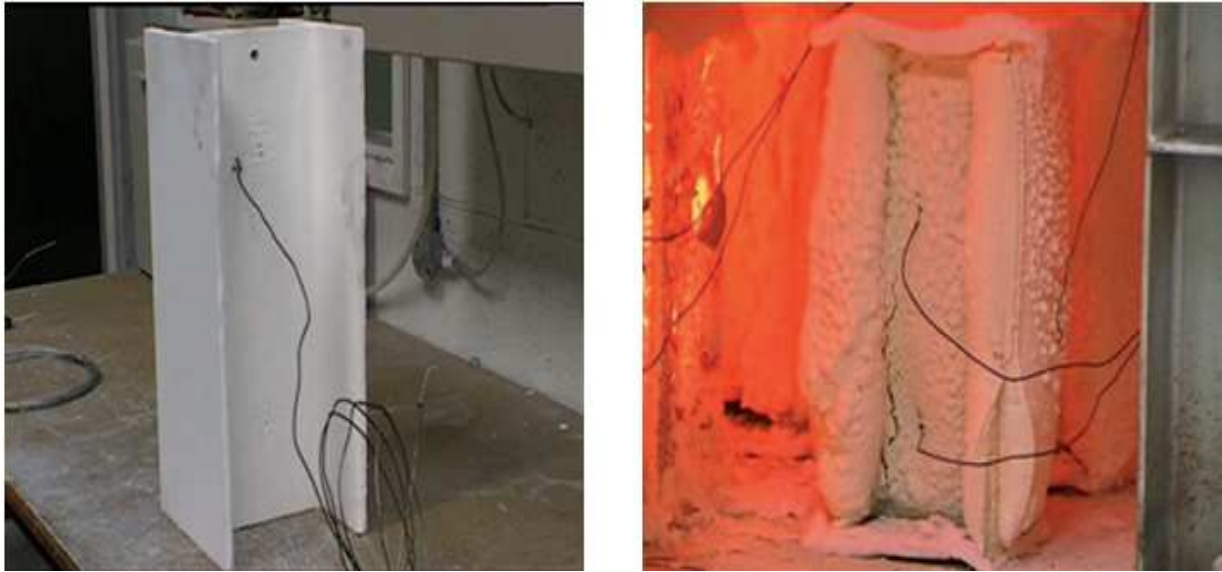


Figure 3-15 Exemple de formation de mousse après exposition à une certaine température (avant et après l'essai au feu)

3-3-4-3 Calcul des variations de températures selon l'EC1- clause EN-4.2.5.2

L'EC1 à la clause EN-4.2.5.2 suggère une formulation définie ci-après que nous allons appliquer et analyser dans le cadre de ce travail. La variation de la température $\Delta\theta_{a,t}$ dans un élément d'acier protégé, pendant un intervalle de temps Δt , peut être déterminée par la relation suivante :

$$\Delta\theta_a = \frac{\lambda_p}{d_p c_a \rho_a} \cdot \frac{A_p}{V} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \Phi/3)} \Delta t - (e^{\Phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (3- 23a)$$

avec : $\Phi = \frac{c_p \rho_p d_p}{c_a \rho_a} \cdot \frac{A_p}{V}$, où : A_p/V facteur de massivité pour l'élément en acier isolé par une unité de longueur de l'élément ; V : volume de l'élément par unité de longueur ; c_a : chaleur spécifique de l'acier, en [J/kg K], équation. 3-3 ; c_p : chaleur spécifique du matériau de protection contre le feu, en [J/kg K] ; d_p : épaisseur du matériau de protection contre le feu, en [m] ; Δt : intervalle de temps ; $\theta_{a,t}$: température engendrée dans le matériau acier au temps t ; $\Delta\theta_{g,t}$: augmentation de la température ambiante des gaz pendant l'intervalle de temps Δt en considérant la courbe température-temps du scénario de feu considéré ; λ_p : conductivité thermique du matériau de protection contre le feu, en [W/m K] ; ρ_a : masse volumique de l'acier (7850 kg/m³) ; ρ_p : masse volumique de du matériau de protection contre le feu, en [kg/m³].

Remarques:

- 1- Dans une phase d'incendie où la température des gaz est croissante, si dans la relation (3-27) la valeur $\Delta\theta_{a,t}$ est négative, le calcul incrémental est poursuivi en

prenant $\Delta\theta_{a,t} = 0$. Dans une phase d'incendie où la température des gaz est décroissante (exposition au feu naturel), la valeur de $\Delta\theta_{a,t}$ peut être toutefois nulle ou négative.

- 2- Il convient de choisir la valeur de Δt au plus égale à 1 seconde en raison du choix de la méthode de résolution d'Euler.
- 3- Ce modèle est codifié et traduit en langage d'ordinateur Fortran dont la subroutine FTEMP est présentée en annexe A.
- 4- Parfois, pour des considérations d'utilisation pratique, on néglige le paramètre Φ dans l'équation (3-23) que nous pouvons alors réécrire sous la forme simple suivante:

$$\Delta\theta_a = k_p \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{c_a \rho_a} \Delta t \quad (3-23b)$$

où :

$$k_p = \frac{\lambda_p A_p}{d_p V} \quad (3-23c)$$

Ceci permet d'obtenir les résultats du tableau 3-4 que nous pouvons par exemple utiliser pour des fins pratiques par analogie au tableau 3-3.

Tableau 3-4 Variation en fonction du temps des températures atteintes dans l'acier protégés [9]

k_p [W/m ³ K]	200	400	600	800	1200	2000
Time [min.]	Steel temperature in °C					
0	20	20	20	20	20	20
10	37	54	70	85	113	163
20	60	97	130	160	215	304
30	84	139	188	232	306	421
40	108	181	244	298	388	514
50	132	222	296	359	459	589
60	156	260	345	414	520	650
70	179	298	391	465	573	699
80	202	333	433	510	620	730
90	225	367	472	552	661	743
100	247	399	509	589	695	773
110	268	430	542	623	721	816
120	289	459	573	654	734	859
130	310	486	602	681	744	900
140	330	512	629	705	765	935
150	349	537	654	723	795	965
160	368	560	677	733	828	990
170	386	582	697	739	861	1013
180	404	603	714	751	892	1032
190	422	623	727	769	921	1049
200	439	642	734	792	948	1065
210	455	660	738	817	972	1078
220	471	677	747	843	993	1090
230	487	692	760	869	1013	1101
240	502	706	777	893	1031	1112

3-3-4-4 Description de la subroutine FTEMP

Ce sous programme dont la subroutine est présentée à l'annexe A calcule la température moyenne dans une section d'un élément métallique, muni ou non d'une protection, sous l'action d'un incendie normalisé ou naturel (ou paramétrique) i.e comportant une phase de refroidissement. Il fait principalement appel à la méthode de résolution d'Euler (équ. 3-17 ou 3-23) selon que le feu est de type normalisé (ISO834 : équ. 3-16, hydrocarbure : équ. 2-5) ou de type naturel en utilisant les étapes de calcul du paragraphe 2-4-3-2 dont le feu peut être contrôlé soit par la ventilation ou soit par la combustion.

Si l'élément est pourvu d'une protection, soit JPROEC=1, on fait appel à la fonction FDP pour déterminer la valeur de l'épaisseur du matériau de protection correspondante à une température donnée notamment dans le cas d'une protection de type intumescence (INTUMESC=1). S'il s'agit d'une protection de type en caisson (INTUMESC=0), l'épaisseur de la protection est supposée constante quelque soit la température.

Les températures ainsi calculées dans l'élément métallique sont imprimées dans le fichier « TFILE.OUT » et sont stockées dans les tableaux de matrices VTPC0 et VTPC selon que l'élément est non protégé (JPROEC=0) ou protégé (JPROEC=1). Comme entrées de données, la subroutine FTEMP nécessite la définition des variables suivantes :

- AM/V : facteur de massivité de l'élément (AM : périmètre de la section du profilé exposée au feu ; V : aire de la section)
- KT : nombre d'incrément de temps
- DTE : valeur de l'incrément de temps (en seconde)
- KFIRE : Type de scénario de feu (=1 : iso834 ; =2 : hydrocarbure ; =3 : paramétrique)

Si KFIRE = 3, il faut spécifier les caractéristiques suivantes du compartiment:

- TLIM : temps limite du scénario du feu (=5/12 h : accroissement lent du feu; =1/3h : feu moyen ; =1/4h : accroissement rapide du feu)
- QFD: charge calorifique (MJ/m² du plancher
- AF : Surface du plancher (m²)
- AT : Surface totale des faces du compartiment (m²)
- HEQ : Hauteur équivalente des ouvertures (m) du compartiment
- AV : Surface des ouvertures (m²) du compartiment
- BFAC : Coefficient de transmission calorifique (Ws^{0.5}/m²K)

S'il s'agit en outre d'un élément en présence d'une protection (JPROEC=1), il faut encore définir les caractéristiques de la protection à savoir :

- LANDAP : conductivité thermique de la protection (W/m.°K)
- CCP : chaleur spécifique de la protection (J/kg.K)
- RHOP : Masse volumique de la protection (kg/m³)
- DP0 : Epaisseur initiale de la protection (mm)

3-3-4-5 Exemples d'illustration

- Exemple #1 :

Soit le profilé HE200A chauffé sur l'ensemble de ses quatre faces par un scénario de feu normalisé ISO834 comme montré sur la figure 3-16. Une protection matérielle ayant une conductivité thermique constante de 0.20W/mK est supposée projetée sur une épaisseur $d_p = 20$ mm. Quelle est la température après une 1h d'exposition au feu ? Comparer les résultats si la protection est disposée en caisson en utilisant les résultats du tableau 3-4 et représenter alors les courbes des augmentations des températures obtenues dans le profilé.

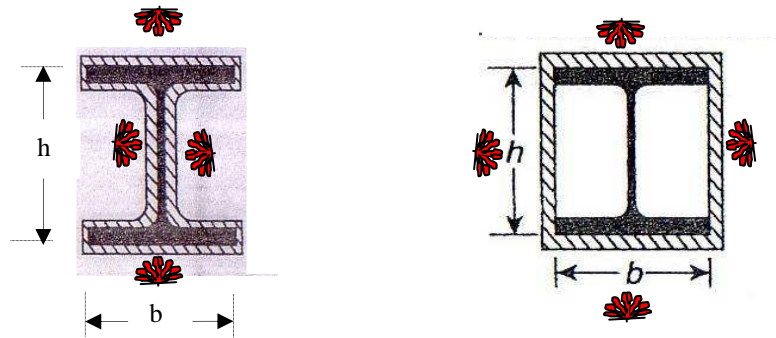


Figure 3-16 : Systèmes de protection par projection et par caisson
a) Projetée b) caisson

- Cas où la protection est projetée (fig. 3-16a : $b=0.30$ cm ; $h=0.35$ cm)

- $A_m = 2h+4b = 2 \times 0.35 + 4 \times 0.30 = 1.90$ m
- $V = 142.8 \text{ cm}^3 = 0.01428 \text{ m}^3$ (Utilisation de la table des profilés, [23])
- $k_p = \frac{\lambda_p A_p}{d_p V} = \left(\frac{0.20}{0.020}\right) \times \left(\frac{1.90}{0.01438}\right) = 1331 \text{ W./m}^2\text{K}$

Le tableau 3-4 en effectuant une interpolation linéaire entre 520°C pour $k_p = 1200$ et 650°C pour $k_p = 2000$ conduit à la température $\Theta = 541^\circ\text{C}$.

- Cas où la protection est en caisson (fig. 3-16b : $b=0.30$ cm ; $h=0.35$ cm)

- $A_m = 2h+2b = 2 \times 0.35 + 2 \times 0.30 = 1.30$ m
- $k_p = \left(\frac{0.20}{0.020}\right) \times \left(\frac{1.30}{0.01438}\right) = 909 \text{ W./m}^2\text{K}$
- en interpolant entre 414°C pour $k_p = 800$ et 520°C pour $k_p = 1200$, le tableau 3-4 nous donne la température $\Theta = 443^\circ\text{C}$.

Les résultats sont récapitulés dans le tableau 3-5 comparés à ceux obtenus par le sous programme FTEMP. A la figure 3-17, nous illustrons l'évolution en fonction du temps de la température dans le profilé métallique selon les deux types de protection considérées. Nous remarquons que le pourcentage d'erreur entre les résultats donnés par la forme tabulée (tab. 3-4) et la formulation simplifiée (équ. 3-23b), pour $t = 1$ h, ne dépasse guère 1.5%. Par ailleurs, la protection en forme de caisson affiche des températures beaucoup moins élevées, de 20% environ, par rapport à la protection projetée. C'est en raison sans aucun doute du facteur de

massivité élevée de la protection projetée ($A_m/V = 133 \text{ m}^{-1}$) en comparaison à celui de la protection en caisson qui est de l'ordre de 91 m^{-1} . Notons que la protection utilisée, pour des fins de simulation numérique avec le sous programme FTEMP, est de type vermiculite (ou perlite) avec ciment [9] dont les caractéristiques physiques considérées sont : $\lambda_p = 0.20 \text{ W/mK}$; $c_p = 1200 \text{ J/kg.K}$; $\rho_p = 800 \text{ kg/m}^3$. Par ailleurs, l'incrément de temps (Δt) et le coefficient de l'émissivité globale (ϵ_{res}) utilisées sont respectivement de 1 seconde et 0.7.

Tableau 3-5: Comparaison des résultats entre la protection projetée et la protection en caisson

Protection	$\Theta, ^\circ\text{C}$ (tab. 3-4)	$\Theta, ^\circ\text{C}$ (équ. 3-23b)	$\Theta, ^\circ\text{C}$ (équ. 3-23a*)
Projetée	541	548	420
Caisson	443	448	325

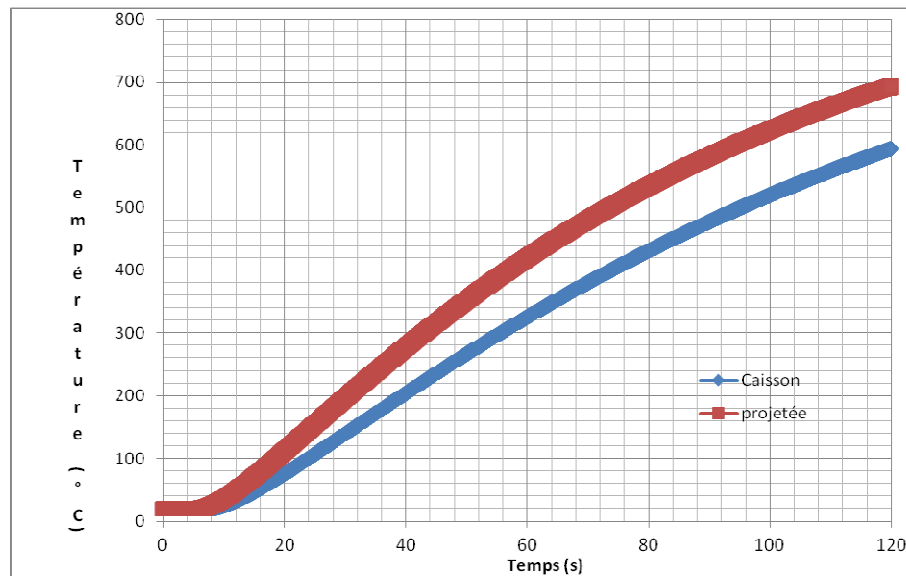


Figure 3-17: Evolution de la température en fonction du temps sous ISO834-protection par caisson et par projection

- Exemple #2

Reprenons le profilé HE200A de l'exemple précédent chauffé toujours sur quatre faces et muni respectivement des deux mêmes protections thermiques à savoir par projection et par caisson. Analysons la réponse thermique du profilé en supposant maintenant un scénario de feu naturel à ventilation contrôlée tel que défini dans la section 2-4-3-2-B-exemple 1.

Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 3-18 en comparant les températures enregistrées suite à une exposition au feu de 160 min (2h40) selon que le profilé est thermiquement protégé par caisson ou par projection. Nous remarquons que les températures enregistrées dans le profilé métallique dépendent également de sa massivité qui désigne le quotient de la masse linéique par la surface exposée linéique. Dans la phase d'échauffement, il est possible de noter que plus le facteur de massivité est grand, plus la surface affectée à l'échauffement sera rapide. De ce fait, en limitant ainsi les surfaces métalliques exposées, on diminue la surface d'échange et donc la diffusion de la chaleur dans toute la structure. Ce qui n'est pas le cas, cependant, dans la phase de refroidissement où les températures obtenues par caisson semblent être plus importantes, malgré son facteur de massivité faible. L'explication plausible serait due à la nature de la protection elle-même où les parois des caissons deviennent des sources de chaleurs supplémentaires qui font accroître les valeurs des températures dans le profilé métallique.

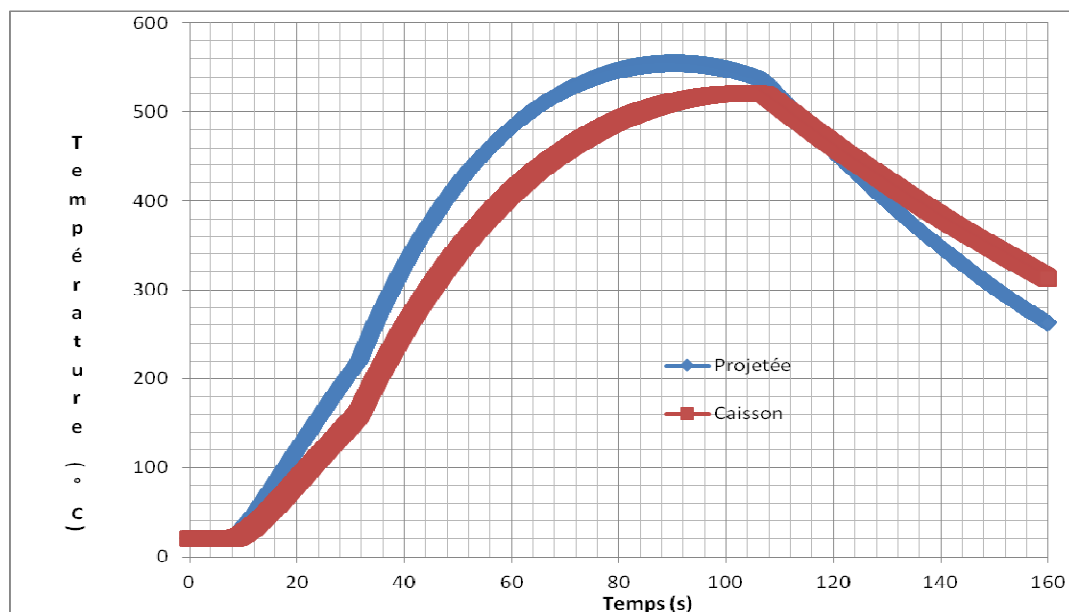


Figure 3-18: Evolution de la température en fonction du temps sous feu naturel à ventilation contrôlée- protection par caisson et par projection

CHAPITRE 4

BASES THEORIQUES DE CALCUL DE LA REPONSE STRUCTURALE EN SITUATION D'INCENDIE

4-1 Généralités

Dans ce chapitre, nous allons rappeler brièvement les développements théoriques de base de la méthode de calcul de la réponse structurale des structures métalliques en situation d'incendie. La procédure incrémentale du principe des travaux virtuels sera d'abord utilisée afin de dériver les équations générales d'équilibre d'un élément de poutre-colonne. Suivi ensuite de la discrétisation par éléments finis des équations d'équilibre incrémentales obtenues en se basant sur un élément fini de poutre-colonne classique d'Euler-Bernoulli (classe C^1). L'élément doit être de forme prismatique à l'intérieur duquel s'exercent un effort normal et un moment fléchissant. L'effet de l'effort tranchant sera ainsi complètement négligé. Les déplacements sont choisis comme inconnus du problème. Pour de plus amples renseignements, nous renvoyons directement le lecteur aux références [20,24].

Dans ce travail, cette méthode de calcul sera appliquée à l'analyse d'ossatures formées de poteaux- poutres en acier qui se déforment dans un plan avec les autres particularités suivantes :

- La structure plane qu'on montre sur la figure 4-1 est subdivisée en éléments droits ayant deux nœuds à ses extrémités i et j et chaque élément est supposé de section transversale constante qui doivent être symétriques par rapport au plan de flexion afin de ne pas prendre en considération l'effet biaxial.
- Les charges d'origine mécanique sont appliquées directement aux nœuds.
- Les déplacements et les déformations doivent être petits.

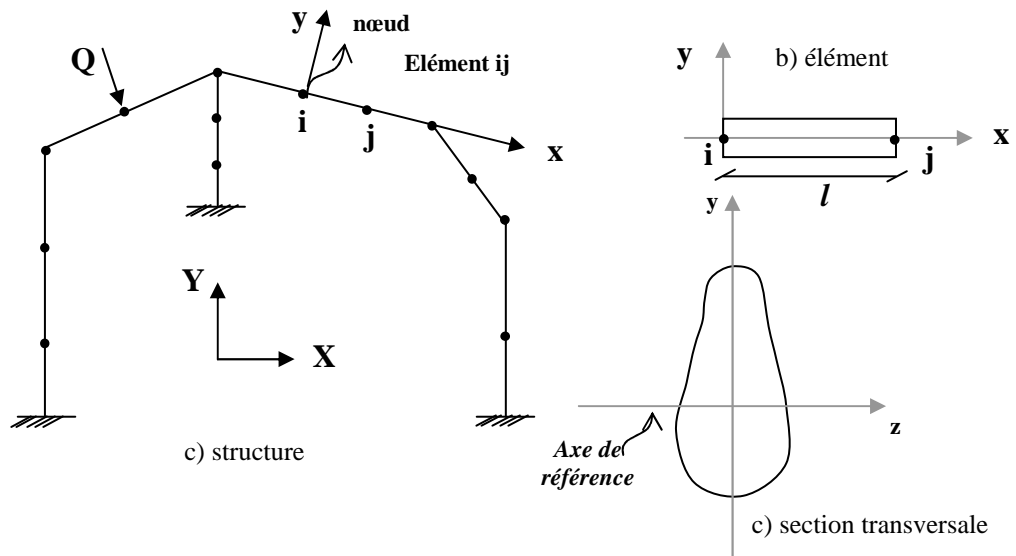


Figure 4-1 : Schématisation d'une ossature en poteaux-poutres

Les principales hypothèses admises sont les suivantes :

- Sections planes au cours de leur déformation (hypothèse de Navier-Bernoulli sur la planéité des sections) ;
- Eléments supposés droits, négligeant ainsi l'effet de la courbure éventuelle de l'élément ;
- Comportement de l'acier admis non linéaire ;
- Sont considérées que les déformations dues à l'effort normal et au moment fléchissant négligeant ainsi complètement l'effet de l'effort tranchant.

4-2 Formulation de l'équation d'équilibre incrémentale de la structure

Soient C_0 , C_n , C_{n+1} les positions d'équilibre de l'élément comme montré sur la figure 4-2 dans les configurations respectivement initiales, à l'étape n et à l'étape voisine $n + 1$. Nous associons à cet élément un repère local cartésien passant par les deux nœuds de ses extrémités. Ce système de coordonnées caractéristiques de la formulation corotationnelle suit l'élément au cours de sa déformation par rapport auquel sont exprimées les déformations et les contraintes engendrées dans l'élément au cours de sa déformation. De ce fait, le mouvement de corps rigide sera ignoré lorsqu'on réfère les déplacements de cet élément au système local de coordonnées.

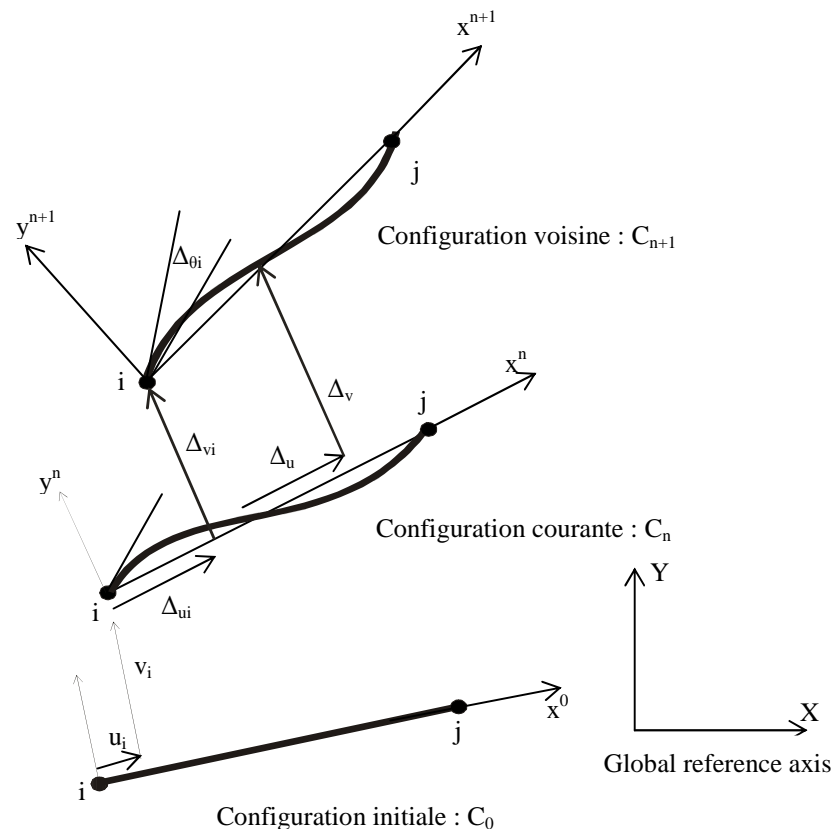


Figure 4-2 Description du mouvement de l'élément au cours de la déformation

4-2-1 Description cinématique du mouvement d'un élément

Considérons l'élément de la poutre représentée à la figure 4-3 qu'on exprime par rapport à son système de référence local pour une configuration donnée. La géométrie montre que le champ de grands déplacements d'un point quelconque P de coordonnées $\langle x, y \rangle$ à un autre point P' de coordonnées $\langle x+u, y+v \rangle$ peut se mettre sous la forme:

$$u = u_0 - y \sin \alpha_0 \quad (4- 1a)$$

$$v = v_0 - y(1 - \cos \alpha_0) \quad (4- 1b)$$

où : $u_0 = u_0(x)$ et $v_0 = v_0(x)$ sont les composantes du déplacement du point Q situé sur l'axe moyen de la poutre et $\alpha_0(x)$ est la grande rotation de la normale Qp.

Si on fait maintenant l'hypothèse des rotations modérés (α_0 petit), on peut simplifier la cinématique (4 - 1) par l'approximation: $\sin(\alpha_0) \approx \alpha_0$ et $\cos(\alpha_0) \approx 1$, on aura :

$$u = u_0 - y\alpha_0 \quad (4- 2a)$$

$$v = v_0 \quad (4- 2b)$$

Si on fait l'hypothèse supplémentaire que les normales restent perpendiculaires à l'axe en configuration déformée, on aura une poutre de Bernoulli pour laquelle les rotations sont petites, et on a: $\text{tg}(\alpha_0) = \alpha_0 = \frac{\partial v_0}{\partial x} (= v'_0)$. On obtient finalement le champ de déplacement d'un point quelconque de la poutre connu en théorie classique linéaire sous la forme:

$$u = u_0 - yv'_0 \quad (4- 3a)$$

$$v = v_0 \quad (4- 3b)$$

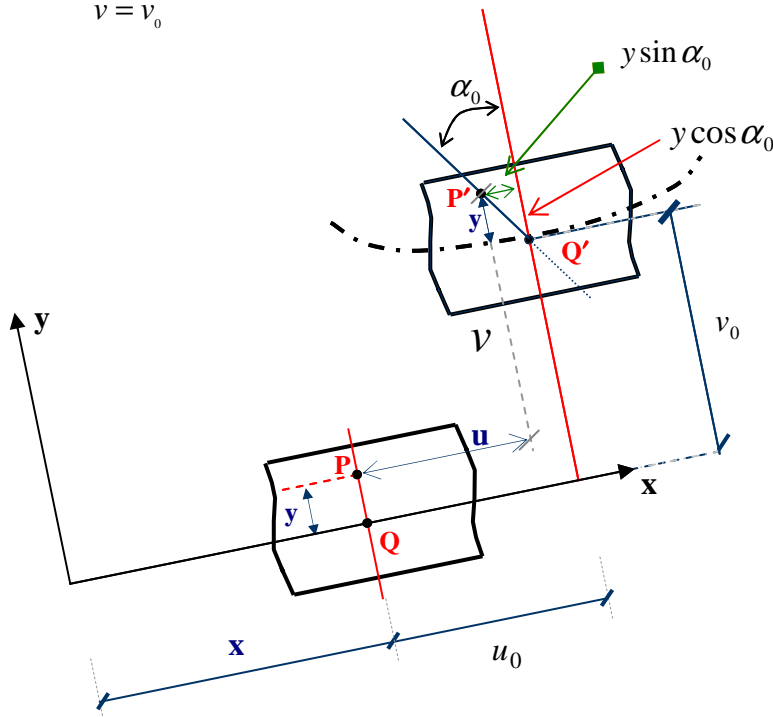


Figure 4-3 Déplacement dans un élément de poutre-colonne

4-2-2 Expression de la déformation dans le cas particulier d'une poutre-colonne

La déformation axiale en un point quelconque P d'une poutre s'écrit sous la forme:

$$\varepsilon_x = u' + \frac{1}{2} \left[(u')^2 + (v')^2 \right] \quad (4-4)$$

Comme on est dans un cas à faible déformation et à petit déplacement, on peut négliger les termes quadratiques. En tenant compte des expressions (4-3), la relation (4-4) devient :

$$\varepsilon_x = u'_0 - yv''_0 \quad (4-5)$$

Cette relation nous donne la déformation de n'importe quel point de la section transversale de l'élément dans le cas des petits déplacements et petites déformations. La variation de déformation $\delta\varepsilon_x$ caractérisant la déformation d'une configuration courante à une autre configuration voisine comme indiquée sur la figure 4-2, est obtenue à partir de la relation (4-5), soit:

$$\delta\varepsilon_x = \delta u'_0 - y\delta v''_0 \quad (4-6)$$

4-2-3 Expression incrémentale du principe des travaux virtuels

Soit l'expression incrémentale du principe des travaux virtuels suivante qui traduit l'équilibre de la structure à l'étape n+1:

$$\delta\Delta w = \int_V \Delta\sigma_x \delta(\Delta\varepsilon_x) dV - \left\langle Q^{n+1} \right\rangle \{ \delta(\Delta u) \} - \int_V \sigma_x^n \delta(\Delta\varepsilon_x) dV \quad (4-7)$$

où $\Delta\varepsilon_x$: incrément de déformation en passant de la configuration n à l'étape n + 1 ;
 $\Delta\sigma_x$: incrément correspondant de contrainte associé à $\Delta\varepsilon_x$ et Δ : opérateur différentiel.
 Cet incrément est associé aux incréments de déplacements par la manière suivante, par analogie à la relation (4-6) :

$$\Delta\varepsilon_x = \Delta u'_0 - y\Delta v''_0 \quad (4-8)$$

La variation virtuelle de (4-8) nous donne :

$$\delta(\Delta\varepsilon_x) = \delta(\Delta u'_0) - y\delta(\Delta v''_0) \quad (4-9)$$

Introduisons maintenant une loi de comportement constitutive du matériau (acier) reliant l'incrément de contrainte à l'incrément de déformation. Elle peut s'écrire de manière générale sous la forme :

$$\Delta\sigma_x = F(\Delta\varepsilon_x, \dot{\Delta\varepsilon}_x, \Delta T, \dots) \quad (4-10)$$

l'indice supérieur ($\dot{}$) indique une quantité dépendante du temps. Admettons la loi simplifiée, type tangentielle standard suivante :

$$\Delta\sigma_x = E_T(\Delta\varepsilon_x - \Delta\varepsilon_{th}) \quad (4-11)$$

où : E_T : module d'élasticité du matériau à l'étape n ; $\Delta\varepsilon_x$: incrément de déformation mécanique (totale) ; $\Delta\varepsilon_{th}$: incrément de déformation d'origine thermique.

A l'aide de cette dernière, l'équation (4-7) devient par conséquent:

$$\int_V \Delta\varepsilon_x E_T \delta(\Delta\varepsilon_x) dV = \left\langle \overset{n+1}{Q} \right\rangle \{\delta\Delta u\} - \int_V \sigma_x^n \delta(\Delta\varepsilon_x) \delta V + \int_V \Delta\varepsilon_{th} E_T \delta\Delta\varepsilon_x dV \quad (4-12)$$

C'est l'expression incrémentale recherchée du principe des travaux virtuels de la structure dont le dernier terme du second membre représente les charges d'origine thermiques.

4-3 Discrétisation par éléments finis

On remplace d'abord la relation (4-12) par une somme de forme intégrale équivalente sur chaque élément de telle façon que :

$$\delta(\Delta \bar{w}) = \sum_e \delta(\Delta \bar{w}^e) = 0 \quad (4-13)$$

On introduit ensuite sur chaque élément une approximation des variables du problème, dans notre cas les déplacements, afin de passer d'une formulation variationnelle à un système d'équations algébriques. L'approximation s'établit à partir des variables nodales de l'élément fini en moyennant un choix approprié de fonctions d'interpolation caractérisant le problème.

4-3-1 Choix des fonctions d'interpolation

Mentionnons tout d'abord que le choix des caractéristiques géométriques d'un élément est généralement influencé par la nature du problème à traiter, par le degré des polynômes représentant les fonctions d'interpolation à considérer. Elles contribuent ainsi à satisfaire aux exigences d'une formulation globale relativement facile justement recherchée en analyse non linéaire. En conséquence, l'élément que nous utilisons pour la discrétisation de la structure est un élément rectiligne à une seule dimension, liant deux nœuds disposés à ses deux extrémités et ayant trois degrés de liberté par nœud. Nous allons choisir le long de cet élément une variation linéaire du déplacement axial et une variation cubique du déplacement latéral.

Pour un élément d'extrémités i et j (fig. 4-4), le vecteur des déplacements nodaux est :

$$\{q_n\}^T = \langle u_i, v_i, \theta_i, u_j, v_j, \theta_j \rangle \quad (4-14a)$$

et le vecteur associé à l'incrément de ces déplacements nodaux :

$$\{\Delta q_n\}^T = \langle \Delta u_i, \Delta v_i, \Delta \theta_i, \Delta u_j, \Delta v_j, \Delta \theta_j \rangle \quad (4-14b)$$

Le champ de déplacement d'un point quelconque situé sur l'axe de référence, ainsi que son incrément sont donnés par :

$$\begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{Bmatrix} = [N] \{q_n\} \quad (4-15a)$$

et

$$\begin{Bmatrix} \Delta u_0 \\ \Delta v_0 \end{Bmatrix} = [N] \{\Delta q_n\} \quad (4-15b)$$

$[N]$: étant les matrices des fonctions d'interpolation exprimées dans le repère local de coordonnées locales cartésiennes (x) liées à l'élément. Cependant, il est possible de les exprimer ainsi que leurs dérivées, dans le repère local de coordonnées normalisées (ζ) par les relations suivantes:

$$\begin{aligned}
N_{u_i} &= \frac{1}{2}(1 - \xi) & N_{v_j} &= \frac{1}{4}(2 + 3\xi - \xi^3) & N_{u_j} &= \frac{1}{2}(1 + \xi) \\
N_{\theta_i} &= \frac{l}{8}(1 - \xi - \xi^2 + \xi^3) & N_{v_i} &= \frac{1}{4}(1 - \xi^2)(1 - \xi) & N_{\theta_j} &= \frac{l}{8}(-1 - \xi + \xi^2 + \xi^3) \\
N'_{u_i} &= -\frac{1}{l} & N'_{u_j} &= \frac{1}{l} & N'_{v_j} &= \frac{3}{2l}(1 - \xi^2) & N'_{v_i} &= \frac{3}{2l}(-1 + \xi^2) \\
N'_{\theta_i} &= \frac{1}{4}(-1 - 2\xi + 3\xi^2) & N'_{\theta_j} &= \frac{1}{4}(-1 + 2\xi + 3\xi^2) & N''_{u_i} &= 0 \\
N''_{u_j} &= 0 & N''_{v_j} &= -\frac{6}{l^2}\xi & N''_{\theta_i} &= \frac{1}{l}(-1 + 3\xi) & N''_{v_i} &= \frac{6}{l^2}\xi & N''_{\theta_j} &= \frac{1}{l}(1 + 3\xi)
\end{aligned} \tag{4-16}$$

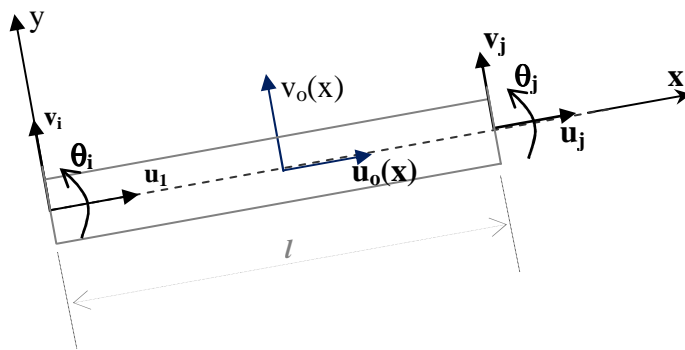


Figure 4-4 : Représentation discrétisée de l'élément fini de poutre-colonne

où la relation entre la coordonnée cartésienne x ($-\frac{l}{2} \leq x \leq \frac{l}{2}$) et normalisée ($\zeta - 1 \leq \zeta \leq +1$) est définie de la façon suivante :

$$\xi = \frac{2x}{l} - 1 \tag{4-17}$$

4-3-2 Expression discrétisée incrémentale du principe des travaux virtuels élémentaires

On obtient la forme intégrale discrétisée ($\delta\Delta\bar{w}^e$) en introduisant dans l'expression (4-12) les approximations sur l'élément de $\langle u \rangle, \langle \Delta u \rangle$ et de $\langle \delta\Delta u \rangle$. On peut alors établir une forme explicite élémentaire en fonction de la matrice de rigidité tangente et du vecteur des sollicitations nodales.

4-3-2-1 Dérivées des déplacements en fonction des variables nodales

La dérivée première par rapport à x de chacune des fonctions de déplacement et leurs incréments [20] conduisent à :

$$\begin{Bmatrix} u'_o \\ v'_o \end{Bmatrix} = [N, x] \{q_n\} \quad (4-18a)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta u'_o \\ \Delta v'_o \end{Bmatrix} = [N, x] \{\Delta q_n\} \quad (4-18b)$$

avec :

$$[N, x] = \begin{bmatrix} N'_{u_i} & 0 & 0 & N'_{u_j} & 0 & 0 \\ 0 & N'_{v_i} & N'_{\theta_i} & 0 & N'_{v_j} & N'_{\theta_j} \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

Concernant les dérivées secondes, la relation (4-18b) donne d'une manière explicite :

$$\begin{Bmatrix} \Delta u''_o \\ \Delta v''_o \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N''_{u_i} & 0 & 0 & N''_{u_j} & 0 & 0 \\ 0 & N''_{v_i} & N''_{\theta_i} & 0 & N''_{v_j} & N''_{\theta_j} \end{bmatrix} \{\Delta q_n\} \quad (4-20)$$

4-3-2-2 Déformation en fonction des variables nodales

En introduisant les expressions (4-16) à (4-20) dans la relation (4-8), nous aurons pour la déformation :

$$\Delta \varepsilon_x = [B] \{\Delta q_n\} \quad (4-21)$$

avec :

$$[B] = \langle N'_{u_i}, r-yN'_{v_i}, r-yN'_{\theta_i}, N'_{u_j}, r-yN'_{v_j}, r-yN'_{\theta_j} \rangle \quad (4-22)$$

4-3-2-3 Matrice de rigidité tangente et le vecteur des sollicitations nodales élémentaires

La variation de $\delta(\Delta \varepsilon_x)$ donnée par l'expression (4-9) compte tenu des relations (4-21) et (4-22) conduit à :

$$\delta(\Delta \varepsilon_x) = [B] \{\delta(\Delta q_n)\} \quad (4-23)$$

$$\text{où } \delta\langle \Delta q_n \rangle = \langle \delta \Delta u_i, \delta \Delta v_i, \delta \Delta \theta_i, \delta \Delta u_j, \delta \Delta v_j, \delta \Delta \theta_j \rangle \quad (4-24)$$

L'application de l'expression $\delta(\Delta w^e)$ compte tenu des relations précédentes (4-23) et (4-24) donnerait, $\delta(\Delta q_n)$ étant arbitraire, conduirait finalement à :

$$[k_T] \{\Delta q_n\} = \{\Delta f\} \quad (4-25)$$

Cette relation est équivalente à six (6) équations algébriques traduisant les conditions d'équilibre d'un élément sous un ensemble de sollicitations thermiques et mécaniques où k_T est la matrice de rigidité tangente élémentaire dérivée en [20] et $\{\Delta f\}$ est le vecteur de charge définis comme suit :

$$\{\Delta f\} = \{Q\}^{n+1} - \{f_c\} + \{\Delta F_{th}\} \quad (4-26)$$

C'est un vecteur de rang (6 x 1) qu'on décompose de la manière suivante:

- $\{Q\}^{n+1}$: Vecteur des charges appliquées directement aux nœuds à l'étape (n+1) suivant le degré de liberté (actif) correspondant. Notons en fin l'incrément de charge $\{\Delta Q\}$, on peut écrire : $\{Q\}^{n+1} = \{Q\}^n + \{\Delta Q\}$.
 - $\{f_c\}$: Vecteur des charges non balancées :
- $$\{f_c\} = \int_V \sigma_x^n [B]^T dV \quad (4-27)$$

où σ_x^n représente la contrainte engendrée à l'étape n, soit explicitement :

$$\begin{aligned} \{f_c\}_1 &= -\frac{1}{l} \int_V \sigma_x^n dV ; \{f_c\}_2 = \int_V (-yN_{v_i}''') \sigma_x^n dV ; \{f_c\}_3 = \int_V (-yN_{\theta_i}''') \sigma_x^n dV \\ \{f_c\}_4 &= -\{f_c\}_1 ; \{f_c\}_6 = \int_V (-yN_{\theta_j}''') \sigma_x^n dV ; \{f_c\}_5 = -\{f_c\}_2 \\ - \{F_{th}\} &: \text{vecteur des charges thermiques} \end{aligned}$$

$$\{F_{th}\} = \int_V \Delta \varepsilon_{th} E_T [B]^T dV \quad (4-28a)$$

où $\Delta \varepsilon_{th}$ est la dilatation thermique d'une fibre de l'élément qu'on prend égale au coefficient de dilatation thermique du matériaux (Ω) multiplié par la variation de température (ΔT) de la fibre correspondante ; soit d'une manière explicite :

$$\begin{aligned} \{\Delta F_{th}\}_1 &= -\frac{1}{l} \int_V E_T \Delta \varepsilon_{th} dV ; \{\Delta F_{th}\}_2 = \int_V E_T (-yN_{v_i}''') \Delta \varepsilon_{th} dV ; \{\Delta F_{th}\}_4 = -\{\Delta F_{th}\}_1 \\ \{\Delta F_{th}\}_3 &= \int_V E_T (-yN_{\theta_i}''') \Delta \varepsilon_{th} dV ; \{\Delta F_{th}\}_5 = -\{\Delta F_{th}\}_2 ; \{\Delta F_{th}\}_6 = \int_V E_T (-yN_{\theta_j}''') \Delta \varepsilon_{th} dV \end{aligned} \quad (4-28b)$$

4-3-3 Assemblage de la forme globale discrétisée

La technique d'assemblage caractéristique de la méthode des éléments finis, permet de passer des matrices et vecteurs élémentaires aux matrices et aux vecteurs globaux. On écrit cette opération générale d'après la relation (4-13) sous la forme :

$$\sum_{e=1}^{NELT} [k_T] \{\Delta q_n\} = \{\Delta f\} \quad (4-29a)$$

$$\equiv [K_T] \{\Delta q_N\} = \{\Delta F\} \quad (4-29b)$$

où :

- $\langle \Delta q_N \rangle$: représente le vecteur contenant les incréments de déplacements de tous les nœuds. C'est un vecteur de $1 * N$ ($N = 3 * NNT$) où NNT est le nombre total de nœuds. NELT est le nombre total des éléments. Il s'écrit pour un élément (fig. 4-4) :

$$\{\Delta q_n\}^T = \langle \Delta u_i, \Delta v_i, \Delta \theta_i, \Delta u_j, \Delta v_j, \Delta \theta_j \rangle \quad (4-30)$$

- $[K_T]$ est la matrice de rigidité tangente globale et $\{\Delta F\}$ est le vecteur des sollicitations globales contenant les incréments de charge ΔQ

Cependant, on ne peut directement travailler avec les matrices élémentaires $[k_T]$ et le vecteur élémentaire $\{\Delta f\}$, du fait que les variables nodales de l'élément sont définies dans le système local. Une transformation d'axes doit donc être effectuée tenant compte de l'orientation des axes locaux à l'étape n par rapport aux Axes globaux [20]. Les matrices élémentaires par rapport aux axes globaux seront enfin assemblées en une matrice de rigidité tangente $[K_T]$. Les composantes des forces nodales $\{\Delta f\}$ devront subir, elles aussi, une transformation avant d'être assemblées en un vecteur global $\{\Delta F\}$.

4-3-4 Détermination du module d'élasticité tangent et de la contrainte

Afin de déterminer les matrices tangentes et les vecteurs élémentaires, E_T et σ_n doivent être connus ; en d'autres termes, la déformation et de son incrément en tout point de la section doivent être a priori connus. Il s'ensuit qu'il est indispensable de déterminer les déplacements relatifs aux axes locaux en connaissant les déplacements par rapport aux axes globaux.

4-3-4-1 Calcul des déplacements locaux

Les relations nécessaires à cette fin peuvent être établies en se référant aux figures 4-6 et (4-7).

$$u_i = U_i \cos \alpha + V_i \sin \alpha \quad (a)$$

$$\theta_i = \theta_i^T - \beta \quad (b)$$

$$u_j = U_j \cos \alpha + V_j \sin \alpha - l_C (1 - \cos \beta) \quad (c) \quad (4-31)$$

$$\theta_j = \theta_j^T - \beta \quad (d)$$

$$v_i = v_j = 0 \quad (e)$$

où: $\beta (= \alpha - \alpha_0)$: angle de rotation rigide de l'élément ; $(\cos \alpha, \sin \alpha)$: cosinus directeurs que fait la membrane déformée avec les axes globaux (X,Y) ; l_C : longueur courante de l'élément , soit à l'étape (n) ; α_0 : Angle initial formé par l'élément et l'axe global X ; α : angle formé par l'élément , à l'étape n, et l'axe global X.

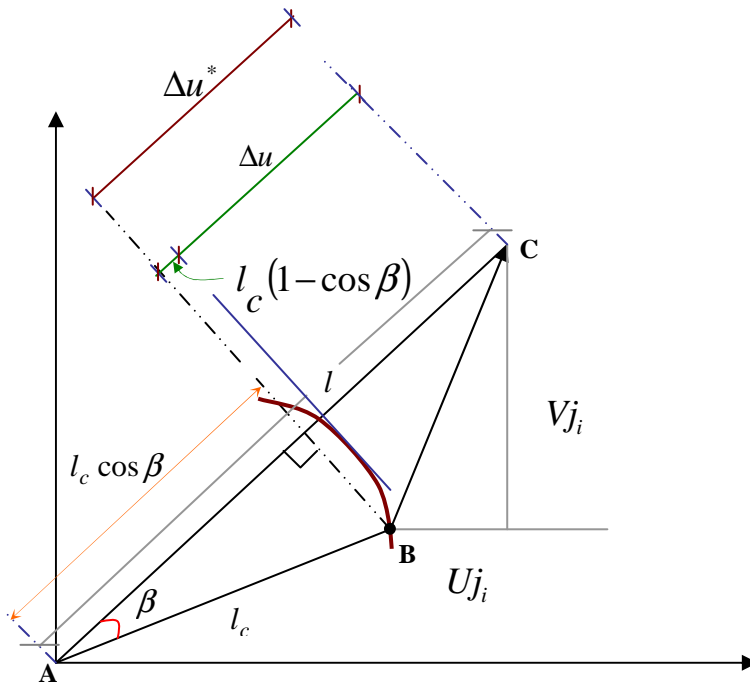


Figure 4-6: Influence de l'angle de rotation rigide sur la déformation

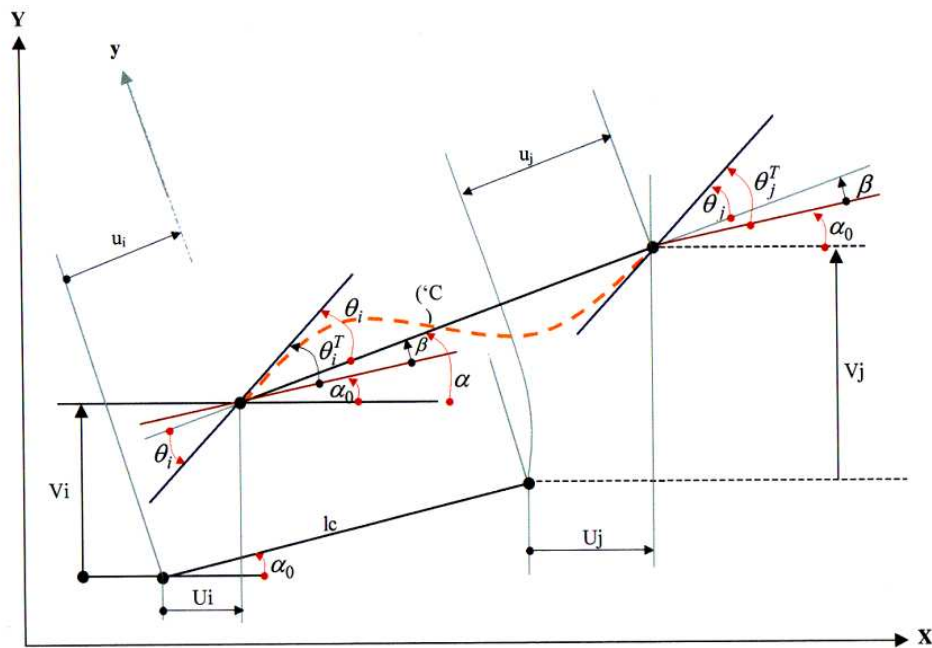


Figure 4-7 : Différents déplacements de l'élément fini de poutre-colonne

4-3-4-2 Calcul du module d'élasticité tangent et de la contrainte

Ayant calculé les incréments de déplacements locaux aux nœuds d'un élément ainsi que les déplacements totaux ; on peut facilement, pour un point donné appartenant à cet élément, déterminer la déformation totale et l'incrément de déformation de ce même point.

La déformation totale ainsi que l'incrément de déformation à étape de calcul n sont :

$$\mathcal{E}_n = \mathcal{E}_0 - y v_0'' \quad (4-32a)$$

$$\Delta \mathcal{E}_n = \Delta \mathcal{E}_0 - y \Delta v_0'' \quad (4-32b)$$

où d'après les relations (4-5) et (4-8) : $\mathcal{E}_0 = u_0'$ et $\Delta \mathcal{E}_0 = \Delta u_0'$ représentent les déformations axiale et de son incrément au niveau de l'axe de référence (l'axe x) de l'élément. Si on note par ailleurs par \mathcal{E}_t et $\Delta \mathcal{E}_t$ respectivement la déformation totale et son incrément dus au gradient de température, la déformation totale instantanée sera alors :

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_n - \mathcal{E}_t \quad (4-33a)$$

et de son incrément instantané :

$$\Delta \mathcal{E}_i = \Delta \mathcal{E}_n - \Delta \mathcal{E}_t \quad (4-33b)$$

Le calcul du module d'élasticité tangent E_T ainsi que la contrainte σ_n est effectué dans le cas chargement seulement (fig. 4-8) soit en moyennant la valeur de la déformation \mathcal{E}_i , on tire la valeur du module tangent E_T ainsi que la valeur de la contrainte σ_n à partir des relations mathématiques données à la figure 3-2 à l'instant t d'exposition au feu.

4-3-5 Méthodes d'implémentation numériques

La mise en œuvre effective de la méthode des éléments finis nécessite l'utilisation de méthodes numériques variées afin de construire les matrices et vecteurs élémentaires et les principales méthodes numériques employées seront brièvement décrites. Tout d'abord, les méthodes d'intégration numériques de Gauss et de Simpson qui permettent de déterminer les termes des matrices et vecteurs élémentaires seront exposées. Sera décrit ensuite le choix de la méthode de solution de systèmes d'équations linéaires.

4-3-5-1 Intégration numérique par les méthodes de Gauss et Simpson

La complexité des fonctions intervenant dans le calcul des matrices et vecteurs élémentaires (4-21) à (4-28) nous oblige à recourir à l'intégration numérique sur tout le domaine de définition de l'élément. Deux méthodes d'intégration sont essentiellement employées dans ce travail à savoir la méthode de Gauss pour l'intégration sur la longueur de l'élément et la méthode de Simpson pour l'intégration sur sa section transversale.

Sur la longueur de l'élément, on évalue l'intégrale par la quadrature de Gauss ; cette méthode est préférée à celle de Simpson (ou de Newton-Cotes), car avec n points d'intégration, elle intègre exactement un polynôme de degré (2n-1) au lieu d'un polynôme de degré (n-1). Notons ici que le polynôme à intégrer sur la longueur de l'élément est de degré 4. Une intégrale I_G , sur un domaine unidimensionnel, se calcule par la méthode de Gauss comme suit :

$$I_G = \int_{-1}^1 f(\xi) d\xi = \sum_{i=1}^n \alpha_i f(r_i) \quad (4-34)$$

avec α_i : facteurs de pondération ; r_i : coordonnées normalisées d'un point de la quadrature de Gauss. La précision d'une intégrale calculée par la méthode de Gauss dépend essentiellement du nombre de points d'intégration n . Dans le cas de la présente étude, les fonctions à intégrer pour déterminer les matrices élémentaires données tangentes, sont de degré 4 en ζ ; par conséquent, le nombre n de points de Gauss pour effectuer une intégrale « exacte » est de 2 (figure 4-8).

Par contre, sur la section de l'élément, la quadrature de Simpson a été choisie, vu que sur la section il s'agit de déterminer E_T et σ_x en des points choisis et qu'il s'avère nécessaire d'utiliser des points spécifiques comme points d'intégration, par exemple les points extrêmes du domaine de l'intégration. Ainsi, il est possible de tenir compte du début de la plastification et d'éviter de surestimer les matrices de rigidité et vecteurs forces élémentaires, sous estimer les déplacements, et par suite, obtenir la ruine de la structure pour un chargement mécanique plus important ou pour un temps d'exposition au feu plus long. Une intégrale I_S , sur un domaine unidimensionnel, se calcule par la méthode de Simpson comme suit :

$$I_S = \int_a^b f(y) dy = \frac{dh}{3} [f(y_1) + 4f(y_2) + 2f(y_3) + 4f(y_4) + 2f(y_5) + \dots + 4f(y_{2m}) + f(y_{2m+1})] \quad (4-35)$$

avec m : le nombre de molécules de Simpson ; dh : $(b-a)/2m$; y_i : $a+(i-1)dh$; $i = 1, 2m+1$. La méthode de Simpson consiste à passer une parabole par les trois points de chaque molécule puis l'intégrer ; la précision de cette intégrale dépend du choix du nombre de molécules de Simpson. L'intégrale sur une section située en un point de Gauss relatif à l'intégration le long de l'élément (fig. 4-9) est effectuée en subdivisant la section en parties rectangulaires (fig. 4-10). Chacune de ses parties est divisée en tranches (tranches de Simpson), de dimensions égales, dont le nombre est préalablement fourni par l'utilisateur pour chacune de ces parties (fig. 4-11).

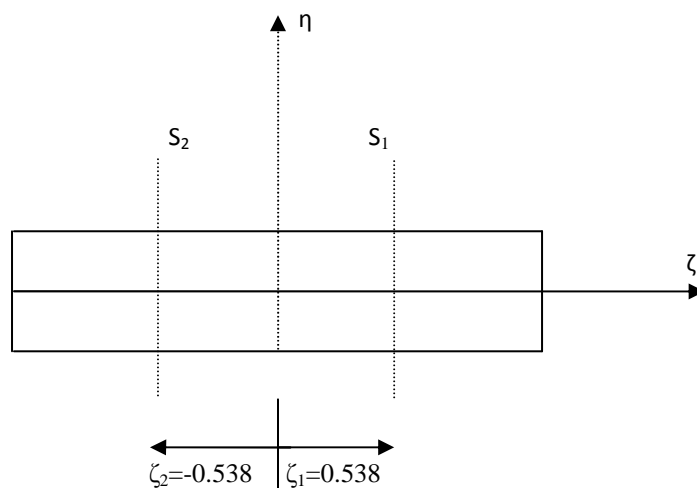


Figure 4-9 : Nombre de points de Gauss considérés dans un élément ($n = 2$)

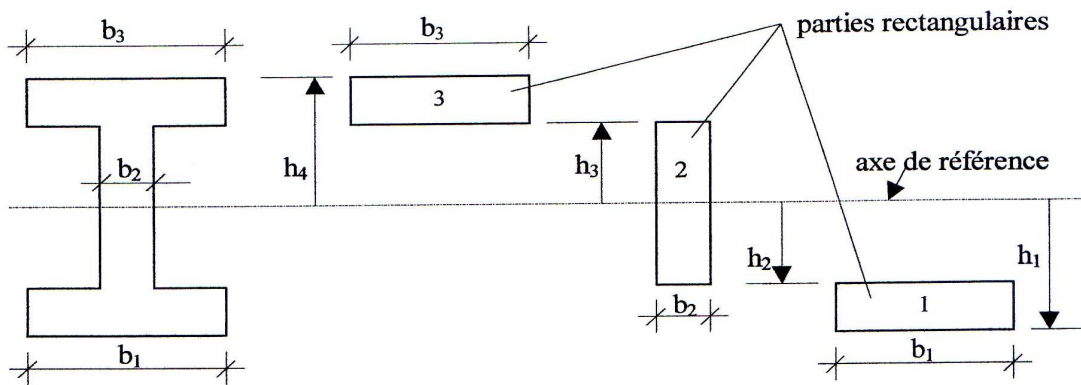


Figure 4-10 : Subdivision de la section transversale de l'élément en parties rectangulaires (NR_Y=3)

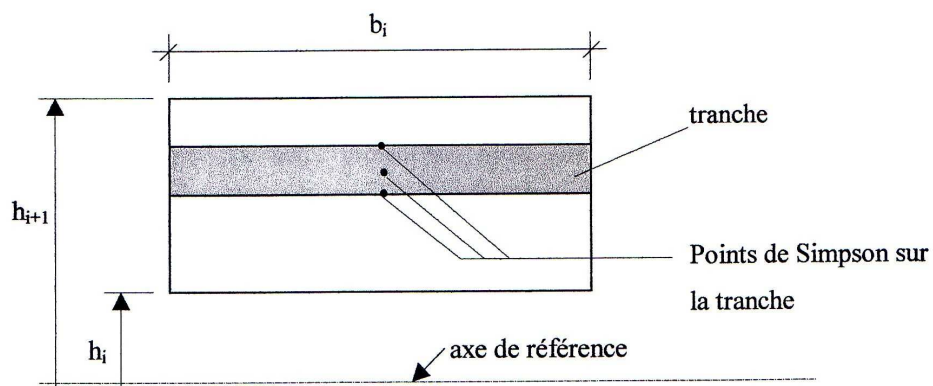


Figure 4-11 : Définition des tranches et des points de Simpson sur la partie rectangulaire

4-3-5-2 Méthodes de résolution du système d'équations linéaires

La solution du système d'équations (4-29) est une étape importante de la méthode des éléments finis. Le nombre d'inconnues est, en général, proportionnel au nombre total de nœuds multiplié par le nombre de degrés de liberté par nœud. La précision et le champ d'application de la méthode des éléments finis sont limités par la dimension des systèmes d'équations que nous pouvons résoudre économiquement sur les ordinateurs disponibles. Les méthodes de résolution de systèmes linéaires peuvent être classées en deux catégories à savoir i) les méthodes directes qui conduisent à la solution suite à un nombre d'opérations connues a priori ii) les méthodes itératives qui conduisent à la solution par une succession d'améliorations d'une solution approchée, le nombre d'itérations étant difficiles à prévoir.

Les premiers programmes basés sur la méthode des éléments finis ont utilisé des méthodes itératives type Gauss-Seidel car elles sont plus simples à programmer et, surtout demandent moins d'espace mémoire que les méthodes directes. La grande majorité des programmes actuels utilise des méthodes directes dérivées de la méthode d'élimination de Gauss vu qu'elle nécessite beaucoup moins d'opérations que les méthodes itératives. Par contre, elles sont en général plus sensibles aux erreurs d'arrondis dues à la précision limitée avec laquelle l'ordinateur effectue les opérations arithmétiques. Dans notre cas, la méthode bande, dérivée de la méthode de Gauss, a été choisie pour résoudre le système d'équations linéaires.

4-4 Critères de résistance et principes de vérification au feu

La résistance au feu qualifie l'aptitude d'un élément de construction, d'un ensemble d'éléments ou d'une construction entière à assurer le rôle qui lui est dévolu malgré l'action de l'incendie. En matière de réaction au feu, les matériaux sont classés en cinq catégories suivant leur combustibilité [25]. L'acier en tant que matériau incombustible est classé dans la meilleure catégorie (M_0). Les autres catégories sont M_1 à M_4 et les matériaux jugés trop combustibles ou très rapidement inflammables, situés au-delà de M_4 , ne sont pas classés. Dans le cadre de l'harmonisation européenne, le classement des produits vis-à-vis de leur comportement au feu fait appel à de nouvelles catégories allant de A_1 , A_2 , B jusqu'à E, voire F pour les matériaux non classés; l'acier porte le classement A_1 .

4-4-1 Classification et critères de résistance au feu

La réglementation française classe les éléments de construction en 3 catégories comme schématisé sur la figure 4-12:

- Stable au feu concerne la stabilité mécanique des éléments de construction n'ayant qu'une fonction porteuse, tels que poteaux, poutres ou tirants. Pour ces éléments, la résistance au feu se définit comme la durée pendant laquelle l'élément, soumis aux conditions d'incendie conventionnel, est capable de résister à la charge mécanique appliquée. C'est le critère de résistance mécanique qui porte l'indice R selon les Eurocodes.
- Pare-flamme concerne principalement des éléments de compartimentage au contact desquels des matériaux combustibles ne sont pas entreposés (poutre, cloison vitrée, couverture ...). Il est demandé que ces éléments ne laissent pas passer de gaz chauds soit d'éviter la propagation directe des flammes à travers des fissures ou ouvertures dans un élément de construction. C'est le critère d'étanchéité aux gaz chauds portant l'indice E selon les Eurocodes.
- Coupe feu (CF) concerne les éléments de compartimentage, qu'ils soient porteurs ou non (plancher, mur, cloison, plafond ...). Outre les qualités pare-flammes et, pour les éléments porteurs, les qualités de stabilité au feu qui doivent être assurées, l'élévation de température sur la face non exposée à l'incendie doit être en moyenne inférieure à 140°C et ne doit excéder 180°C . C'est le critère d'isolation thermique indicé par la lettre I selon les Eurocodes.

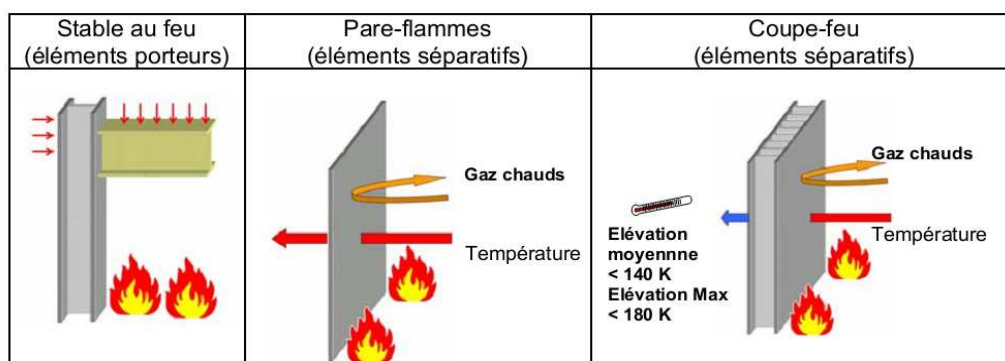


Figure 4-12 : Schéma illustratif des critères de résistance au feu

A partir de ces symboles, les classements selon les Eurocodes sont alors : pour une poutre stable au feu 1 h: R60; pour une porte pare-flamme 1/2 h : RE30 ou E30; pour un mur coupe feu 1 h30: REI90 ou EI 90. Notons toutefois savoir que l'incendie de référence utilisé pour établir les classements est représenté pour une évolution température-temps conventionnelle ; ce qui signifie que les degrés de résistance au feu que doivent présenter les éléments de constructions ne peuvent pas refléter le comportement qu'ils auront lors d'un incendie réel. L'influence du scénario incendie sur les performances de résistance au feu des structures s'avère donc comme un sujet d'investigation important.

4-4-2 Principes de vérification de la résistance au feu

Il est possible de prouver l'exigence de résistance au feu de 3 manières différentes, équivalentes et aussi acceptables l'une que l'autre comme illustrées sur la figure 4-13 pour une structure simple caractérisée par une température θ_d et par une sollicitation $E_{fi,d}$ qui est constante au cours du temps, soit une barre d'acier en traction par exemple. On a aussi représenté sur le graphe supérieur de la figure la diminution progressive de la résistance $R_{fi,d}$ et sur le graphe inférieur la valeur de la température qui amène à la ruine $\theta_{cr,d}$. La ruine survient après le temps $t_{fi,d}$ au moment où la résistance est égale à la charge appliquée, ce qui se marque aussi par le fait que la température est égale à la température critique. La durée de résistance prescrite est $t_{fi,req}$.

La vérification peut se faire :

- En terme de durée (1):

$$\text{durée de résistance } t_{fi,d} > \text{durée requise } t_{fi,req} \quad (4-36a)$$

- En terme de résistance (2):

$$\text{résistance } R_{fi,d} > \text{effet des actions } E_{fi,d} \text{ au temps } t = t_{fi,req} \quad (4-36b)$$

- En terme de température (3):

$$\text{température } \theta_d < \text{température critique } \theta_{cr,d} \text{ au temps } t = t_{fi,req} \quad (4-36c)$$

Notons que quelque soit le type de vérification envisagé, la vérification doit se faire à l'état limite ultime. En pratique, la vérification en terme de température ne peut se faire que si la température de l'élément est uniforme comme dans les éléments en acier. Cette vérification en terme de température n'est évidemment pas possible si le champ de température est non uniforme, comme dans les éléments mixtes acier-béton par exemple.

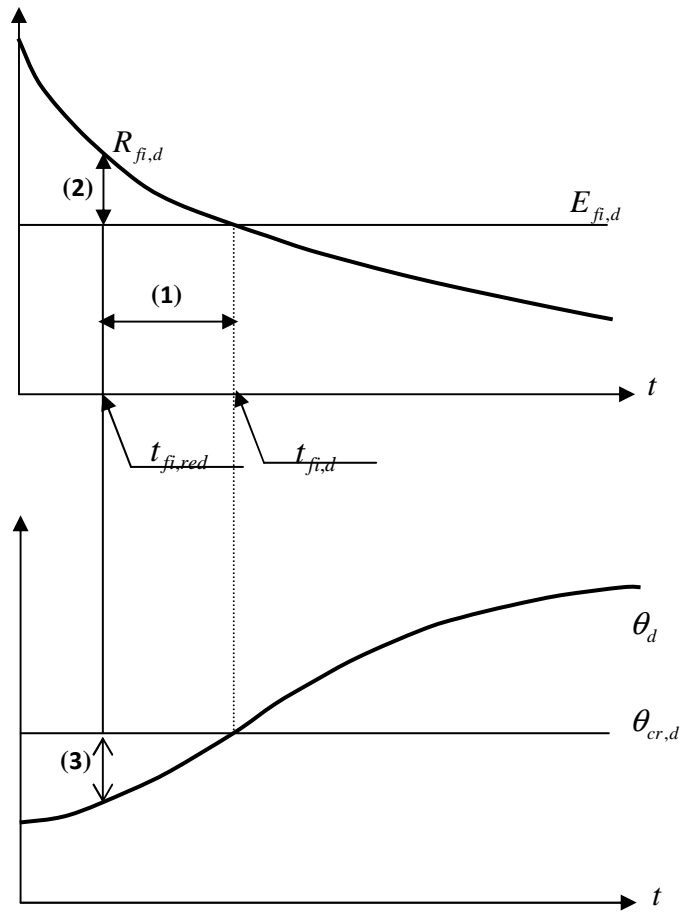


Figure 4-13 : Trois vérifications équivalentes de résistance au feu

CHAPITRE 5

EXPERIMENTATION NUMERIQUE ET ANALYSE PARAMETRIQUE

5-1 Généralités

Dans le cadre de ce chapitre, nous allons illustrer le programme établi par des applications numériques portant sur l'analyse de la résistance au feu des structures en acier thermiquement protégés par revêtements matériels isolants. Le programme informatique établi s'intitule PASAT.FOR_version 2015 (**P**rogramme d'**A**nalyse des **S**tructures en **A**cier sous l'action des gradients **T**hermiques), écrit en langage d'ordinateur FORTRAN et facilement exploitable sur micro ordinateur. Soulignons que le programme est conçu et développé par mon directeur de thèse, conçu initialement pour les structures en acier en milieu thermique non protégé (amplement décrit dans les mémoires [20,26]) et auquel nous avons apporté quelques modifications pour l'adapter à notre cas en présence de l'incendie naturel.

5-2 Description du programme PASAT.FOR_version 2015

Dans cette section, nous allons d'abord présenter la description d'un fichier type de données **PASAT.INP** et ensuite l'organigramme général du programme établi résumant la méthode de calcul employée.

5-2 -1 Fichier de données : PASAT.INP

Soulignons qu'à chaque bloc fonctionnel de fichier de données intitulé PASAT.INP correspond un ensemble de cartes de données constitué d'une carte d'entête définissant le nom du bloc à exécuter. Les cartes d'entête présentent le même format pour tous les blocs (format A4). Il faut comprendre par carte de données ou de commentaires une ligne de données ou de commentaires. La définition des différents blocs ainsi que l'ordre dans lequel ils doivent être exécutés sont donnés ci après :

COMT : Lecture de cartes de commentaires, terminer ces lignes commentaires par une ligne blanche

DATA : Début du bloc de données

COOR : Lecture des données nodales

CMAT : Lecture des caractéristiques du matériau acier

PREL : Lecture des propriétés élémentaires

ELEM : Lecture des connectivités des éléments

SOLC : Lecture des sollicitations (mécaniques et thermiques)

COND : Lecture des conditions aux limites

LINM : Lecture de quelques données particulières.

Le fichier de données doit être écrit comme indiqué ci-dessous. Les cartes d'entête sont écrites en caractères gras afin de les mettre en évidence.

COMT

Inclure un certains nombre de lignes commentaires et terminer les lignes commentaires par une ligne blanche.

DATA

```
      COOR          NNT
      NNE      X      Y } NNT fois
      CMAT
      FPT20      FYT20      EAT20
      PREL      NGPRE
      IGPE      NRS      AM      V      } x NGPRE
      HS1  HS2      BS      NPS } x NRS
      ELEM
      NELT
      IEL  NND      NNF  NIGPE } x NELT
      SOLC      NATURE(1)      NATURE(2)
      NL      NI1
      KDL      DLOADS } x NL
      INTE      DTEMPS      NT      KFIRE      JPROTEC
      NEL } x NT
      XLANDAP  XDP0      XCCP      XRHOP } si JPROTEC = 1
      TIMELIM,PQFD,PAF,PAT,PHEQ,PAV,PB } KFIRE = 3
      COND      NNCL
      I      J      K      } x NNCL
      NUN
      LINM
      GP      M1      M2
      FIN
```

La définition des différentes variables intervenant dans le fichier de données est comme suit :

NNT : Nombre de nœuds dans la structure

NNE : Numéro d'un nœud

X : Abscisse X du nœud NNE

Y : Ordonnée Y du nœud NNE

FPT20 : Valeur de la limite de proportionnalité $f_{p\theta}$ à 20°C

FYT20 : Valeur de la limite d'élasticité efficace $f_{y\theta}$ à 20°C

EAT20 : Valeur de la pente du domaine élastique linéaire $E_{a\theta}$ à 20°C

NGPRE : Nombre de groupes de propriétés élémentaires

IGPE : Numéro d'un groupe de propriétés élémentaires

NRS : Nombre de subdivisions rectangulaires de la section transversale du groupe IGPE

AM : Valeur de la surface par unité de longueur A_m du groupe IGPE

V : Valeur du volume exposée au feu par unité de longueur du groupe IGPE

HS1 : Distance de l'axe de référence (axe z) à la fibre inférieure de la section rectangulaire NRS

HS2 : Distance de l'axe de référence (axe z) à la fibre supérieure de la section rectangulaire NRS

BS : Largeur de la section rectangulaire NRS

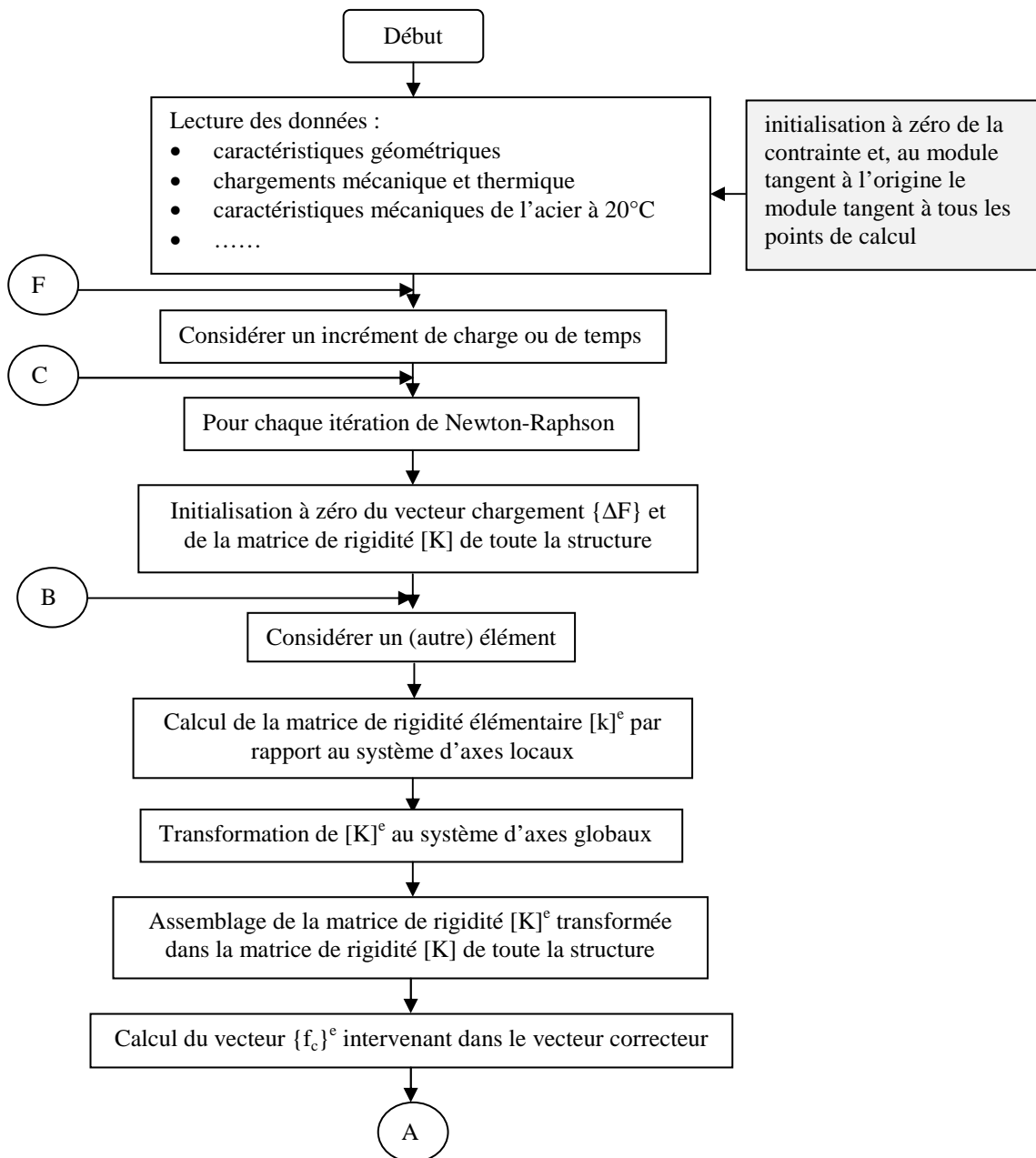
NPS : Nombre de points de Simpson pris dans la section rectangulaire NRS
NELT : Nombre total d'éléments dans la structure
IEL : Numéro d'un élément
NND : Numéro du nœud de départ de l'élément IEL
NNF : Numéro du nœud de fin de l'élément IEL
NIGPE : Numéro du groupe de propriétés auquel appartient l'élément IEL
NATURE(1) : Chargement mécanique (NATURE(1)=1)
NATURE(2) : égal à 2 si le chargement thermique est considéré, sinon prendre 0. Dans le cas où le chargement thermique n'est pas considéré, ne pas introduire les valeurs des variables : INTE, DTEMPS, NT, NEL
NL : Nombre de charges concentrées du chargement mécanique
NI1 : Nombre d'incrément de charges durant le chargement mécanique
KDL : Numéro du degré de liberté chargé
DLOADS : Incrément de charge du degré de liberté KDL
INTE : Nombre d'incrément de temps (température)
DTEMPS : Valeur de l'incrément de temps
NT : Nombre d'éléments soumis à l'incendie
KFIRE : Type de scénario de feu
 =1: iso834
 =2: hydrocarbure
 =3: paramétrique ou naturel
JPROTEC : Indice de protection contre le feu
 = 1 : paroi protégée contre le feu
 = 0 : paroi non protégée contre le feu
XLANDAP : Conductivité thermique de la protection
XDPO : épaisseur initiale de la protection
XCCP : Chaleur spécifique de la protection
XRHOP : Masse volumique de la protection
TIMELIM : Temps limite du scénario du feu
PQFD : Charge calorifique
PAF : Surface du plancher
PAT : Surface totale des faces du compartiment
PHE : Hauteur équivalente des ouvertures
PAV : Surface des ouvertures
PB : Coefficient de transmission calorifique
NEL : Numéro de l'élément soumis à l'incendie
NNCL : Nombre de nœuds ayant au moins un degré de liberté retenu
NUN : Numéro du nœud correspondant à un appui
I : Egal à 1(un) si le nœud NUN est bloqué suivant X, sinon prendre égal à 0
J : Egal à 1(un) si le nœud NUN est bloqué suivant Y, sinon prendre égal à 0
K : Egal à 1(un) si le nœud NUN est bloqué autour de Z, sinon prendre égal à 0
GP : Nombre de points de Gauss à prendre pour calculer les matrices de rigidité élémentaires
M1 : Indice d'impression des étapes intermédiaires (M1=1 → Impression ; M1=2 → Pas d'impression)
M2 : Indice de Marguerre (M2=1 → considérer les effets du second ordre; M2=0 → pas d'effet du second ordre)

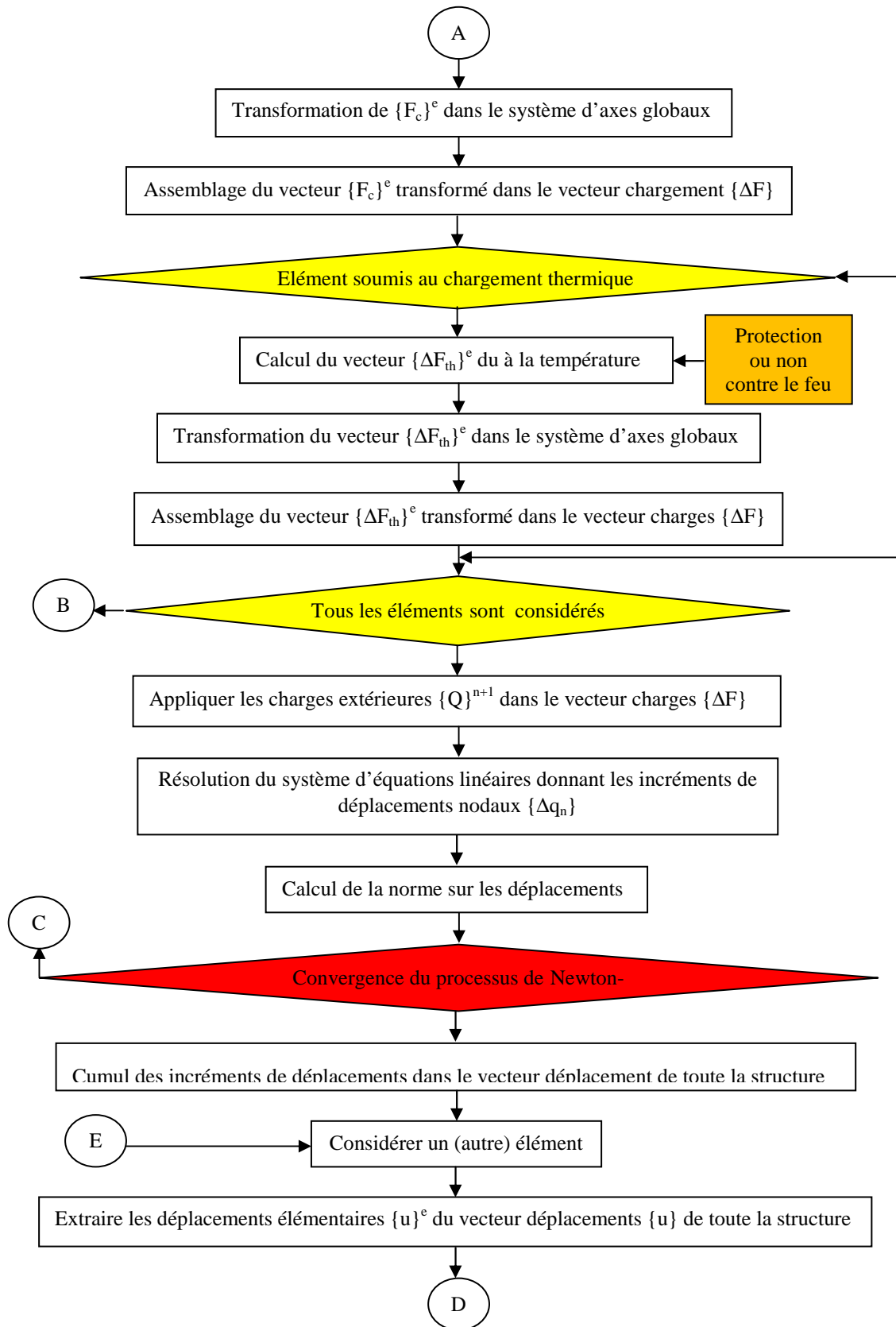
} Caractéristiques du matériau de protection employée contre le feu (si JPROTEC=1)

} Paramètres de calcul au feu naturel (si KFIRE=3)

5-2-2 Organigramme général de calcul

Les différentes étapes de calcul effectuées par le programme incluant les effets thermiques sont résumés dans l'algorithme de résolution donné à la figure 5-1. Soulignons que cet algorithme se base sur le schéma itératif de Newton-Raphson par l'amélioration de la solution pendant un incrément de charge mécanique ou thermique. Il convient cependant de faire une remarque relative au processus itératif adopté au cours de l'incrément de temps lié à l'augmentation des températures comme l'indique la figure 5-1. En effet dans celui ci on suppose que les effets thermiques sont appliqués à la structure au début de l'incrément, on examine ensuite les modifications qui en résultent dans le comportement de la structure. Ceci revient à supposer que les effets thermiques sont complètement dissociés du processus de redistribution des efforts internes.





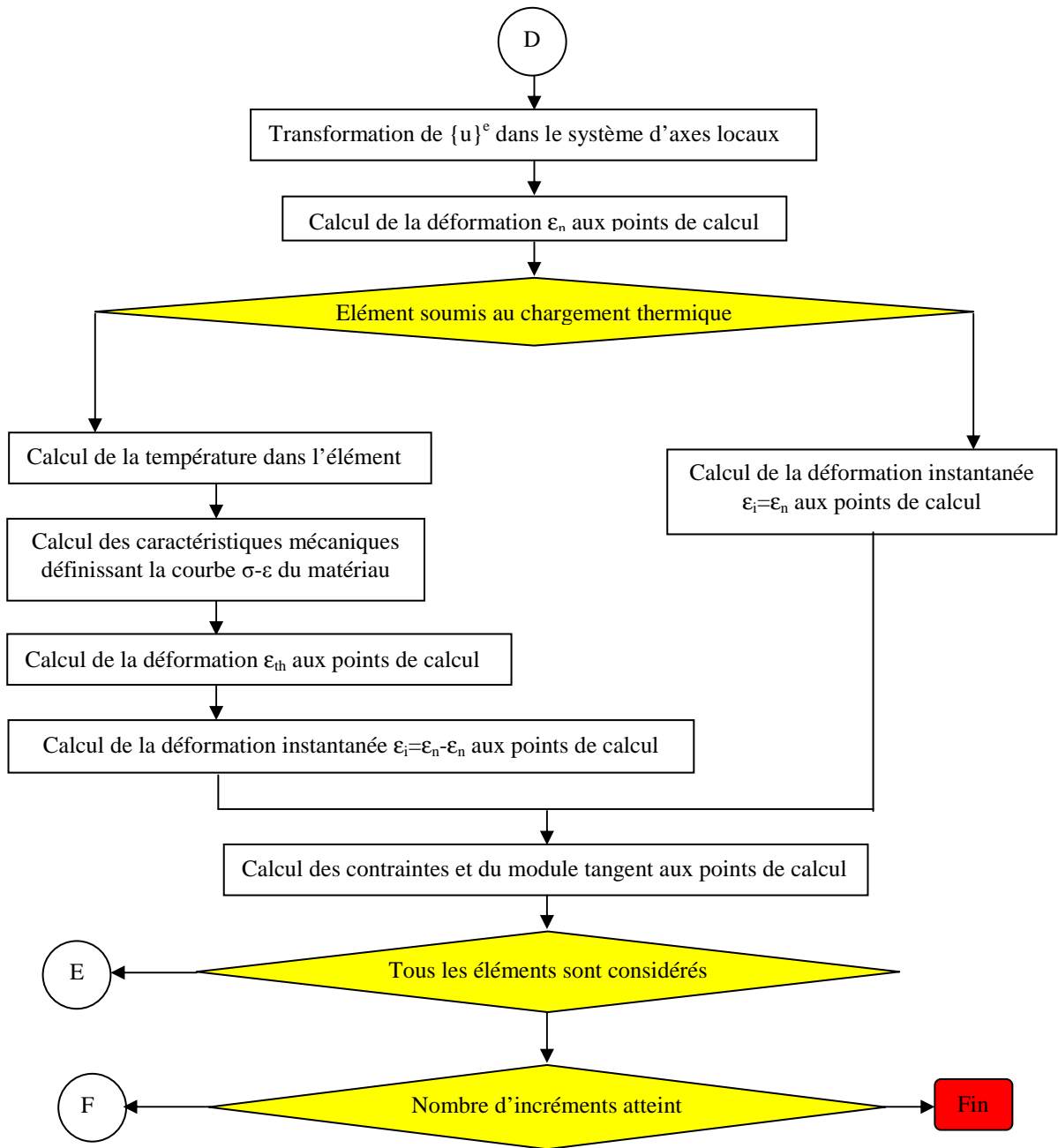


Figure 5-1 : Organigramme de la méthode de calcul

5-3 Expérimentations numériques

Soit le cadre d'une charpente métallique (acier S235) représentée sur la figure 5-2 soumise à l'action d'un incendie supposé se développer dans le compartiment gauche du rez-de-chaussée et à des charges mécaniques de service ou d'utilisation qui sont composées de charges mortes (m) et de charges vives (v) ; les pieds des colonnes étant supposés encastrés. Nous proposons de faire une analyse complète de la réponse thermo-mécanique de la structure en considérant :

- Un scénario de feu paramétrique (ou naturel) de sévérité moyenne tel celui pouvant se produire dans un bâtiment à usage d'habitation ;
- Un critère de résistance au feu conventionnel lié à l'instabilité des éléments ;
- Une protection matérielle contre le feu type projetée que nous supposons faite à la base de la vermiculite (ou perlite) contenant un taux d'humidité de 15%.

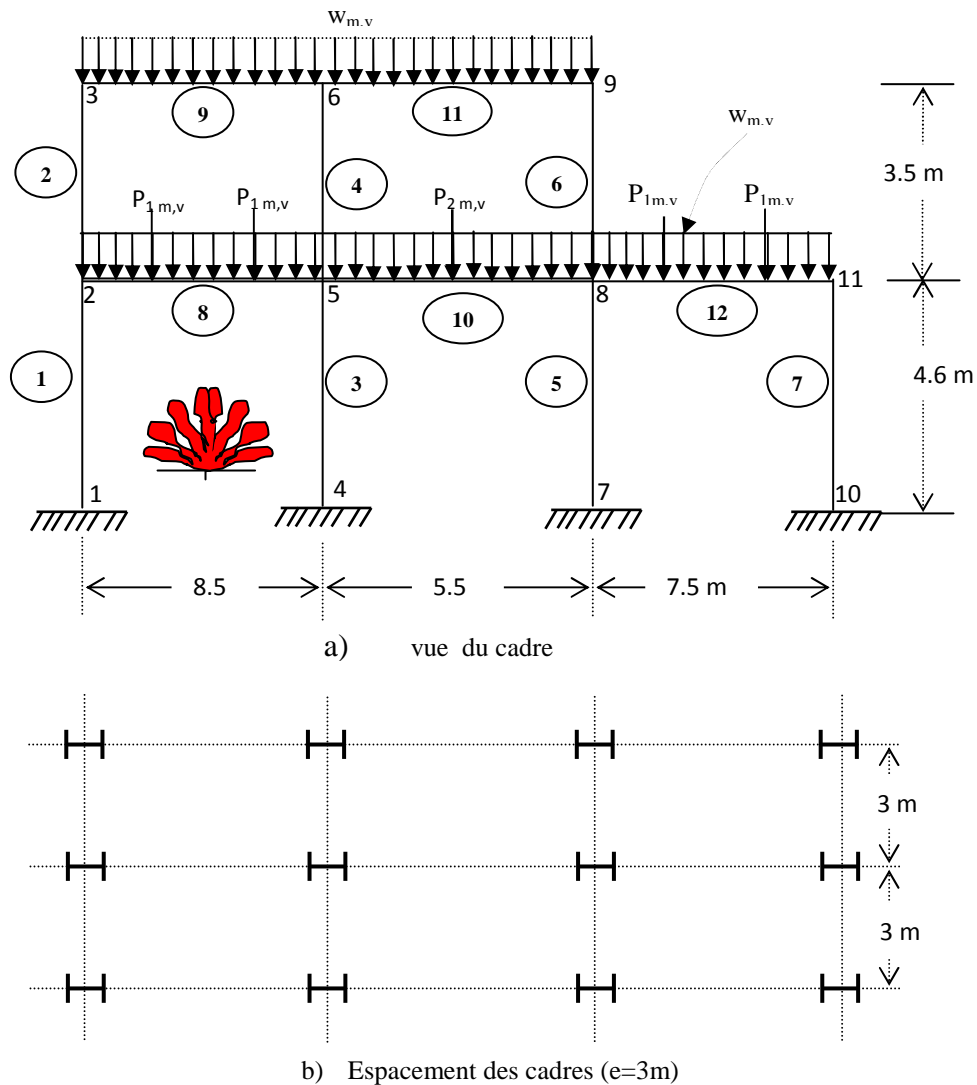


Figure 5-2 : Géométrie, chargement, numérotation des membrures

5-3-1 Description des données

5-3-1-1 Prédimensionnement des éléments

Les éléments structuraux ont été prédimensionnés sur la base des prescriptions de l'Eurocode 3 partie 1-1 [18] comme rapportés à l'annexe B. La détermination de la répartition des efforts internes dans la structure ont été calculés sur la base de la méthode approximative sous charges verticales [27,28]. Le type du profilé adopté est montré sur la figure 5-3 et les caractéristiques géométriques retenues pour chacun des éléments sont récapitulées dans le tableau 5-1.

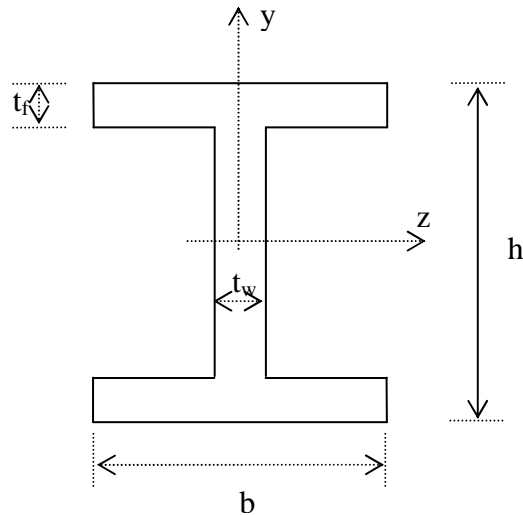


Figure 5-3 : Forme du profilé adoptée

Tableau 5-1: Caractéristiques géométriques des profilés adoptés

éléments	Profilé	Aire (mm ²)	I _z (mm ⁴)	h (mm)	b (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	W _{pl,z} (mm ³)	r (mm)	Groupe
9,11	IPE360	7270	162.7x10 ⁶	360	170	8	12.7	1019x10 ³	18	2
8,10,12	IPE500	11600	482x10 ⁶	500	200	10.2	16.0	2194x10 ³	21	1
2,4,6	HE300A	11300	182.6x10 ⁶	290	300	8.5	14.0	1383x10 ³	14	4
1,3,5,7	HE450A	17800	637.2x10 ⁶	440	300	11.5	21.0	3216x10 ³	27	3

5-3-1-2 Charges d'origine mécanique

- charge vive uniforme sur toutes les poutres : $w_v = 16.0$ kN/m
- charge morte uniforme sur toutes les poutres : $w_m = 10.7$ kN/m
- charges mortes concentrées:
 $P_{1m} = 22.1$ kN (appliquée au tiers de la portée) ; $P_{2m} = 30.1$ kN (au mi- portée)
- charges vives concentrées:
 $P_{1v} = 32.9$ kN (appliquée au tiers de la portée) ; $P_{2v} = 45.0$ kN (au mi- portée)

Notons que ces valeurs ne sont pas pondérées et qu'une charge morte est équivalente à une charge permanente (G) et une charge vive à une charge d'exploitation (Q) dans l'esprit de la réglementation usuelle française.

5-3-1-3 Caractéristiques mécaniques de l'acier de construction

La nuance de l'acier de construction considéré étant du type S235, par suite les caractéristiques en milieu de température ambiante ($\Theta = 20^\circ\text{C}$) sont :

$$f_p = 235 \text{ MPa} ; f_y = 200 \text{ MPa} ; E_a = 200000 \text{ MPa}.$$

5-3-1-4 Combinaisons de charge

Afin de vérifier la stabilité d'une structure ou de l'un de ses éléments lors d'un incendie, l'Eurocode 1-2 [1] préconise de prendre en compte les combinaisons de charge qui répondent à l'équation symbolique suivante :

$$\begin{aligned} \text{Charges} = & \text{poids propre} \\ & + \text{précontrainte} \\ & + \Psi_1 \times \text{l'action variable dominante (valeur permanente)} \\ & + \Psi_2 \times \text{les autres actions variables (valeurs quasi-permanentes)} \end{aligned}$$

Pour les bâtiments à usage privé, résidentiel et de bureau, on prend $\Psi_1 = 0.5$ et $\Psi_2 = 0.3$. A titre d'exemple, en ce qui concerne la combinaison entre les charges de vent (ou de séisme) et imposées (d'exploitation ou d'utilisation), on considère la plus défavorable de l'une des deux combinaisons suivantes :

- (1) poids propre + 0.5 x charge imposée + 0.0 x vent
- (2) poids propre + 0.3 x charge imposée + 0.2 x vent

5-3-1-5 Exposition au feu des éléments

Nous admettons que les éléments sont chauffés sur trois faces comme montré sur la figure 5-3. Les poutres sont supposées protégées sur la face supérieure par la présence de la dalle de compression des planchers et les colonnes par les murs extérieurs s'ils sont situées à l'extérieur du bâtiment ou par les murs de séparation s'il s'agit des poteaux intérieurs.

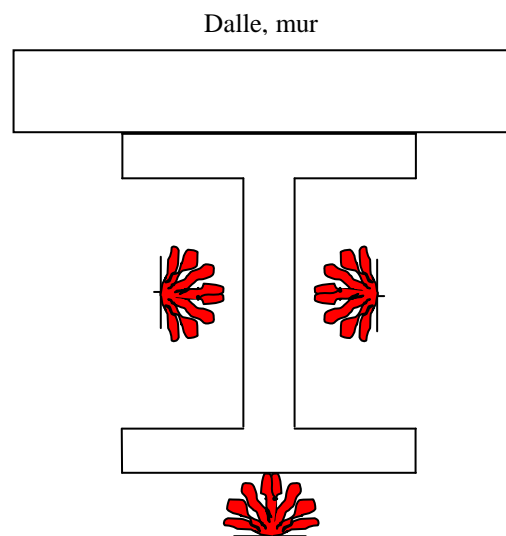


Figure 5-4 : Exposition au feu des éléments (poutres, poteaux)

Par suite, les facteurs de massivité A_m/V des profilés des différents éléments sont récapitulés dans le tableau 5-2 où V : aire du profilé ($=A$) et $A_m = 2h+3b-2t_w$ (périmètre de la section exposée au feu) vue la face supérieure de la section étant protégée.

Tableau 5-2 Facteurs de massivité des profilés

Profilé	V (mm ²)	A_m (mm)	A_m/V (m ⁻¹)
IPE360	7270	1214	166.98
IPE500	11600	1580	136.21
HE300A	11300	1463	129.47
HE450A	17800	1757	98.71

5-3-1-6 Caractéristiques de la protection matérielle contre le feu

La protection matérielle adoptée, étant faite à base de la vermiculite ou perlite ayant une teneur en eau de 15 %, est supposée projetée sur une profondeur de 20 mm comme schématisée sur la figure 5-5. Ses caractéristiques physiques sont [9] :

- Chaleur spécifique : 1200 J/kg.K
- Conductivité thermique : 0.12 W/m.K
- Masse volumique : 350 kg/m³

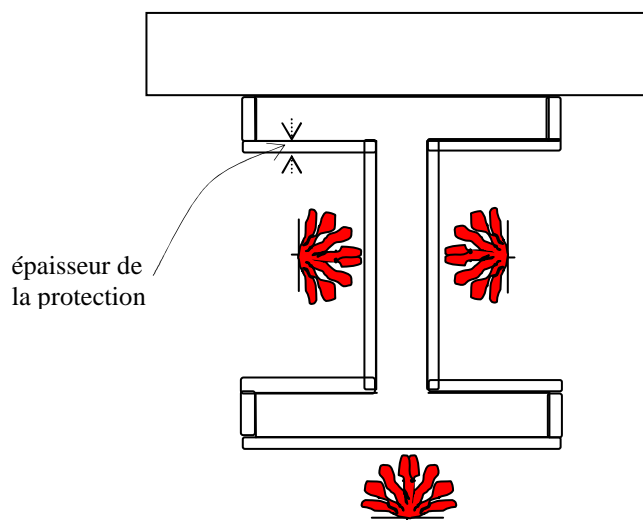


Figure 5-5 : Protection matérielle type projetée

5-3-2 Discrétisation de la structure

La structure est découpée en éléments comme indiqués sur la figure 5-6 avec un nombre total d'éléments NELE égal à 22 et un nombre total de nœuds NNT égale à 14. Chaque nœud possède trois degrés de liberté dont un déplacement de translation horizontal (u_i), un déplacement de translation vertical (v_i) et un déplacement de rotation (θ_i). Mentionnons que l'élément fini utilisé est de type classique de poutre-colonne où est choisie respectivement le long de l'élément une interpolation polynomiale

quadratique (type Lagrange, continuité C_0) pour décrire le déplacement axial (u) et une interpolation cubique (type Hermite, continuité C_1) pour décrire le déplacement latéral (v).

Les charges équivalentes sont calculées aux nœuds et sont appliquées selon les degrés de libertés de déformations actifs (fig. 5-7). La combinaison de charges utilisée est : poids propre + 0.5 x charge imposée puisque les charges horizontales dues aux vent ou au séisme sont supposées nulles. Afin de permettre par ailleurs l'intégration numérique des différents termes de la matrice de rigidité élémentaire et les composantes du vecteur des forces élémentaires, la section transversale de l'élément est également subdivisée en couche rectangulaires ($NR_Y = 3$; fig. 4-10) où chaque couche est subdivisée à son tour en 4 sous-couches soit équivalent à 2 points d'intégration de Simpson ($NPS=2$).

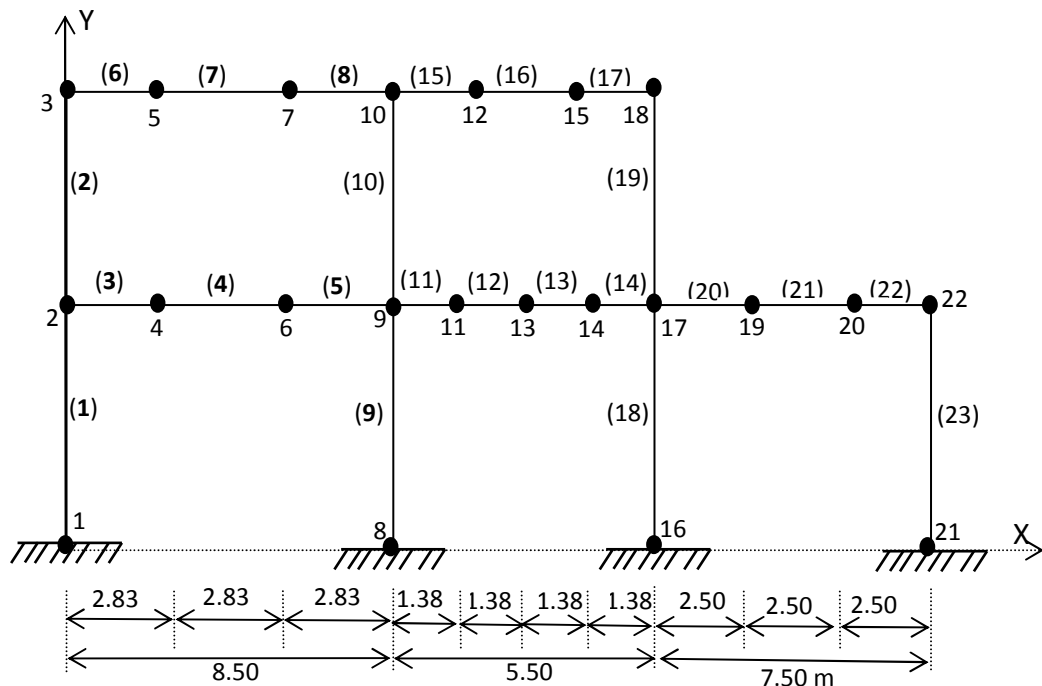
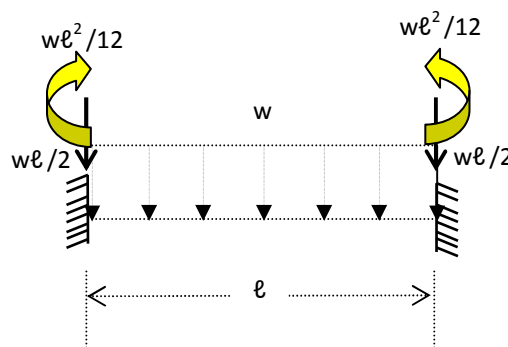


Figure 5-6 : Maillage: numérotation des nœuds et des éléments

5-3-3 Détermination des charges mécaniques équivalentes aux nœuds

- Efforts aux extrémités d'un élément doublement encastré



- Efforts aux extrémités des éléments (charges non pondérées)

Surcharge (kN/m)	éléments : 3,4,5,6,7,8 $\ell=2.83\text{m}$		éléments : 11,12,13,14 $\ell=1.38\text{m}$		éléments : 15,16,17 $\ell=1.83\text{m}$		éléments : 20,21,22 $\ell=2.50\text{m}$	
	$w\ell/2$ (kN)	$w\ell^2/12$ (kN.m)	$w\ell/2$ (kN)	$w\ell^2/12$ (kN.m)	$w\ell/2$ (kN)	$w\ell^2/12$ (kN.m)	$w\ell/2$ (kN)	$w\ell^2/12$ (kN.m)
$w_m=10.7$	15.14	7.14	7.38	1.70	9.79	2.99	13.38	5.57
$w_v=16.0$	22.64	10.68	11.04	2.54	14.64	4.47	20.00	8.33

- Détermination du vecteur global des forces nodales sous charge mécanique

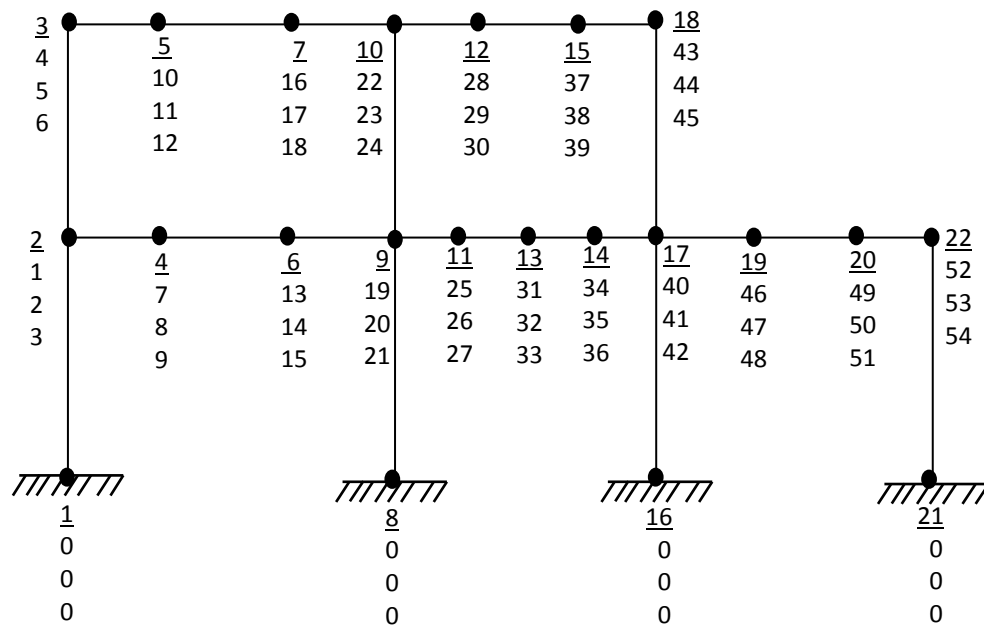
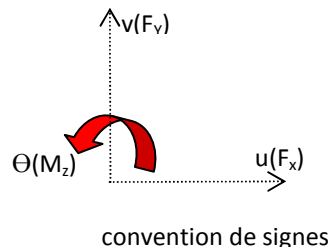


Figure 5-7 : Numéros des degrés de liberté de déformations actifs

Tableau 5-3: Détermination du vecteur des forces nodales sous charge mécanique

N° degré de liberté	Charge morte (D) (concentrée+uniforme)	Charge vive (L) (concentrée+uniforme)	Combinaison (D+0.5L)
1	0	0	0
2	-15.14	-22.64	-26.46
3	-7.14	-10.68	-12.48
4	0	0	0

5	-15.14	-22.64	-26.46
6	-7.14	-10.68	-12.48
7	0	0	0
8	-52.38	-78.18	-91.47
9	0	0	0
10	0	0	0
11	-30.28	-45.28	-52.92
12	0	0	0
13	0	0	0
14	-52.38	-78.18	-91.47
15	0	0	0
16	0	0	0
17	-30.28	-45.28	-52.92
18	0	0	0
19	0	0	0
20	-22.52	-33.68	-39.36
21	5.44	8.14	9.51
22	0	0	0
23	-24.93	-37.28	-43.57
24	4.15	6.21	7.26
25	0	0	0
26	-14.76	-22.08	-25.80
27	0	0	0
28	0	0	0
29	-19.58	-29.28	-34.22
30	0	0	0
31	0	0	0
32	-44.86	-67.08	-78.4
33	0	0	0
34	0	0	0
35	-14.76	-22.08	-25.80
36	0	0	0
37	0	0	0
38	-19.58	-29.28	-34.22
39	0	0	0
40	0	0	0
41	-20.76	-31.04	-36.28
42	-3.87	-5.79	-6.77
43	0	0	0
44	-9.79	-14.64	-17.11
45	2.99	4.47	-5.23
46	0	0	0
47	-48.86	-72.9	-85.31
48	0	0	0
49	0	0	0
50	-48.86	-72.9	-85.31
51	0	0	0
52	0	0	0
53	-13.38	-20.0	-23.38
54	5.57	8.33	9.74

5-3-4 Réponse thermique

Au tableau 5-4, nous donnons quelques valeurs de température obtenues en résolvant l'équation des variations de température (3-23a) à l'aide de l'algorithme décrit dans le paragraphe 3-3-4-3 ; l'algorithme étant codifié dans le programme PASAT.FOR_version 2015 en faisant appel à la subroutine **FTEMP** ainsi rappelée à l'annexe A. La valeur de l'incrément de temps (Δt) utilisée est prise égale à une seconde et celle du coefficient de l'émissivité globale (ϵ_{res}) 0.7. Les murs du compartiment en feu (fig. 5-8) sont supposés faits d'un béton dense ($c = 980 \text{ J/kgK}$, $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1.6 \text{ W/mK}$). La relation température-temps des gaz engendrés par ce type de scénario de feu, que nous désignerons dans la section subséquente par FIREII, est obtenue en considérant les paramètres de calcul suivants:

- $t_{lim} = 5/12 = 0.417\text{h}$ (= 25 min ; incendie moyen), $q_{f,d} = 400 \text{ MJ/m}^2$
- $A_f = 3 \times 8.5 = 25.5 \text{ m}^2$, $A_t = 156.8 \text{ m}^2$, $h_{eq} = 1 \text{ m}$, $A_v = 2.85 \text{ m}^2$
- $b = (980 \times 2300 \times 162)^{0.5} = 1900 \text{ J/m}^2 \text{ s}^{0.5} \text{ K}$

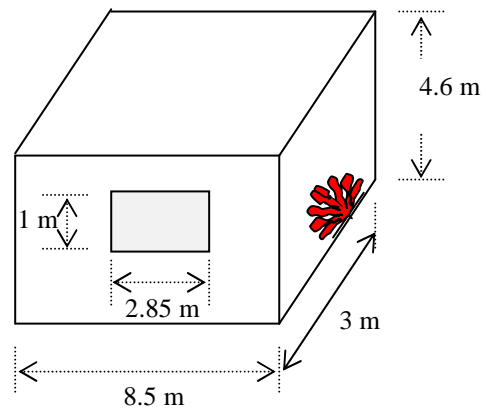


Figure 5-8 : Caractéristiques géométriques du compartiment

Tableau 5-4: Valeurs des températures atteintes dans l'acier à quelques temps discrets d'exposition au feu

Temps	Feu scénario	Profilé : IPE500 (nœuds : 8 ou éléments : 3, 4, 5)		Profilé : HE450A colonnes : 1, 3 ou éléments : 1,9)	
		Non protégé	Protégé	Non protégé	Protégé
0 s	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
10 s	22.7	20.0	20.0	20.0	20.0
20 s	25.3	20.0	20.0	20.0	20.0
30 s	28.0	20.1	20.0	20.1	20.0
1 min	35.8	20.6	20.0	20.4	20.0
2 min	51.1	22.1	20.0	21.6	20.0
5 min	95.2	32.2	20.0	29.2	20.0
10 min	162.2	63.2	20.0	53.3	20.0
30 min	364.8	265.4	25.0	230.5	20.3
40 min	436.4	366.3	44.0	331.7	29.1
60 min	441.0	440.3	128.2	429.9	97.2
80 min	425.0	430.5	194.1	430.4	154.9
100 min	409.0	415.0	242.4	416.9	199.8
150 min	368.9	375.4	312.6	377.9	273.1
200 min	328.8	336.0	338.1	338.7	309.1
250 min	288.7	296.6	337.9	299.5	321.1
300 min	248.6	257.2	321.9	260.4	316.9

A la figure 5-9, nous représentons l'évolution en fonction du temps des températures calculées dans le profilé IPE500 soit dans la poutre N°8 en l'absence ou non de la protection matérielle mise en œuvre sous la forme projetée. Ce qui démontre clairement le rôle protecteur de la protection envisagée qui se manifeste par la diminution considérable des températures dans le substrat métallique. A titre de d'exemple, lorsqu'elle est exemptée de protection (JPROTEC = 0), la poutre ayant une massivité de 136.17 m^{-1} présente pour un temps d'exposition au feu $t = 60 \text{ min}$, une température $\Theta_a = 440.4^\circ\text{C}$ soit presque égale à la température du scénario de feu qui est de 441.0°C . Cependant, lorsque la poutre est munie de la protection (JPROTEC = 1), la température développée dans le matériau est de 128.2°C soit une chute de l'ordre de 30% conduisant à un facteur de réduction $k_{y,\Theta} = 1$ d'après le tableau 3-1. En d'autres termes, à ce niveau de température, le matériau ne subit aucune dégradation de sa résistance mécanique grâce à la présence de la protection.

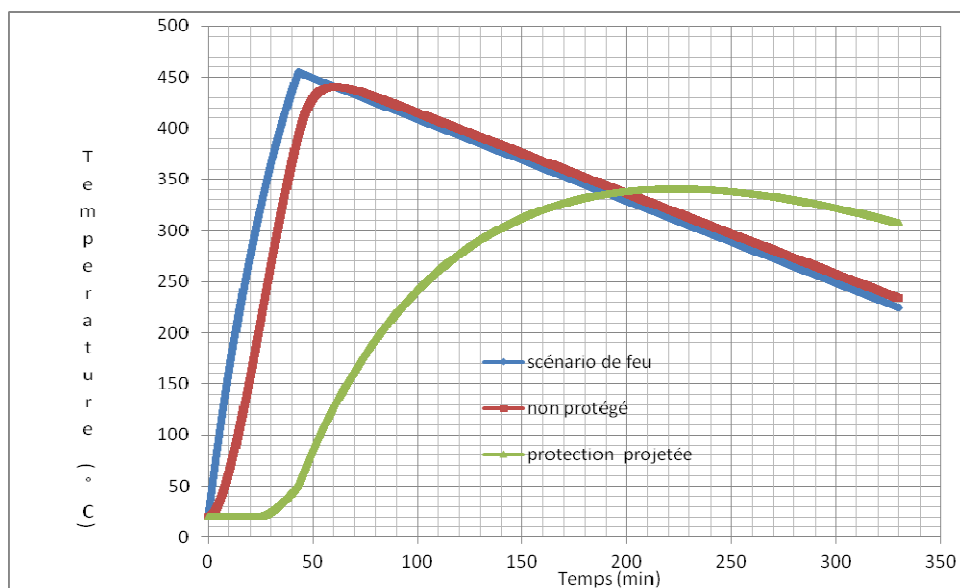


Figure 5-9: Evolution en fonction du temps des températures dans la poutre

5-3-5 Réponse structurale

Le fichier **exemple1.inp** décrivant du problème est donné en Annexe D. Les différents détails de calculs (déplacements nodaux, déformations, contraintes...) dans chaque intervalle de temps (Δt) et itérations sont stockés dans le fichier général de sortie **exemple1.out** dont un extrait à certains temps discrets est partiellement donné dans l'annexe D. La synthèse des principaux résultats déplacement vertical du nœud 6 : v_6 , déplacement horizontal du nœud 2 : u_2 , les efforts normaux dans la poutre N_{x1} et dans la colonne N_{x1} ainsi que le nombre d'itérations N_{iter} dans l'intervalle de temps) est effectuée dans le fichier **resultat.out**. Le critère de ruine utilisé est par instabilité numérique qui se manifeste par une division par zéro soit à un temps au-delà duquel la dégradation thermique est tellement importante au point que la structure n'est plus capable de reprendre les charges mécaniques appliquées.

A titre indicatif, nous illustrons dans les tableaux 5-4 et 5-5 les résultats pour quelques instants d'exposition au feu selon que le profilé est protégé ou non.

Tableau 5-5 : Quelques résultats (JPROTEC=1 : instabilité : $R_f=330.0$ min)

t (min)	u_2 (mm)	v_6 (mm)	N_{x1} (kN)	N_{x4} (kN)	M_z kN.m
0	-0.01	-3.22	-187.06	14.69	119.24
30	-0.39	-3.17	-187.28	8.76	117.46
60	-8.04	2.5	-181.25	-119.75	117.46
120	-20.36	12.32	-170.16	-291.45	50.57
180	-25.83	16.64	-160.02	-323.65	55.56
330	-23.2	17.36	-158.34	-301.46	60.49

Tableau 5-6 : Quelques résultats (JPROTEC=0 : instabilité : $R_f=330.0$ min)

t (min)	u_2 (mm)	v_6 (mm)	N_{x1} (kN)	N_{x4} (kN)	M_z kN.m
0	-0.01	-3.22	-187.06	14.69	119.24
30	-19.19	12	-170.68	-278.98	52.12
60	-38.76	25.33	-133.49	-332.97	89.29
120	-33.77	23.47	-139.2	-324.45	82.68
180	-28.11	20.38	-149.25	-318.46	69.61
330	16.22	12.32	-168.93	-241.06	60.56

Les résultats exprimés en terme de l'évolution en fonction du temps des déplacements latéral (u_2) et vertical (v_6), des efforts axiaux de la colonne 1 (N_{x1}) et de la poutre 8 (N_{x4}), du moment fléchissant au nœud 6 ainsi que du nombre d'itérations (Niter) sont illustrés dans les figures 5.10 et 5.12 en considérant ou non la protection thermique. Nous remarquons particulièrement que les déplacements latéraux (v_6) décroissent algébriquement durant les premiers instants de chauffage soit jusqu'à environ 42 min avant de commencer à s'accroître et d'avantage jusqu'à la ruine. La remontée de la déformée de la poutre vers le haut peut s'expliquer par le bridage important du reste de la structure qui reste à des températures ambiantes. L'effort normal dans la colonne décroît au fur et à mesure de l'exposition au feu où nous enregistrons, en présence de la protection, une valeur maximale de compression de l'ordre de 325 kN à $t=200$ min. Par contre, la poutre affiche un effort normal de compression qui est quasiment invariable dans le temps. Ce que nous attribuons au fait du bridage des colonnes qui s'allongent plus ou moins librement tandis que la dilatation des poutres provoque un déplacement horizontal non négligeable de la structure conduisant à une réduction sensible de l'effort normal de compression.

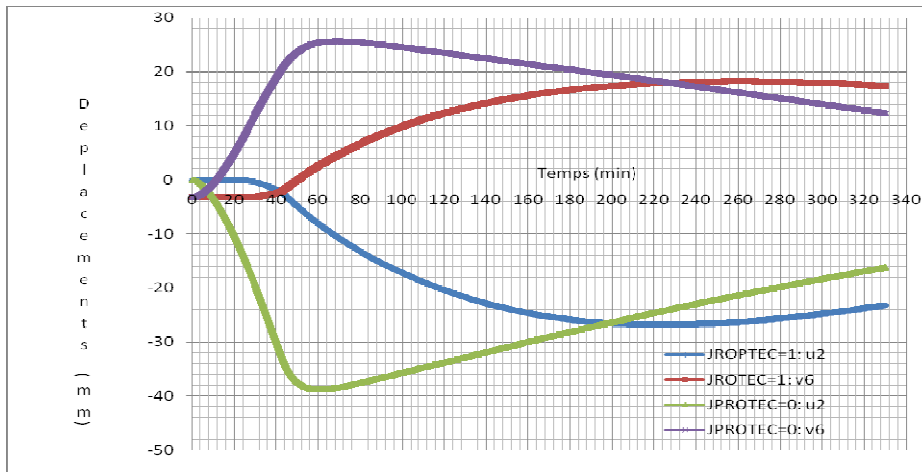


Figure 5-10: Evolution en fonction du temps des déplacements

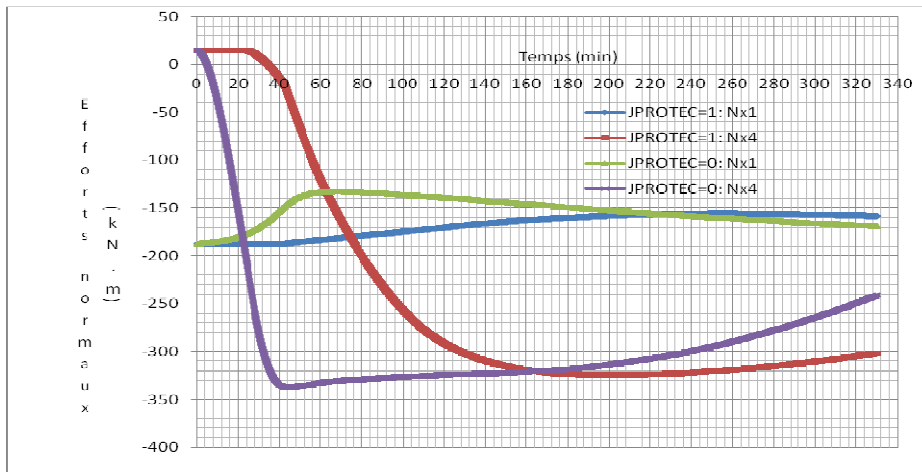


Figure 5-11: Evolution en fonction du temps des efforts normaux

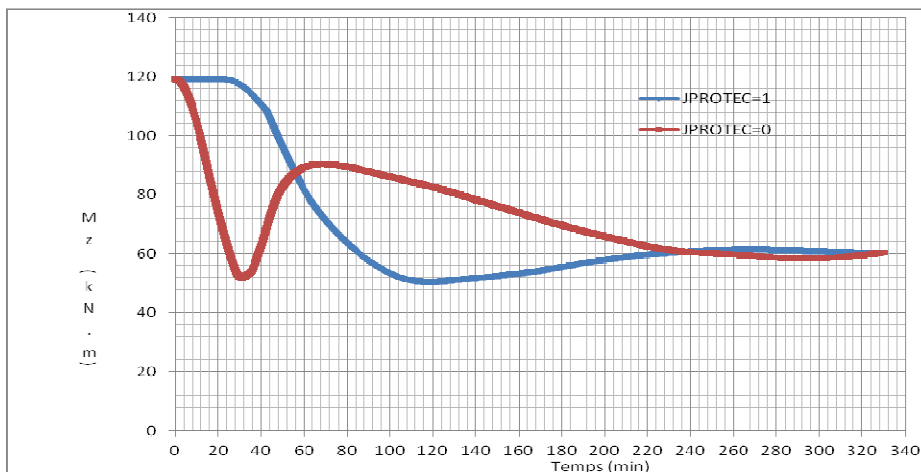


Figure 5-12: Evolution en fonction du temps du moment fléchissant dans la poutre

5-4 Analyse paramétrique

Nous allons montrer dans cette section l'influence des principaux paramètres sur la résistance au feu de la structure métallique analysée dans la section précédente. Les différents paramètres étudiés dont les résultats sont synthétisés dans le tableau 5-5 sont respectivement le scénario de feu, le critère de ruine et le type de protection du substrat métallique.

Tableau 5-7 : Synthèse des résultats

Type	Scénario de feu			Réponse thermique		Réponse structurale (R _f , min)	
	g _{tmax} (min)	g _{Θmax} (°C)	Protection	t _{max} (min)	Θ _{max} (°C)	Critère d'instabilité (ε _a ≥ ε _u)	Critère de flèche (v _{max} ≥ ℓ/30)
ISO834	*	*	non	*	*	20.10	18.90
ISO834	*	*	projetée	*	*	176.03	165.63
ISO834	*	*	enrobée	*	*	157.81	148.63
Fire I	88.83	1194.72	non	88.97	1192.71	19.3	14.2
Fire I	88.83	1194.72	projetée	154.77	866.43	244.9	104.0
Fire I	88.83	1194.72	enrobée	147.4	885.6	123.0	116.3
Fire II	42.67	453.0	non	60.77	440.37	**	**
Fire II	42.67	453.0	projetée	223.0	340.47	**	**
Fire II	41.87	448.14	enrobée	212.43	348.31	**	**

* scénario non concerné ** critère toujours satisfait

5-4-1 Effet du scénario de feu

Trois scénarios sont envisagés désignés par ISO834, Fire I et Fire II. ISO834 est un feu conventionnel ou standard principalement utilisé plutôt dans les tests de laboratoire qui correspond à un incendie complètement développé dans un local après embrasement généralisé, phase dans laquelle se produit une augmentation très rapide, sans cesse et continue, des températures. Fire II est un scénario de feu naturel dont les propriétés sont décrites dans la section 5-3. C'est un feu de sécurité moyenne qui pourrait se produire dans un bâtiment à usage d'habitation et dont les températures ne dépassent guère 600 °C. Fire I est semblable au scénario Fire II mais jugée très sévère où les températures dépassent 1200 °C. Ce type de scénario est susceptible de se produire dans une librairie par exemple ou dans un local contenant de grandes quantités de matériaux combustibles avec une ventilation assez suffisante.

Afin de générer de telles importantes températures, nous supposons que les murs du compartiment sujettes à l'action de fire I (fig. 5-13) sont faits d'un matériau à base de gypse (c = 1130 J/kgK, ρ = 730 kg/m³, λ = 0.20 W/mK) et le feu est par hypothèse admis contrôlé par la ventilation. Les paramètres de calcul considérés sont les suivants:

- t_{lim} = 5/12 = 0.417 h (= 25 min), q_{f,d} = 1200 MJ/ m²
- A_f = 25.5 m², A_t = 156.8 m², h_{eq} = 1.5 m, A_v = 3.375 m²
- b = (1130x730x0.2)^{0.5} = 406 J/m²s^{0.5}K

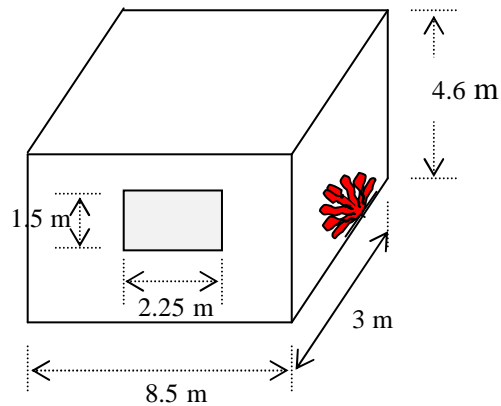


Figure 5-13 : Caractéristiques géométriques du compartiment sous Fire I

La courbe température-temps ainsi obtenue est représentée sur la figure 5-14 en comparaison avec les deux autres scénarios ISO834 et Fire II. Les résultats sont montrés sur les figures 5-15 et 5-16 exprimés en terme de l'évolution en fonction du temps de la température engendrée dans la section transversale de la poutre N°8 et de son déplacement latéral au niveau du nœud 6 (v_6) ; la protection utilisée étant du type vermiculite (ou perlite, taux d'humidité de 15%) tel que décrite dans la section précédente. Nous remarquons que la plus faible résistance au feu est obtenue lorsque la structure est exposée à l'action du sévère scénario Fire I qui est de 123 min en comparaison à celle de ISO834 qui est de l'ordre de 243 min. Ce que nous expliquons par la rapidité de l'accroissement des températures affichées sous Fire I comme indiqué sur la figure 5-15. Par contre, sous Fire II, la résistance au feu de la structure semble n'être pas affectée et continue à supporter les charges mécaniques appliquées à cause justement des températures relativement modérées engendrées. Une légère recouvrance du déplacement latéral de la poutre peut être aussi observée sous le scénario Fire II en raison de la phase de refroidissement où l'augmentation de température est beaucoup moins importante. Par conséquent, les résultats révèlent que pour de nombreuses applications, les valeurs de la résistance au feu calculées sur la base d'une exposition au feu standard ne peuvent être conservatives si le feu possède une phase de refroidissement similaire à celle du scénario Fire I considérée dans notre cas.

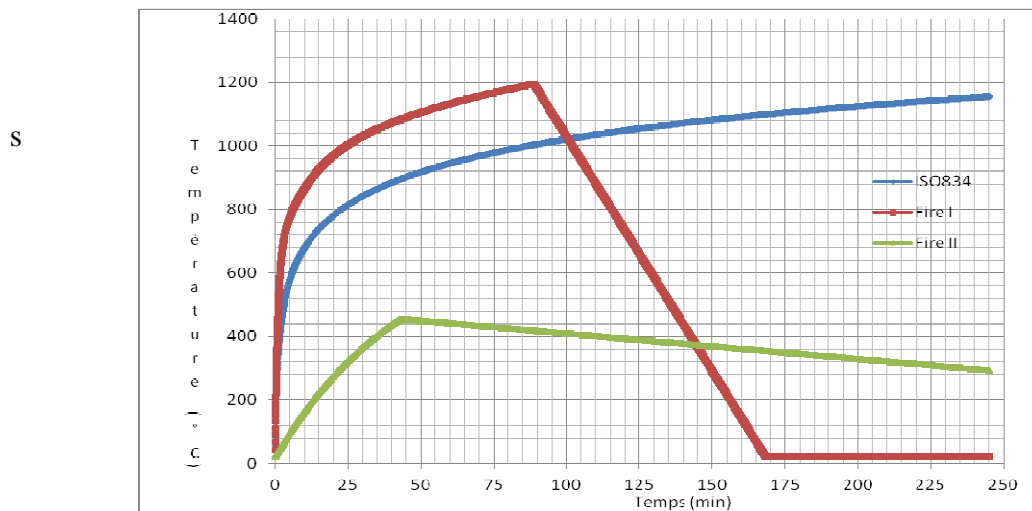


Figure 5-14 : Courbes température-temps des scénarios ISO834, Fire I et Fire II

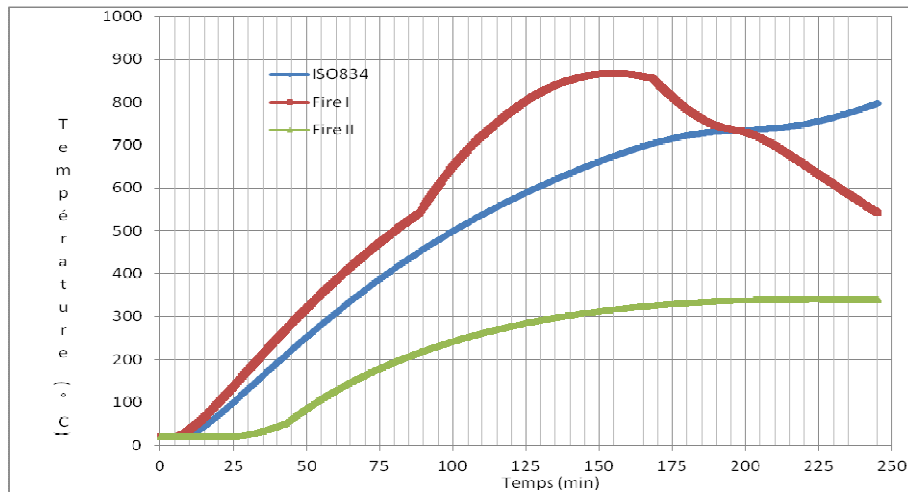


Figure 5-15 : Evolution en fonction du temps de la température dans la poutre sous ISO834, Fire I et Fire II

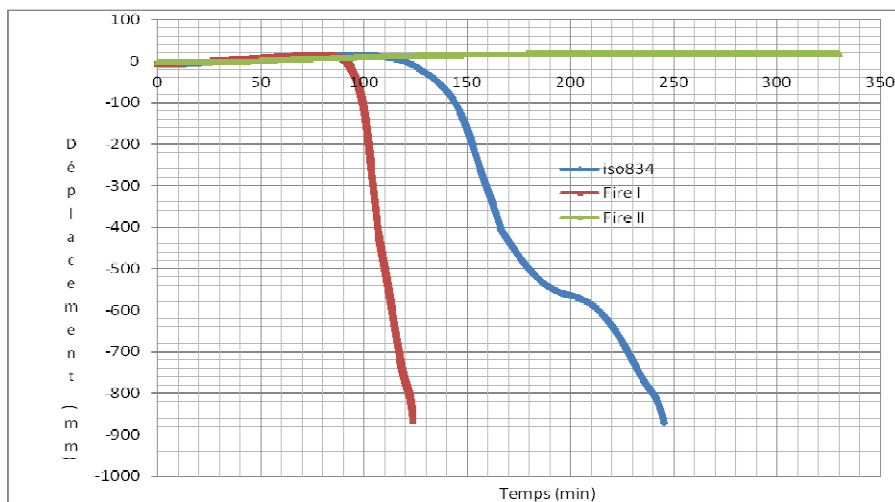


Figure 5-16 : Evolution en fonction du temps du déplacement latéral de la poutre soumise à l'action des scénarios ISO834, Fire I et Fire II

5-4-2 Effet du type de protection

Nous proposons dans cette section d'analyser l'effet d'une autre protection désignée par "enrobée" qui fait partie des systèmes en caisson tel que mentionné dans le paragraphe 3-3-4-2-B. Son principe (fig. 5-17) consiste de disposer autour du substrat métallique des plaques ou panneaux formant un dispositif en caisson comme schématisé sur la figure 5-17.

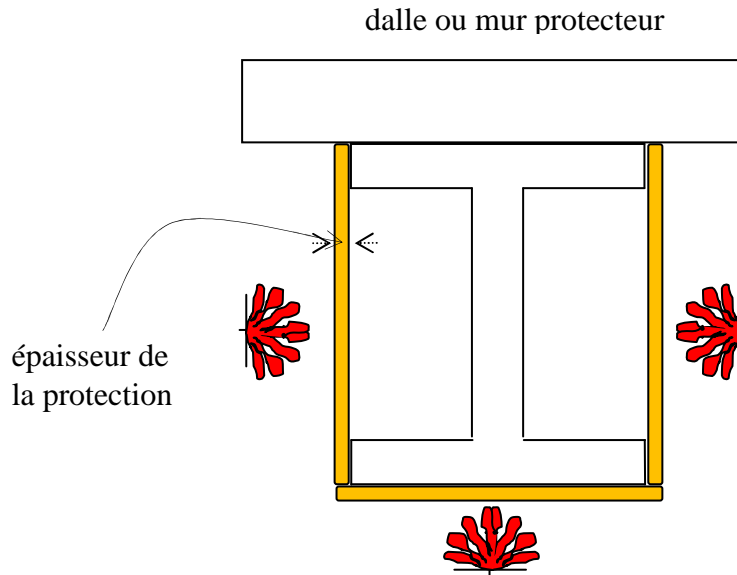


Figure 5-17 : Protection matérielle enrobée en forme de caisson

La protection matérielle ainsi utilisée ayant une épaisseur de 20 mm, est supposée faite à base de gypse avec un taux d'humidité de 15 %. disposée sous forme de caisson autour du profilé métallique. Ses caractéristiques physiques adoptées sont les suivantes [9]:

- Chaleur spécifique : 1700 J/kg.K
- Conductivité thermique : 0.20 W/m.K
- Masse volumique : 800 kg/m³

En outre, vu ce type de protection et le mode de chauffage adopté de la section transversale à trois faces, la quatrième face étant soit protégée par la dalle de compression de béton dans le cas des poutres ou par les murs de maçonneries dans le cas les colonnes, le périmètre de la section exposée au feu à prendre en compte est de $A_m = 2h+b$. Par suite, les facteurs de massivité à prendre en compte sont récapitulés dans le tableau 5-6 :

Tableau 5-8 Facteurs de massivité des profilés

Profilé	V (mm ²)	A _m (mm)	A _m /V (m ⁻¹)
IPE360	7270	890	122.4
IPE500	11600	1200	103.4
HE300A	11300	880	77.9
HE450A	17800	1180	66.3

Les résultats obtenus en considérant le scénario le plus critique soit Fire I sont illustrés sur les figures 5-18 et 5-19 en comparaison à la protection type projetée faite à base de vermiculite ou perlite telle que déjà décrite antérieurement. Nous remarquons que l'influence du type de la protection se fait de plus en plus sentir proche de la ruine en raison sans aucun doute de l'écart du gradient thermique constaté durant cet intervalle de temps de chauffage. La poutre quand elle est thermiquement protégée par le système de caisson qui enrobe complètement le substrat métallique conduit à des déplacements latéraux plus importants allant jusqu'à 60%. En guise d'exemple en considérant le critère de ruine par instabilité numérique, à $t = 123 \text{ min}$ $v_6 = 180 \text{ mm}$ en cas de la protection projetée et $v_6 = 480.7 \text{ mm}$ en cas de la protection enrobée.

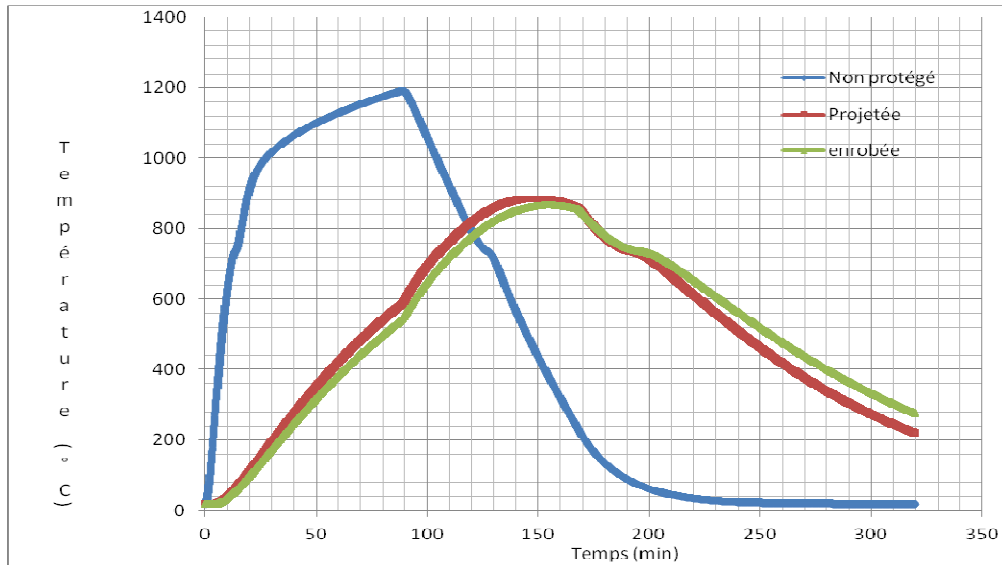


Figure 5-18 : Evolution en fonction du temps de la température dans la poutre selon le type de protection sous le scénario Fire I

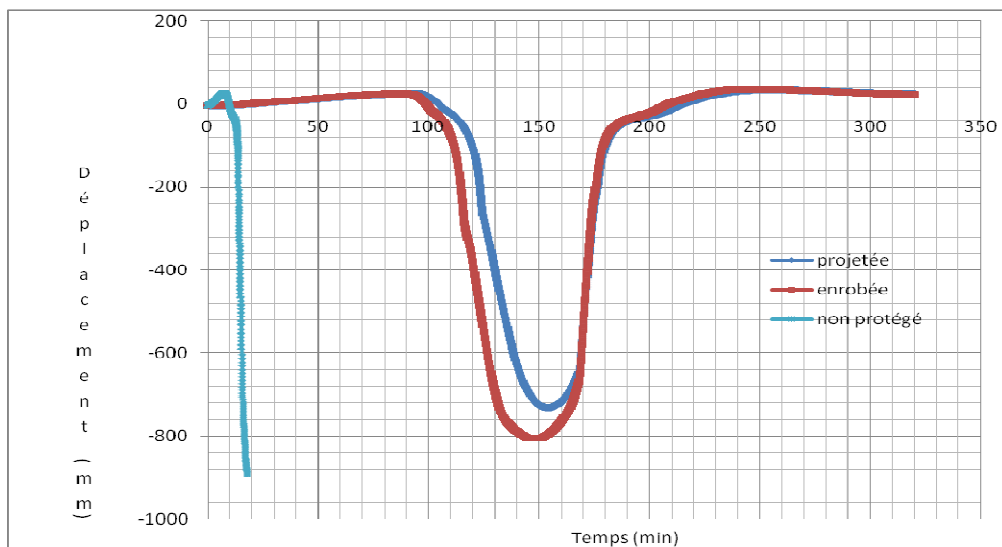


Figure 5-19 : Evolution en fonction du temps du déplacement latéral dans la poutre selon le type de protection sous le scénario Fire I

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS GENERALES

6-1 Rétrospective

Ce travail s'articule sur deux objectifs dont le premier porte essentiellement sur la revue et analyse détaillée du modèle paramétrique du calcul au feu naturel tel que proposé par l'Eurocode 1-2 et sur son implémentation dans le code de calcul **PASAT.FOR** en tenant compte des recommandations de l'Eurocode 3 sur le comportement de l'acier de construction sous l'action du feu naturel. Le second objectif aussi important que le premier, consiste de mettre en évidence, à travers une analyse paramétrique appropriée, l'effet de certains paramètres clés sur la résistance au feu comme le scénario de feu et le type de la protection thermique du substrat métallique.

Le code PASAT.FOR dans sa version 2015 (**P**rogramme d'**A**nalyse des **S**tructures en **A**cier sous l'action des gradients **T**hermiques) est un programme essentiellement non linéaire, par éléments finis, écrit en langage d'ordinateur FORTRAN, capable d'analyser le comportement au feu des structures métalliques, pouvant être éventuellement protégées par peintures intumescentes ou par protection matérielle de type projetée ou caisson qui enrobe complètement le profilé en acier. La modélisation de l'incendie est basée soit sur le scénario de feu conventionnelle de la courbe température-temps normalisée de type ISO Standard 834 ou à hydrocarbure soit sur la relation température-temps décrivant le feu naturel qui se distingue par la présence d'une phase de refroidissement, phase dans laquelle les températures décroissent jusqu'à l'extinction complète de l'incendie.

Le calcul de la répartition des températures dans les éléments incendiées est effectué sur la base que ces derniers sont munis ou non d'une protection thermique. La formulation de l'équation de la variation de la température utilise le principe de transfert de chaleur par convection et par rayonnement en admettant d'une manière fondamentale que la température du profil soumis à l'action du feu, est uniforme sur la section droite de l'élément, hypothèse justifiée par suite de la conductivité thermique élevée de l'acier.

Les équations d'équilibre incrémentales de la structure sont dérivées en exploitant le principe des travaux virtuels et la formulation lagrangienne corotationnelle dont le principe consiste à suivre le comportement de la structure et de ses éléments à n'importe quel instant de l'exposition au feu. Elles sont applicables pour un élément de poutre-colonne supposé former d'une section prismatique dans lequel s'exercent un effort normal et un moment fléchissant. Dans la discrétisation par éléments finis, on a utilisé un élément rectiligne à une seule dimension, liant deux nœuds disposés à ses extrémités et ayant trois degrés de liberté par nœud. Nous avons adopté pour le champ axial (ou leurs incréments) des fonctions linéaires de type Lagrange (de degré 1 et continuité C^0) et pour le champ de déplacement transversal, des fonctions cubiques de type Hermite (de degré 3 et continuité C^1).

6-2 Organisation du travail

Ce travail a été organisé en six chapitres, celui-ci étant compris, dont le premier présenté comme étant une introduction traite essentiellement l'état de la question et de la problématique de l'incendie dans les constructions ainsi que les objectifs fixés dans le cadre de ce travail.

Le chapitre deux est consacré à la revue de la physique générale de l'incendie et à l'analyse approfondie des principaux modèles de scénarios de feu rencontrés dans la pratique. Plusieurs points sont abordés afin d'enrichir la problématique et d'en comprendre la philosophie liée à l'analyse thermique en considérant le feu naturel avec phase de refroidissement. Particulièrement sont traités la relation entre la sécurité incendie et la résistance au feu des structures, les bases de la dynamique du feu, les modèles de représentation de l'incendie et les mécanismes de transfert de chaleur qui conduisent à l'équation d'équilibre de la propagation de la chaleur de Fourier.

Le chapitre suivant est consacré en premier lieu à l'examen des propriétés thermo-physico-mécaniques de l'acier de construction selon les recommandations de l'Eurocode 3-2 et suivi en second lieu par le problème de calcul de l'évolution de la température dans les éléments supposés munis ou non d'une couche de protection susceptible de protéger le substrat métallique soumis à l'action des températures élevées. Ce problème relève principalement de la thermique mais son importance est considérable où dans le cas des structures métalliques, le comportement au feu présente un certain nombre de particularités qui permettent d'envisager l'utilisation des méthodes simplifiées. Ceci est vrai en particulier pour le calcul de l'élévation de température. Par suite de la valeur élevée de la conductivité thermique de l'acier et de la grande surface exposée au feu dans le cas des profilés ordinaires, le problème de la température pourra se résoudre par une équation très simple basée sur la méthode d'Euler implicite, dans laquelle on réalise l'intégration pas à pas en exprimant la fonction ainsi obtenue à partir des valeurs au début de l'intervalle.

Le chapitre quatre se rapporte à l'analyse de la réponse structurale où sont rappelés brièvement les développements théoriques de la méthode de calcul en se basant sur l'expression incrémentale du principe des travaux virtuels dans le but de dériver les équations d'équilibre incrémentales de la structure. Les équations sont discrétisées par la méthode des éléments finis en utilisant l'algorithme de résolution de la formulation corotationnelle et un élément fini de type poutre-colonne ayant une continuité C^1 . Les critères de résistance et les principes de vérification au feu sont ensuite abordés en se basant sur les recommandations française et européenne dans la perspective d'introduire le critère de ruine lié à la capacité portante des éléments.

L'avant dernier chapitre est consacré à l'implémentation numérique où dans un premier temps est décrit le programme établi en spécifiant le fichier type de données et l'organigramme de la procédure de calcul adoptée. Dans un deuxième temps, le programme est illustré en procédant à des applications numériques portant sur l'évaluation de la réponse thermique et de la réponse structurale d'une structure métallique sujette initialement à l'action de charges mécaniques instantanées suivie d'une élévation de températures occasionnées par à un scénario de feu de type paramétrique ou standard. Dans un troisième temps, une analyse paramétrique appropriée est effectuée dans le but de mettre en évidence certains paramètres clés les plus influents sur la résistance au feu de la structure comme le scénario de feu et le type de protection du substrat métallique.

6-3 Résultats obtenus

Un exemple pratique d'une charpente métallique étagée, incendiée dans l'un de ses compartiments, a été illustré en vue d'analyser sa réponse thermo-structurale et d'en ainsi déduire sa résistance au feu en considérant les situations suivantes :

- Trois scénarios de feu à désignés par ISO834, Fire I et Fire II où ISO834 est un feu standard complètement développé utilisé souvent dans les tests de laboratoire. Fire I et Fire II sont deux scénarios de feu naturel où le premier est jugé d'une forte sévérité dont les températures dépassent largement 1200 °C susceptibles de se produire dans une librairie ou dans un local de stockage de quantités importantes de matériaux combustibles. Le second feu paramétrique est plutôt d'une sévérité moyenne dont peuvent être sujettes les bâtiments à usage d'habitation ; les températures ne dépassent guère 600 °C.

- Deux protections matérielles contre le feu, d'une épaisseur de 20 mm chacune, à savoir de type projetée (vermiculite ou perlite, humidité 15%) et enrobée (gypse, humidité 15%) disposée en caisson autour du profilé métallique.

- Deux critères de ruine dont l'un est basé sur la limitation des déplacements dans la structure (critère de flèche) où les déplacements latéraux des éléments structuraux ne doivent pas excéder le 1/30 ième de la longueur notamment des poutres ou des planchers. L'autre critère se rapporte à l'instabilité numérique des éléments i.e au-delà duquel un élément structural n'est plus capable de supporter les charges appliquées.

- Mode de chauffage des éléments à trois faces dont la quatrième face est protégée soit par la dalle de compression en ce qui est des poutres et des planchers et des murs de maçonnerie extérieurs ou de séparation en ce qui est des poteaux intérieurs.

Quant aux résultats de l'analyse paramétrique effectuée, nous pouvons en dégager les conclusions générales suivantes :

- les résultats révèlent que pour de nombreuses applications, les valeurs de la résistance au feu calculées sur la base d'une exposition au feu standard ne peuvent être conservatives si le feu possède une phase de refroidissement similaire à celle du scénario Fire I considérée dans notre cas.
- Quand le système de protection par caisson est employé en enrobant complètement le substrat métallique, les déplacements latéraux enregistrés particulièrement dans les poutres sont plus importants allant jusqu'à 60% en comparaison à la protection du type projetée. C'est principalement en raison du niveau des températures élevées qui se fait sentir notamment à l'approche de la ruine.
- Le critère de flèche est souvent plus défavorable que le critère de ruine basé sur l'instabilité numérique conduisant à des valeurs de résistance au feu beaucoup plus réduite.
- La méthode de résolution d'Euler implicite comparée à sa forme explicite dite modifiée donne des résultats assez satisfaisants en réduisant sensiblement le pas de temps au plus égale à une seconde ($\Delta t = 1$ s).

6-4 Recommandations futures

Ce qu'on pourrait enfin suggérer comme études futures pour l'amélioration de ce thème de travail sont les suivants :

- Améliorer le code PASAT.FOR en introduisant une subroutine permettant de tenir compte de la notion de déchargement dans la relation contrainte-déformation et élucider le problème des instabilités numériques observées dans certains intervalles de temps.
- Etablir une méthode de justification complète de la résistance au feu des éléments structuraux métalliques (poutre, colonne, dalle) dans un environnement d'incendie naturel.

References

- [1] European standard EN 1991-1-2, Eurocode 1: Basis of design and actions on structures, part 1-2: actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN- CEN, (2002).
- [2] ENV 1992-1-2, Eurocode 2 : Design of concrete structures- Part 1-2 : general rules- Structural fire design. Prénorme Européenne, Nov. 1995.
- [3] Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.2: General Rules, Structural Fire Design, European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium
- [4] ENV 1994-1-2, Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton. Prénorme Européenne, 1999.
- [5] Bruls A. and Vandavelde P., Sécurité contre l'incendie dans les bâtiments- Partie 1 prévention passive, Universités de Liège et de Gent, 2000.
- [6] Sadaoui A., Notes de cours de résistance au feu des structures, M2 académique, option construction métallique, département de Génie Civil, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2014-15.
- [7] Dotreppe J.C. Méthodes numériques pour la simulation du comportement au feu des structures en acier et en béton armé. Thèse d'agrégation de l'Université de Liège, 1980.
- [8] Dotreppe, J.C. Calcul et conception des structures soumises à l'incendie – Notes complémentaires. Université de Liège, Faculté des sciences appliquées, Octobre 2000.
- [9] Franssen JM, Kodur V and Zaharia R, Design Steel Structures for fire safety, CRC Press, 2009
- [10] Purkis JA, Fire safety engineering design of structures, 2nd edition, 2007.
- [11] Magnusson, S.E. and Thelandersson, S. (1970) Temperature-Time Curves of Complete Process of Fire Development. A Theoretical Study of Wood Fuel Fires in Enclosed Spaces. Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building Construction Series, No. 65, CIB/CTF/72/46, Stockholm.
- [12] Wickstrom, U. Application of the standard fire curve for expressing natural fires for design purposes, in *Fire Safety: Science and Engineering* (ed. T.Z. Harmathy), STP 882, American Society of Testing and Materials, 1985, pp. 145–59.
- [13]] Franssen, JM. Improvement of the parametric fire of Eurocode 1 based on experimental tests results, proc. 6th int. Symp. On Fire safety Science, iafss, Curtat, M.ed., Poitiers, 2000, 927-938.
- [14] ENV 1992-1-2, Eurocode 2 : Design of concrete structures- Part 1-2 : general rules- Structural fire design. Prénorme Européenne, Nov. 1995.
- [15] Cadornin, J.F. and Franssen, J.M. (1999) The One Zone Model Ozone- Description and Validation Based on 54 Experimental Fire Tests. Rapport interne SPEC/99_05, Département de Mécanique des Matériaux et Structures, University of Liège.
- [16] Dotreppe J.C. Méthodes numériques pour la simulation du comportement au feu des structures en acier et en béton armé. Thèse d'agrégation de l'Université de Liège, 1980.
- [17] ECCS, European recommendations for the fire safety of steel structures, European convention for constructional steel work, Technical committee 3, fire Safety of Steel Structures, Amsterdam, 1983.
- [18] Eurocode 3: Design of steel structures- Part 1-1: general rules and rules for buildings. BS EN 1993-1-1: 2005.
- [19] ISO Standard 834: Fire resistance tests- Elements of building construction, International organisation for Standardization, Geneva, 2002.
- [20] Djettou T. Analyse de la réponse au feu des structures d'acier protégées thermiquement par peintures intumescentes, Master académique, Département de Génie Civil, Université Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, Mémoire encadré par A. Sadaoui et soutenu le 03-07-2014.

- [21] Dotreppe J.C., Behets J.F., Dehareng J., Peeters G., Van Acker A., Résistance au feu des structures, Principes généraux et recommandations à l'usage des auteurs de projets, Université de Liège, 1983.
- [22] ECCS-Technical committee 3-Fire Safety of Steel Structures, European Recommendations of the fire safety of Steel Structures, Calculation of the fire resistance of load bearing elements and structural assemblies exposed to the standard fire, Elsevier scientific publishing company, New York, 1983.
- [23] ARBED S.A., Programme de fabrication des poutrelles en fers U, Luxembourg.
- [24] Axe de recherche CNEPRU. 'Relation entre la perméabilité, l'endommagement et l'éclatement du béton dans un environnement d'incendie'. N° du projet: J0400520110047 Agrée le 01 janvier 2012, dirigé par A Sadaoui, 2012-14.
- [25] Duquesne S., Approche systématique des procédés d'ignifugation des produits polymères- Application aux systèmes intumescents et aux nano-composites à matrice polymère, Habilitation à diriger des recherches, 2006, Université des sciences et de technologies de Lille 1.
- [26] Gana S., Analyse numérique du comportement au feu des structures en acier conformément à l'EC3, Mémoire d'ingénieur dirigé par A. Sadaoui, Département de Génie Civil, UMMTO, 2003.
- [27] Picard A., Cours d'analyse des structures, Département de Génie civil, Université Laval, Canada, 1981.
- [28] Prédimensionnement automatique des charpentes métalliques. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur en génie civil, soutenu par A. Kourat & Djemai B., Juin 1988.

Annexe A

Subroutine de calcul des températures dans les éléments

```
SUBROUTINE FTEMP(IGPE,VAM,VV,KT,DTE,VTPC,VTPC0,NELTX,NINCRX,KFIRE,
+IMP3,TLIM,QFD,AF,AT,HEQ,AV,BFAC,XLANDAP,DP0,CCP,RHOP)
C-----
C Calcul de la température moyenne dans une section d'un élément métallique muni ou non d'une protection
C soumis à l'action d'un scénario de feu (iso834, hydrocarbure ou naturel )
C*****
C ENTREE DES DONNES :
C IGPE: No de groupe de propriétés élémentaires
C VAM : Valeur du périmètre de la section (AM) exposée au feu
C VV : Valeur de la surface de la section (V)
C KT : Nombre d'incrément de temps (INTE)
C DTE : Valeur de l'incrément de temps (en seconde)
C NELTX : Paramètre pour le dimensionnement de matrices
C NINCRX : Paramètre pour l'impression
C KFIRE : Type de scénario de feu (=1 : iso834 ; =2 : hydrocarbure ; = 3 : paramétrique)
C IMP3 : No du fichier d'impression
C TLIM : Temps limite du scénario du feu (=5/12 h = 25min : slow fire growth; =1/3h=20 min: medium fire
C growth; = 1/4 h = 15min : fast fire growth)
C QFD: Charge calorifique (MJ/m2 du placher)
C AF : Surface du plancher (m2) du compartiment
C AT : Surface totale des faces du compartiment (m2)
C HEQ : Hauteur équivalente des ouvertures (m) du compartiment
C AV : Surface des ouvertures (m2) du compartiment
C BFAC : Coefficient de transmission calorifique (Ws0.5/m2K)
C LANDAP : Conductivité thermique de la protection (W/m.°K)
C DP0 : Epaisseur initiale de la protection (mm)
CCP : Chaleur spécifique de la protection (J/kg.K)
C RHOP : Masse volumique de la protection (kg/m3)
C SORTIE : Résultats
C VTPC0 : Stockage des températures calculées en l'absence de protection (JPROTEC=0)
C VTPC : Stockage des températures calculées en présence d'une protection (JPROTEC=0)
integer KT,K,IGPE,IMP3,KFIRE
real *8 DTE,AM,V,CTF,CHCC,TPC,ERES,SIGMA,ATEMPS,CTCK,CX,CHCR,CHC,
OREF,BREF,GAMA,
+ CC,FCC,VTPC(NELTX,NINCRX),COEF,VAM,VV,TIME,RHO,COEF2,
OLIM,GAMLIM,TIMED11,
+ VTPC0(NELTX,NINCRX),XLANDAP,DP,DP0,RHOP,CPhi,CCP,COEF1,
+ COEF3,CTCK0,DCTCK,DTPC0,TPC0,FDP,COEF1X,COEF2X,TIME1,
TIMEMAX,TIMED,TTIME,
+ TIME0,TLIM,QFD,AF,AT,HEQ,AV,BFAC,QTD,TIMED1,TIMED2,OFAC,
TTIMED,CTCKMAX
```

```

AM=VAM
V=VV
c Masse volumique de l'acier - [Kg/m3]
RHO=7850.D0
c Température initiale
CTF=20.D0
c Coefficient d'échange par convection- [W/m2.K]
CHCC=25.D0
c Coefficient de l'émissivité globale- [-]
ERES=0.7D0
c Constante de Boltzman- [W/m2.K4]
SIGMA=5.67D-08
c Initialisation de la température moyenne de la paroi à 20 °C
TPC=20.D0
c Initialisation de la température moyenne de l'acier en presence de la protection à 20°C
TPC0=20.D0

c -----
write(imp3,*)'igpe:',igpe,'am:',am,'v',v,'am/v',am/v
write(imp3,*)'time(min) ctck en °C tpc en°C tpc1 en°C'
do 100 K=1,KT
ATEMPS=DFLOAT(K-1)*DTE
C Calcul des températures en l'absence de la protection (JPROTEC=0)
if(KFIRE.eq.1) then
C Courbe standard température-temps du scénario normalisé iso834 au temps t+dt,[°C]
CTCK=345.D0*DLOG10(8.D0*(ATEMPS+DTE)/60.D0+1.D0)+CTF
else if (KFIRE.eq.2) then
C Courbe température-temps du scénario de feu à hydrocarbure au temps t+dt,[°C]
TIME1=(ATEMPS+DTE)/60.D0
COEF1X=-0.675D0*DEXP(-2.5D0*TIME1)
COEF2X=-0.325D0*DEXP(-0.167D0*TIME1)
CTCK=CTF+1080.D0*(1.D0+COEF1X+COEF2X)
else if (KFIRE.eq.3) then
C Courbe température-temps du feu paramétrique au temps t+dt,[°C]
C Natural fire: growth and decay phase with EN1991-1-2
C timed1 and timed2 in hours
timed1=0.5d0
timed2=2.d0
C opening factor: ofac [m**0.5]
ofac=av*DSQRT(heq)/at
oref=0.04d0
C fire load reported to the total area of compartment room: qtd [Mj/m2]
qtd=qfd*af/at
bref=1160.d0
gama=((ofac/oref)**2)/(bfac/bref)**2
C time corresponding to max temperature of decay phase: timed [h]
timemax=(0.20d0*qtd)/(ofac*1000)
timed=timemax*gama
C ttime [h]
ttime=(atemps+dte)/3600.d0
if(timemax.le.tlim) go to 200
C fire controlled by ventilation
ttimed=ttime*gama

```

```

C max temperature
ctckmax=CTF+1325.d0*(1.-0.324d0*DEXP(-0.2*timed)
                                -0.204d0*DEXP(-1.7*timed)-0.472d0*DEXP(-19*timed))
    if(ttime.le.timemax) then
C growth phase
    ctck=CTF+1325.d0*(1-0.324d0*DEXP(-0.2*timed)-
                                0.204d0*DEXP(-1.7*timed)-0.472d0*DEXP(-19*ttimed))
C decay phase
    else if(timed.le.timed1) then
        ctck=ctckmax-625.d0*(ttimed-timed)
    else if(timed.gt.timed1.and.timed.lt.timed2) then
        ctck=ctckmax-250.d0*(3.d0-timed)*(ttimed-timed)
    else if(timed.ge.timed2) then
        ctck=ctckmax-250.d0*(ttimed-timed)
    endif
    go to 300
C fire controlled by fuel
200 continue
    olim=0.10d0*qtd/(tlim*1000)
    gamlim=((olim/oref)**2)/(bfac/bref)**2
    coefk=1.0
    if(ofac.gt.0.04.and.qtd.lt.75.d0.and.bfac.lt.1160.d0)then
        coefk=1+((ofac-0.04d0)/0.04d0)*((qtd-75.d0)/75.d0)*(1160.d0-bfac)/1160.d0
    endif
    gamlim=gamlim*coefk
C time corresponding to max temperature, timed [h]
    timed1=gamlim*tlim
    ctckmax=CTF+1325.d0*(1.-0.324d0*DEXP(-0.2*timed1)-
                                0.204d0*DEXP(-1.7*timed1)-0.472d0*DEXP(-19*timed1))
    if(ttime.le.tlim) then
C growth phase
        ttimed=gamlim*ttime
        ctck=CTF+1325.d0*(1-0.324d0*DEXP(-0.2*ttimed)-
                                0.204d0*DEXP(-1.7*ttimed)-0.472d0*DEXP(-19*ttimed))
C decay phase
        else if(timed.le.timed1) then
            ctck=ctckmax-625.d0*gama*(ttime-tlim)
        else if(timed.gt.timed1.and.timed.lt.timed2) then
            ctck=ctckmax-250.d0*(3.d0-gama*timemax)*(ttime-tlim)*gama
        else if(timed.ge.timed2) then
            ctck=ctckmax-250.d0*gama*(ttime-tlim)
        endif
300 continue
    if(ctck.lt.CTF) ctck=CTF
C Fin du test de if(kfire=3)
    endif
C Coefficient d'échange par rayonnement,[W/m2.K]
    CX=(TPC+273.D0)/(CTCK+273.D0)
    CHCR=ERES*SIGMA*(CTCK+273.D0)**3*(1.D0+CX+CX*CX+CX**3)
C Coefficient d'échange par convection plus rayonnement,[W/m2.K]
    CHC=CHCC+CHCR
C Chaleur spécifique de l'acier, [J/kg.K]
    CC=FCC(TPC)

```

```

C Calcul de la température à l'instant t+dt- [°C]
  COEF=DTE*AM/(V*RHO*CC)
  TPC=TPC+COEF*CHC*(CTCK-TPC)
C Fin de calcul des températures en l'absence de la protection (JPROTEC=0)
C -----
  VTPC(IGPE,K)=TPC
C Epaisseur en fonction de la température du matériau de protection contre le feu, (m)
  DP=FDP(TPC0,DP0)
C Calcul des températures en considérant la protection (JPROTEC=1)
C -----
C Chaleur spécifique de l'acier, [J/kg.K], en présence de la protection
  CC=FCC(TPC0)
  CPHI=CCP*RHOP*DP*AM/(V*RHO*CC)
  COEF1=XLANDAP*AM/(V*DP*RHO*CC)
  COEF2=1.D0/(1.D0+CPHI/3.D0)
  if(KFIRE.eq.1) then
C Courbe standard température-temps du scénario normalisé iso834 au temps t, [°C]
  CTCK0=345.D0*DLOG10(8.D0*(ATEMPS)/60.D0+1.D0)+CTF
  else if (KFIRE.eq.2) then
C Courbe température-temps du scénario de feu à hydrocarbure au temps t,[°C]
  TIME0=ATEMPS/60.D0
  COEF1X=-0.675D0*DEXP(-2.5D0*TIME0)
  COEF2X=-0.325D0*DEXP(-0.167D0*TIME0)
  CTCK0=CTF+1080.D0*(1.D0+COEF1X+COEF2X)
  else if (KFIRE.eq.3) then
C Courbe température-temps du feu paramétrique au temps t, [°C]
C Natural fire: growth and decay phase with EN1991-1-2
C timed1 and timed2 in hours
  timed1=0.5d0
  timed2=2.d0
C opening factor: o [m**0.5]
  ofac=av*DSQRT(heq)/at
  oref=0.04d0
C fire load reported to the total area of compartment room: qtd [Mj/m2]
  qtd=qfd*af/at
  bref=1160.d0
  gama=((ofac/oref)**2)/(bfac/bref)**2
C time corresponding to max temperature of decay phase: timed [h]
  timemax=(0.20d0*qtd)/(ofac*1000)
  timed=timemax*gama
C ttime [h]
  ttime=atemp/3600.d0
  if(timemax.le.tlim) go to 400
C fire controlled by ventilation
  ttimed=ttime*gama
C max temperature
  ctckmax=ctf+1325.d0*(1.-0.324d0*DEXP(-0.2*timed)
    -0.204d0*DEXP(-1.7*timed)-0.472d0*DEXP(-19*timed))
  if(ttime.le.timemax) then
C growth phase
  ctck0=ctf+1325.d0*(1-0.324d0*DEXP(-0.2*ttimed)-
    0.204d0*DEXP(-1.7*ttimed)-0.472d0*DEXP(-19*ttimed))

```

```

C decay phase
  else if(timed.le.timed1) then
    ctck0=ctckmax-625.d0*(ttimed-timed)
  else if(timed.gt.timed1.and.timed.lt.timed2) then
    ctck0=ctckmax-250.d0*(3.d0-timed)*(ttimed-timed)
  else if(timed.ge.timed2) then
    ctck0=ctckmax-250.d0*(ttimed-timed)
  endif
  go to 500
C fire controlled by fuel
400 continue
  olim=0.10d0*qtd/(tlim*1000)
  gamlim=((olim/oref)**2)/(bfac/bref)**2
  coefk=1.0
  if(ofac.gt.0.04.and.qtd.lt.75.d0.and.bfac.lt.1160.d0)then
    coefk=1+((ofac-0.04d0)/0.04d0)*((qtd-75.d0)/75.d0)*(1160.d0-bfac)/1160.d0
  endif
  gamlim=gamlim*coefk
C time corresponding to max temperature, timed [h]
  timed1=gamlim*tlim
  ctckmax=ctf+1325.d0*(1.-0.324d0*DEXP(-0.2*timed1)-
    0.204d0*DEXP(-1.7*timed1)-0.472d0*DEXP(-19*timed1))
  if(ttime.le.tlim) then
C growth phase
    timed=gamlim*ttime
    ctck0=ctf+1325.d0*(1-0.324d0*DEXP(-0.2*ttimed)-
      0.204d0*DEXP(-1.7*ttimed)-0.472d0*DEXP(-19*ttimed))
C decay phase
    else if(timed.le.timed1) then
      ctck0=ctckmax-625.d0*gama*(ttime-tlim)
    else if(timed.gt.timed1.and.timed.lt.timed2) then
      ctck0=ctckmax-250.d0*(3.d0-gama*timemax)*(ttime-tlim)*gama
    else if(timed.ge.timed2) then
      ctck0=ctckmax-250.d0*gama*(ttime-tlim)
    endif
500 continue
  if(ctck0.lt.ctf) ctck0=ctf
  endif
C Fin du test de if(kfire=3; protec=1)
C Calcul de l'augmentation de temperature des gaz pendant l'intervalle de temps dt, [°C]
  DCTCK=CTCK-CTCK0
  COEF3=DEXP((CPhi/10)-1)*DCTCK
C Augmentation de la temperature de l'acier au temps t+dt, [°C]
  DTPC0=COEF1*COEF2*DTE*(CTCK-TPC0)-COEF3
  if(DCTCK.gt.0.D0.and.DTPC0.lt.0.D0) DTPC0=0.D0
C Temperature de l'acier au temps t+dt, [°C]
  TPC0=TPC0+DTPC0
  VTPC0(IGPE,K)=TPC0
  time=(atemps+dte)/60.D0
  write(imp3,50)time,ctck,tpc,tpc0
50 format(1x,F10.3,3(5x,f10.3))
100 continue
end

```

```

function FCC(T)
c -----
c   Calcul de la valeur de la chaleur spécifique de l'acier selon l'Eurocode 3 - [J/Kg.K]
c -----
  real*8 T,FCC
c -----
  if(T.ge.20.D0.and.T.lt.600.D0) then
    FCC=425.D0+7.73D-01*T-1.69D-03*T**2+2.22D-06*T**3
  elseif(T.lt.735.D0) then
    FCC=666.D0+13002.D0/(738.D0-T)
  elseif(T.lt.900.D0) then
    FCC=545.D0+17820.D0/(T-731.D0)
  elseif(T.lt.1200.D0) then
    FCC=650.D0
  endif
c -----
  return
  end
C*****
  function FDP(T,DP00)
c Calcul de l'épaisseur du matériau de protection contre le feu, (m) à une température T[°C]
c s'il s'agit de peinture intumescente sinon prendre une valeur constante de l'épaisseur
  real*8 T,FDP,TDPMAX,T0,DP0,DP00,DPMAX,TMAX,DPTMAX
  DATA INTUMES/0/,T0/20.D0/
  if (INTUMES.eq.0) then
    FDP=DP00*1.D-03
  elseif (INTUMES.eq.1) then
c valeurs caractéristiques de la variation de l'épaisseur en fonction de la température
    DP0=DP00*1.D-03
    TDPMAX=150.D0
    DPMAX=20.D-03
    TMAX=1200.D0
    DPTMAX=0.9D0*DPMAX
    if(T.ge.20.D0.and.T.lt.TDPMAX) then
      FDP=DP0+(DPMAX-DP0)*(T-T0)/(TDPMAX-T0)
    elseif(T.lt.TMAX) then
      FDP=DPMAX-(DPMAX-DPTMAX)*(T-TDPMAX)/(TMAX-TDPMAX)
    endif
  endif
  return
  end

```

Annexe B

Méthode de prédimensionnement des éléments

Il s'agit de dimensionner une poutre et une colonne les plus sollicitées de chaque niveau pour des raisons esthétiques et choisir des IPE pour les poutres et des HEA pour les colonnes. Les éléments sont dimensionnés selon les recommandations de l'EC3-1-1.

B-1 Détermination des efforts internes

Les efforts internes sont déterminés en utilisant la méthode approximative [] qui se base sur le principe de la méthode de Hardy Cross [] sous l'action des charges verticales en introduisant l'hypothèse : $(EI)_{\text{colonne}}/(EI)_{\text{poutre}} \approx 1$. Le diagramme des moments fléchissants et les réactions aux extrémités des membrures qui en résultent sont représentés sur les figures D-1 et D-2.

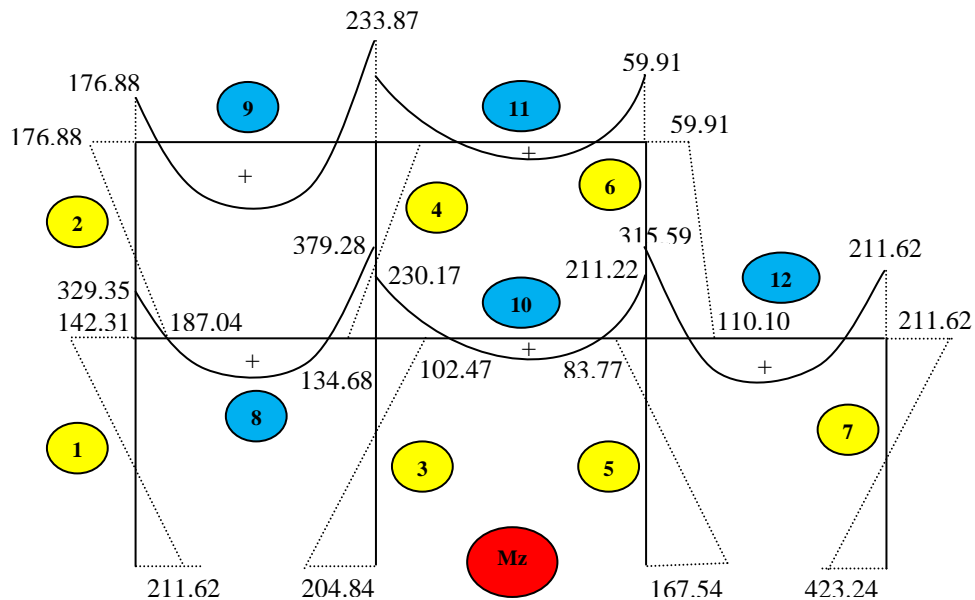


Figure D-1 : Diagramme des moments fléchissants

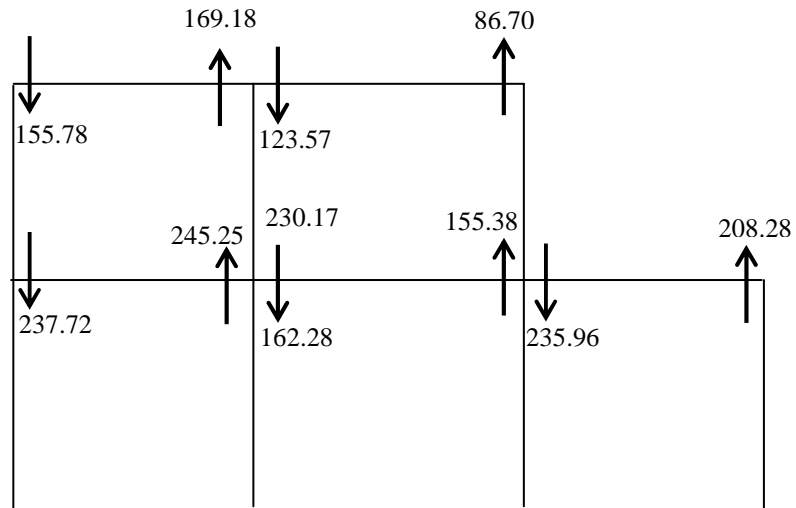
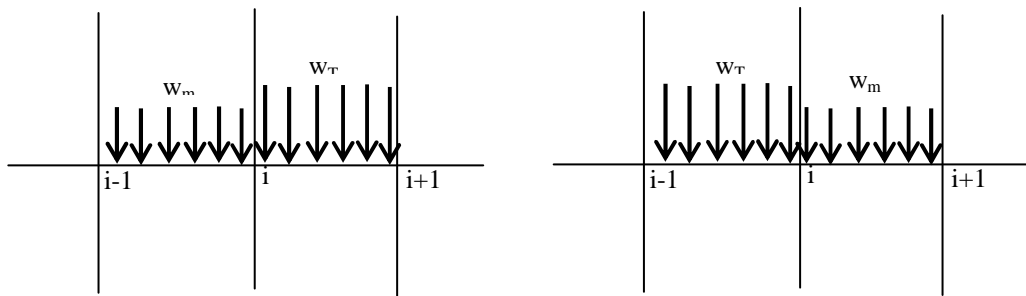
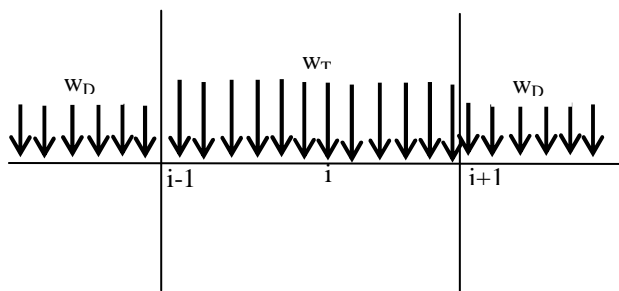


Figure D-2 : Réactions aux extrémités des membrures en kN

Notons que les réactions aux extrémités des membrures sont déterminées suivant la disposition des charges indiquée sur les figures D-3 et D-4 respectivement pour les colonnes et les poutres.

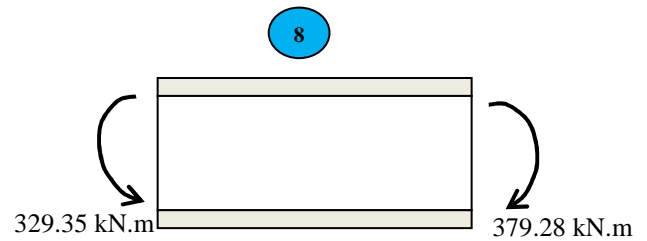
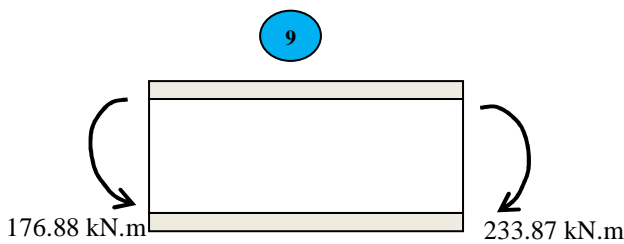


D-3 Disposition des charges pour les colonnes



D-4 Disposition des charges pour les poutres

B-2 Dimensionnement des poutres



- Poutre n°8 :

- Condition de résistance : $M_{Ed} \leq M_{pl,Rd}$; $M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{MO}}$; $\gamma_{MO} = 1$; Section : classe 1,2 ; $f_y = 235$

$$\text{MPa} ; W_{pl} \geq \frac{M_{Ed}}{f_y} \rightarrow W_{pl,y} \geq \frac{379.28 \times 10^6}{235} = 1613.96 \times 10^3 \text{ mm}^3 \text{ soit IPE 500 ayant les}$$

caractéristiques : $h = 500 \text{ mm}$, $b = 200 \text{ mm}$, $t_f = 16 \text{ mm}$, $t_w = 10.2 \text{ mm}$, $r = 21 \text{ mm}$, $A = 116 \text{ cm}^2$, $W_{pl,z} = 2194 \text{ cm}^3$, $d = 426 \text{ mm}$, $I_z = 482 \times 10^6 \text{ cm}^4$.

- Classe du profilé :

- Semelle comprimée : $\frac{c}{t_f} = \frac{b_f/2}{t_f} \leq 10 \varepsilon$, $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 1$

$$\frac{c}{t_f} = \frac{b - 2 \times r - t_w}{2t_f} = \frac{200 - 2 \times 21 - 10.2}{2 \times 16} = \frac{145.8}{2 \times 16} = 4.56 \leq 10 \varepsilon = 10 \rightarrow \text{Semelle est de classe 1.}$$

- Ame fléchie : $\frac{d}{t_w} \leq 72 \varepsilon$; $\frac{d}{t_w} = \frac{426}{10.2} = 41.76 < 72 \rightarrow \text{Ame de classe 1.}$

d'où le profilé IPE 500 est de classe 1.

- Poutre n°9 : $M_{Ed} = 233.87 \text{ kN.m}$

- Condition de résistance : $W_{pl,y} \geq \frac{233.87 \times 10^6}{235} = 995.19 \times 10^3 \text{ mm}^3 \text{ soit IPE 360 ayant les}$

caractéristiques géométriques : $h = 360 \text{ mm}$, $b = 170 \text{ mm}$, $t_f = 12.7 \text{ mm}$, $t_w = 8 \text{ mm}$, $r = 18 \text{ mm}$, $A = 72.7 \text{ cm}^2$, $W_{pl} = 1019 \text{ cm}^3$, $d = 298.8 \text{ mm}$, $I_z = 162.7 \times 10^6 \text{ cm}^4$

- Classe du profilé :

- Semelle comprimée : $\frac{c}{t_f} = \frac{b_f/2}{t_f} \leq 10 \varepsilon$, $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 1$

$$\frac{c}{t_f} = \frac{b - 2 \times r - t_w}{2t_f} = \frac{170 - 2 \times 18 - 8}{2 \times 12.7} = \frac{126}{2 \times 12.7} = 4.96 \leq 10 \varepsilon = 10 \rightarrow \text{Semelle est de classe 1.}$$

- Ame fléchie : $\frac{d}{t_w} \leq 72 \varepsilon$; $\frac{d}{t_w} = \frac{298.6}{8} = 37.33 \leq 72 \rightarrow \text{Ame de classe 1.}$

d'où le profilé IPE 360 est de classe 1.

B-3 Dimensionnement des colonnes

B-3-1 Formules utiles de vérification préconisées par l'Eurocode 3 Partie 1-1

- Condition de résistance :

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} ; M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \left[1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \right)^2 \right] ; M_{pl,Rd} = W_{pl,y} f_y ; N_{pl,Rd} = A f_y ; W_{pl} = W_{pl,z} \text{ (en référence à l'axe fort } z \text{ : fig.5-3 ou fig. D-5) :}$$

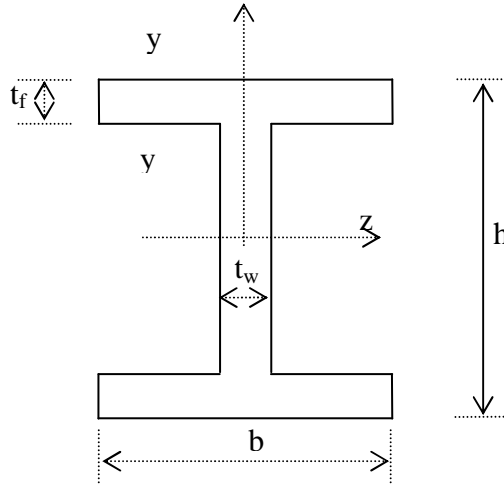


Figure D-5 : Caractéristiques géométriques de la section

- Condition de stabilité : $\frac{N_{Ed}}{\chi_{\min} \frac{A f_y}{\gamma_{M1}}} + k_z \frac{M_{y,Ed}}{\frac{W_z f_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1 ; \chi_{\min} = \min(\chi_y ; \chi_z) ; \kappa_z = 1 - \frac{\mu_z \cdot N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{pl,Rd}}$ (selon

l'axe fort : z) ; $\kappa_z \leq 3 ; \mu_z = (1.2 \beta_{M\phi} - 3) \bar{\lambda}_z + 0.71 \times \beta_{M\psi} - 0.29 \leq 0.8 ; \mu_z \leq 0.8 ;$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{l_z}{i_y} \sqrt{\frac{f_y}{E}} ; \bar{\lambda}_y = \frac{l_y}{i_y} \sqrt{\frac{f_y}{E}} ; (\bar{\lambda}_z, \bar{\lambda}_y) \leq 1.1 ; \beta_{M\psi} = 1.8 - 0.7\psi ;$$

$$\psi = \frac{M_2}{M_1} \text{ (fig. D-6) ; } \chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^2}} ; \chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^2}} ; \phi_z = 0.5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z \right]$$

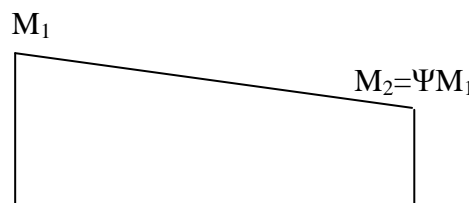


Figure D-6 : Rapport des moments aux extrémités de la colonne

- **Classification des sections en flexion composée :** Pour les pièces soumises à un moment fléchissant et à une charge axiale (flexion composée), les limites à utiliser pour l'élancement de l'âme dépendent de la position de l'axe neutre (AN). Dans le plan pratique, il faut définir, pour la flexion composée, des équations simples qui vont permettre de classer l'âme des sections sans avoir à recourir au calcul de la position de l'AN. Le paramètre utilisé dans ces équations et qui tient compte indirectement de la position de l'axe neutre, est le rapport $\frac{N_{Ed}}{N_{plRd}}$ où N_{Ed} représente la charge axiale pondérée de calcul agissant sur la section et N_{plRd} , la capacité de la section en compression pure égale à AF_y ; A étant l'aire de la section et F_y , la contrainte limite du matériau acier qui est égale dans notre cas à 235 MPa. La norme ACNOR S116.1-M78 [] propose les équations suivantes dont les limites sont toutes dérivées à partir d'études théoriques et qui ont été complétées par de nombreuses vérifications expérimentales.

- **Classe 1 :** $\frac{h_0}{t_w} \leq \frac{1100}{\sqrt{F_y}} (1 - 1.4 \frac{N_{Ed}}{N_{plRd}})$ si $\frac{N_{Ed}}{N_{plRd}} \leq 0.28$; $\frac{h_0}{t_w} \leq \frac{670}{\sqrt{F_y}}$ si $\frac{N_{Ed}}{N_{plRd}} > 0.28$
- **Classe 2 :** $\frac{h_0}{t_w} \leq \frac{1370}{\sqrt{F_y}} (1 - 1.28 \frac{N_{Ed}}{N_{plRd}})$ si $\frac{N_{Ed}}{N_{plRd}} \leq 0.15$; $\frac{h_0}{t_w} \leq \frac{1180}{\sqrt{F_y}} (1 - 0.43 \frac{N_{Ed}}{N_{plRd}})$ si $\frac{N_{Ed}}{N_{plRd}} > 0.15$
- **Classe 3 :** $\frac{h_0}{t_w} \leq \frac{1810}{\sqrt{F_y}} (1 - 1.69 \frac{N_{Ed}}{N_{plRd}})$ si $\frac{N_{Ed}}{N_{plRd}} \leq 0.15$; $\frac{h_0}{t_w} \leq \frac{1470}{\sqrt{F_y}} (1 - 0.54 \frac{N_{Ed}}{N_{plRd}})$ si $\frac{N_{Ed}}{N_{plRd}} > 0.15$

B-3-2 Dimensionnement des colonnes du niveau 1 (colonne 7) :

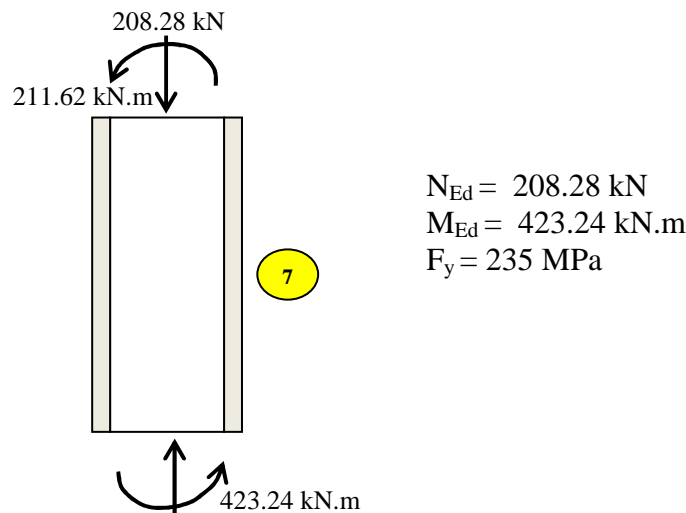


Figure D-6: Colonnes du niveau 1

Soit un profilé type HE450A ayant les caractéristiques : $b=300 \text{ mm}$; $h=440 \text{ mm}$; $t_f=21 \text{ mm}$; $t_w=11.5 \text{ mm}$; $h_0 = 344 \text{ mm}$; $r = 27 \text{ mm}$; $A = 178 \text{ cm}^2$; $i_z = 18.9 \text{ cm}$; $i_y = 7.29 \text{ cm}$; $W_{pl,z} = 3216 \text{ cm}^3$.

- Condition de résistance : $M_{N,Rd} = 3216 \times 10^4 \times 235 \left[1 - \left(\frac{208.28}{17800 \times 235} \right)^2 \right] \geq M_{Ed} = 423.23 \text{ kN}$

- Classe de la section: $\frac{h_0}{t_w} = \frac{344}{11.5} = 29.9 < \frac{670}{\sqrt{f_y}} = \frac{670}{\sqrt{235}} = 43.71$; $\frac{h_0}{t_w} \leq \frac{1100}{\sqrt{F_y}} (1 - 1.4 \frac{N_{Ed}}{N_{plRd}})$
 $= \frac{1100}{\sqrt{235}} (1 - 1.4 \times 0.05) = 66.73$.

- Condition de stabilité :

$$\bar{\lambda}_z = \frac{l_z}{i_z} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{460}{18.92} \sqrt{\frac{235}{2 \times 10^5}} = 0.83 ; \bar{\lambda}_y = \frac{\bar{\lambda}_z}{7.27} \times 18.92 = 2.16$$

$$\bar{\lambda}_z = 0.83 \rightarrow \phi_z = 0.5 [1 + 0.21(0.83 - 0.21) + 0.83^2] = 0.91 \rightarrow \chi_z = \frac{1}{0.91 + \sqrt{0.91^2 - 0.83^2}} = 0.78$$

$$\bar{\lambda}_y = 2.16 \rightarrow \phi_y = 0.5 [1 + 0.21(2.16 - 0.2) + 2.16^2] = 3.04 \rightarrow \chi_y = \frac{1}{3.04 + \sqrt{3.04^2 - 2.16^2}} = 0.16$$

soit $\chi_{\min} = \min(\chi_y; \chi_z) = \min(0.78; 0.19) = 0.19$.

$$\psi = \frac{211.62}{423.24} = 0.5 \rightarrow \beta_{M\psi} = 1.8 - 0.7 \times 0.5 = 1.45 ; \mu_z = (1.2 \times 1.45 - 3) \times 0.83 + 0.71 \times 1.45 - 0.29$$

$$= -0.31 \leq 0.8 ; \kappa_z = 1 - \frac{-0.31 \times 208.28}{0.78 \times 4183} = 1.02 < 3 \text{ soit } \frac{208.28}{0.19 \times 4183} + \frac{1.02 \times 423.24}{755.76} = 0.83 < 1$$

B-3-3 Dimensionnement des colonnes du niveau 2 (colonne 2):

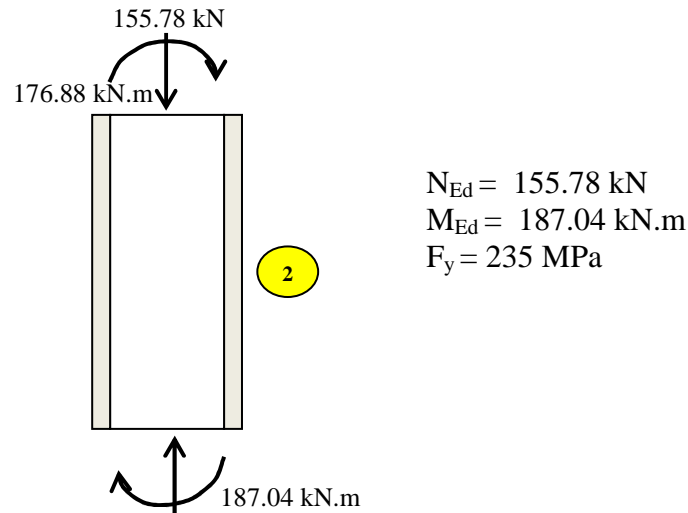


Figure D-6: Colonnes du niveau 2

Soit un profilé type HE300A ayant les caractéristiques : $b=300$ mm ; $h=290$ mm ; $t_f=14$ mm ; $t_w=8.5$ mm ; $r=14$ mm ; $d=208$ mm ; $A=113.0$ cm² ; $i_z=12.74$ cm ; $i_y=7.29$ cm ; $W_{pl,z}=1383$ cm³.

- Condition de résistance : $M_{N,Rd} = 1383 \times 10^4 \times 235 \left[1 - \left(\frac{155.78}{112500 \times 235} \right)^2 \right] = 323.87 \geq M_{Ed} = 187.04$ kN.m.
- Classe de la section : $\frac{h_0}{t_w} = \frac{208}{8.5} = 24.47 < \frac{670}{\sqrt{f_y}} = \frac{670}{\sqrt{235}} = 43.71$; $\frac{h_0}{t_w} \leq \frac{1100}{\sqrt{F_y}} (1 - 1.4 \times 0.059) = 65.83 \rightarrow$ Section est de classe 1.
- Condition de stabilité :

$$\bar{\lambda}_z = \frac{l_z}{i_z} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{350}{12.74} \sqrt{\frac{235}{2 \times 10^5}} = 0.94 ; \bar{\lambda}_y = \frac{\bar{\lambda}_z}{7.49} \times 12.74 = 1.59$$

$$\bar{\lambda}_z = 0.94 \rightarrow \phi_z = 0.5 \left[1 + 0.34(0.94 - 0.21) + 0.94^2 \right] = 1.07 \rightarrow \chi_z = \frac{1}{1.07 + \sqrt{1.07^2 - 0.94^2}} = 0.63$$

$$\bar{\lambda}_y = 1.59 \rightarrow \phi_y = 0.5 \left[1 + 0.49(1.59 - 0.2) + 1.59^2 \right] = 2.10 \rightarrow \chi_y = \frac{1}{2.10 + \sqrt{2.10^2 - 1.59^2}} = 0.29$$

soit $\chi_{\min} = \min(\chi_y; \chi_z) = \min(0.63; 0.29) = 0.29$.

$$\psi = \frac{176.88}{187.04} = 0.95 \rightarrow \beta_{M\psi} = 1.8 - 0.7 \times 0.95 = 1.135 ; \mu_z = (1.2 \times 1.135 - 3) \times 0.94 + 0.71 \times 1.135 - 0.29 = -1.02 \leq 0.8 ; \kappa_z = 1 - \frac{-1.02 \times 155.78}{0.63 \times 2643.75} = 1.095 < 3 \text{ soit } \frac{155.78}{0.29 \times 2643.75} + \frac{1.095 \times 187.04}{325} = 0.83 < 1$$

ANNEXE C

FICHIERS TYPES DE DONNEES ET DE SORTIE

D-1 Fichier de données : exemple1.inp

```
COMT
ANALYSE D'UN CADRE EN ACIER DE SECTION EN I SOUS CHARGES MECANIQUES
ET THERMIQUES, Feu normalisé, hydrocarbonné ou naturel:ELEMENTS 3,4,5,1,9,
cadre_kahlouche_dense concrete_2.inp; perlite sprayed coating; scénario: feu naturel; (pieds
encastrés; combinaison de charges: D+0.5L); acier: S235; program: version du 01-04-2015
```

DATA

COOR 22

```
1 0.00000D+03 0.00000D+00
2 0.00000D+03 4.60000D+03
3 0.00000D+03 8.10000D+03
4 2.83333D+03 4.60000D+03
5 2.83333D+03 8.10000D+03
6 5.66666D+03 4.60000D+03
7 5.66666D+03 8.10000D+03
8 8.50000D+03 0.00000D+03
9 8.50000D+03 4.60000D+03
10 8.50000D+03 8.10000D+03
11 9.87500D+03 4.60000D+03
12 10.33333D+03 8.10000D+03
13 11.25000D+03 4.60000D+03
14 12.62500D+03 4.60000D+03
15 12.16666D+03 8.10000D+03
16 14.00000D+03 0.00000D+03
17 14.00000D+03 4.60000D+03
18 14.00000D+03 8.10000D+03
19 16.50000D+03 4.60000D+03
20 19.00000D+03 4.60000D+03
21 21.50000D+03 0.00000D+03
22 21.50000D+03 4.60000D+03
```

CMAT

```
200.D0 235.D0 2.0D5
```

PREL 4

```
1 3 1.580D0 1.16D-2
-0.2500D+03 -0.20900D+03 0.20000D+03 2.00000D+01
-0.20900D+03 0.20900D+03 0.01020D+03 2.00000D+01
0.20900D+03 0.25000D+03 0.20000D+03 2.00000D+01
2 3 1.214D0 7.27D-3
-0.18000D+03 -0.16730D+03 0.17000D+03 2.00000D+01
-0.16730D+03 0.16730D+03 0.00800D+03 2.00000D+01
0.16730D+03 0.18000D+03 0.17000D+03 2.00000D+01
3 3 1.757D0 1.780D-2
-0.22000D+03 -0.19900D+03 0.30000D+03 2.00000D+01
-0.19900D+03 0.19900D+03 0.00450D+03 2.00000D+01
0.19900D+03 0.22000D+03 0.30030D+03 2.00000D+01
4 3 1.483D0 1.130D-2
-0.15000D+03 -0.13600D+03 0.30000D+03 2.00000D+01
-0.13600D+03 0.13600D+03 0.00850D+03 2.00000D+01
0.13600D+03 0.15000D+03 0.30000D+03 2.00000D+01
```

```

ELEM
23
1 1 2 3
2 2 3 4
3 2 4 1
4 4 6 1
5 6 9 1
6 3 5 2
7 5 7 2
8 7 10 2
9 8 9 3
10 9 10 4
11 9 11 1
12 11 13 1
13 13 14 1
14 14 17 1
15 10 12 2
16 12 15 2
17 15 18 2
18 16 17 3
19 17 18 4
20 17 19 1
21 19 20 1
22 20 22 1
23 21 22 3
SOLC 1 2
54 1
1 0.00000D+00
2 -2.64600D+04
3 -1.24800D+07
4 0.00000D+00
5 -2.64600D+04
6 -1.24800D+07
7 0.00000D+00
8 -9.14700D+04
9 0.00000D+00
10 0.00000D+00
11 -5.29200D+04
12 0.00000D+00
13 0.00000D+00
14 -9.14700D+04
15 0.00000D+00
16 0.00000D+00
17 -5.29200D+04
18 0.00000D+00
19 0.00000D+00
20 -3.93600D+04
21 -0.95100D+07
22 0.00000D+00
23 -4.35700D+04
24 0.72600D+07
25 0.00000D+00
26 -2.58000D+04
27 0.00000D+00
28 0.00000D+00
29 -3.42200D+04
30 0.00000D+00

```

```

31 0.00000D+00
32 -7.84000D+04
33 0.00000D+00
34 0.00000D+00
35 -2.58000D+04
36 0.00000D+00
37 0.00000D+00
38 -3.42200D+04
39 0.00000D+00
40 0.00000D+00
41 -3.62800D+04
42 -0.67700D+07
43 0.00000D+00
44 -1.71100D+04
45 0.52300D+07
46 0.00000D+00
47 -8.53100D+04
48 0.00000D+00
49 0.00000D+00
50 -8.53100D+04
51 0.00000D+00
52 0.00000D+00
53 -2.33800D+04
54 9.74000D+06
9900 2 5 3 1
1
3
4
5
9
0.12d0,20.d0,1200.d0,350.d0
0.417d0,400.d0,25.5d0,156.8d0,1.d0,2
.85d0,1900.d0
COND 4
1 1 1
1
1 1 1
8
1 1 1
16
1 1 1
21
LINM
5 0 1
STOP
END

```

D-2 Fichier de sortie : exemple1.out

COMT

=====DEBUT:COMMENTAIRES/DESCRIPTION=====

ANALYSE D'UN CADRE EN ACIER DE SECTION EN I SOUS CHARGES MECANIQUES ET THERMIQUE, Feu normalisé, hydrocarbonné et naturel, Eléments : 3,4,5,1,9, cadre_kahlouche_dense concrete_2, perlite sprayed coating; scénario: feu naturel; (pieds encastrés; combinaison de charge (D+0.5L), Program: version du 01-04-2015

=====FIN:COMMENTAIRES/DESCRIPTION=====

DATA

-----BLOC:LECTURE DES DONNEES-----

COORDONNEES DES 22 NOEUDS:

Noeud	Coord.X	Coord.Y
1	.00000D+00	.00000D+00
2	.00000D+00	.46000D+04
3	.00000D+00	.81000D+04
4	.28333D+04	.46000D+04
5	.28333D+04	.81000D+04
6	.56667D+04	.46000D+04
7	.56667D+04	.81000D+04
8	.85000D+04	.00000D+00
9	.85000D+04	.46000D+04
10	.85000D+04	.81000D+04
11	.98750D+04	.46000D+04
12	.10333D+05	.81000D+04
13	.11250D+05	.46000D+04
14	.12625D+05	.46000D+04
15	.12167D+05	.81000D+04
16	.14000D+05	.00000D+00
17	.14000D+05	.46000D+04
18	.14000D+05	.81000D+04
19	.16500D+05	.46000D+04
20	.19000D+05	.46000D+04
21	.21500D+05	.00000D+00
22	.21500D+05	.46000D+04

CARACTERISTIQUES MECANIQUES DU MATERIAU : VALEUR DE FPT20..... .20000D+03,
VALEUR DE FYT20..... .23500D+03, VALEUR DE EAT20..... .20000D+06

PROPRIETES ELEMENTAIRES

NOMBRE DE GROUPE DE PROPRIETES.....NGPRE= 4

GROUPE N°.....IGPE= 1

NOMBRE DE SUBDIVISION DE LA SECTION.....NRS= 3

VALEUR DE AmAm= .15800D+01

VALEUR DE VV= .11600D-01

SUBDIVISION N° 1:

DISTANCE DU C.G A LA FIBRE INFERIEURE....HS1= -.25000D+03

DISTANCE DU C.G A LA FIBRE SUPERIEURE.....HS2= -.20900D+03

LARGEUR DE LA SECTIONBS= .20000D+03

NOMBRE DE POINTS DE SIMPSON.....NPS= .20000D+02

SUBDIVISION N° 2:
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE INFERIEURE....HS1= -.20900D+03
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE SUPERIEURE....HS2= .20900D+03
LARGEUR DE LA SECTIONBS= .10200D+02
NOMBRE DE POINTS DE SIMPSON.....NPS= .20000D+02

SUBDIVISION N° 3:
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE INFERIEURE....HS1= .20900D+03
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE SUPERIEURE....HS2= .25000D+03
LARGEUR DE LA SECTIONBS= .20000D+03
NOMBRE DE POINTS DE SIMPSON.....NPS= .20000D+02

GROUPE Nø.....IGPE= 2
NOMBRE DE SUBDIVISION DE LA SECTION.....NRS= 3
VALEUR DE AmAm= .12140D+01
VALEUR DE VV= .72700D-02

SUBDIVISION N° 1:
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE INFERIEURE....HS1= -.18000D+03
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE SUPERIEURE....HS2= -.16730D+03
LARGEUR DE LA SECTIONBS= .17000D+03
NOMBRE DE POINTS DE SIMPSON.....NPS= .20000D+02

SUBDIVISION N° 2:
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE INFERIEURE....HS1= -.16730D+03
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE SUPERIEURE....HS2= .16730D+03
LARGEUR DE LA SECTIONBS= .80000D+01
NOMBRE DE POINTS DE SIMPSON.....NPS= .20000D+02

SUBDIVISION N° 3:
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE INFERIEURE....HS1= .16730D+03
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE SUPERIEURE....HS2= .18000D+03
LARGEUR DE LA SECTIONBS= .17000D+03
NOMBRE DE POINTS DE SIMPSON.....NPS= .20000D+02

GROUPE Nø.....IGPE= 3
NOMBRE DE SUBDIVISION DE LA SECTION.....NRS= 3
VALEUR DE AmAm= .17570D+01
VALEUR DE VV= .17800D-01

SUBDIVISION N° 1:
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE INFERIEURE....HS1= -.22000D+03
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE SUPERIEURE....HS2= -.19900D+03
LARGEUR DE LA SECTIONBS= .30000D+03
NOMBRE DE POINTS DE SIMPSON.....NPS= .20000D+02

SUBDIVISION N° 2:
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE INFERIEURE....HS1= -.19900D+03
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE SUPERIEURE....HS2= .19900D+03
LARGEUR DE LA SECTIONBS= .45000D+01
NOMBRE DE POINTS DE SIMPSON.....NPS= .20000D+02

SUBDIVISION N° 3:
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE INFERIEURE....HS1= .19900D+03
DISTANCE DU C.G A LA FIBRE SUPERIEURE....HS2= .22000D+03
LARGEUR DE LA SECTIONBS= .30030D+03
NOMBRE DE POINTS DE SIMPSON.....NPS= .20000D+02

GROUPE Nø.....IGPE= 4
 NOMBRE DE SUBDIVISION DE LA SECTION.....NRS= 3
 VALEUR DE AmAm= .14830D+01
 VALEUR DE VV= .11300D-01

SUBDIVISION N° 1:

DISTANCE DU C.G A LA FIBRE INFERIEURE....HS1= -.15000D+03
 DISTANCE DU C.G A LA FIBRE SUPERIEURE.....HS2= -.13600D+03
 LARGEUR DE LA SECTIONBS= .30000D+03
 NOMBRE DE POINTS DE SIMPSON.....NPS= .20000D+02

SUBDIVISION N° 2:

DISTANCE DU C.G A LA FIBRE INFERIEURE....HS1= -.13600D+03
 DISTANCE DU C.G A LA FIBRE SUPERIEURE.....HS2= .13600D+03
 LARGEUR DE LA SECTIONBS= .85000D+01
 NOMBRE DE POINTS DE SIMPSON.....NPS= .20000D+02

SUBDIVISION N° 3:

DISTANCE DU C.G A LA FIBRE INFERIEURE....HS1= .13600D+03
 DISTANCE DU C.G A LA FIBRE SUPERIEURE.....HS2= .15000D+03
 LARGEUR DE LA SECTIONBS= .30000D+03
 NOMBRE DE POINTS DE SIMPSON.....NPS= .20000D+02

CONNECTIVITES DES MEMBRURES

NOMBRE TOTAL D'ELEMENTS.....NELT= 23

N° EL. CONNECTIVITE N° DU GROUPE

1	1	2	3
2	2	3	4
3	2	4	1
4	4	6	1
5	6	9	1
6	3	5	2
7	5	7	2
8	7	10	2
9	8	9	3
10	9	10	4
11	9	11	1
12	11	13	1
13	13	14	1
14	14	17	1
15	10	12	2
16	12	15	2
17	15	18	2
18	16	17	3
19	17	18	4
20	17	19	1
21	19	20	1
22	20	22	1
23	21	22	3

CHARGEMENT MECANIQUE.....NATURE(1)= 1

EXPANSION THERMIQUENATURE(2)= 2

NOMBRE DE CHARGES APPLIQUEES SUR LA STRUCTURE NL= 54

NOMBRE D'INCREMENT DU 1ER CHARGEMENT NI1= 1

Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 1
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 2
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.26460D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 3
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.12480D+08
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 40
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 5
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.26460D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 6
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.12480D+08
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 7
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 8
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.91470D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 9
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 10
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 11
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.52920D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 12
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 13
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 14
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.91470D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 15
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 16
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 17
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.52920D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 18
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 19
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 20
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.39360D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 21
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.95100D+07
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 22
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 23
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.43570D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 24
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .72600D+07
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 25
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 26
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.25800D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 27
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 28
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 29

VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.34220D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 30
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 31
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 32
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.78400D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 33
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 34
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 35
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.25800D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 36
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 37
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 38
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.34220D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 39
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 40
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 41
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.36280D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 42
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.67700D+07
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 43
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 44
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.17110D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 45
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .52300D+07
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 46
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 47
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.85310D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 48
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 49
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 50
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.85310D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 51
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 52
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .00000D+00
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 53
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= -.23380D+05
 Nø DE L'EQUATION DU DDL CORRESPONDANT KDL= 54
 VALEUR DE L'INCREMENT DE CHARGE DLOADS= .97400D+07

NOMBRE D'INCREMENTS DE TEMPS.....INTE= 9900
 INCREMENT DE TEMPS.....DTEMP= .20000D+01
 NBRE D'ELEMENTS SUBISSANT LE CHANG.TEMP.....NT= 5
 Type de scénario de feuKFIRE= 3
 (KFIRE=1: ISO834;KFIRE=2: HYDROCARBON; KFIRE=3: PARAMETRIQUE)

PROTECTION CONTRE LE FEU.....JPROTEC= 1
(JPROTEC=0: paroi non protégée;JPROTEC=1: paroi protégée)

LES ELEMENTS SONT:

- 1
- 3
- 4
- 5
- 9

Caractéristiques du matériau de protection employée contre le feu
Conductivité thermique de la protection (W/m.°K).....LANDAP = .12000
épaisseur initiale de la protection (mm).... DP0= 20.00000
Chaleur spécifique de la protection (J/kg.K).... CCP=1200.00000
Masse volumique de la protection (kg/m3).... RHOP= 350.00000

*****Paramètres de calcul au feu naturel*****

temps limite du scénario du feu..... timelim (heure)= .41700
*** tlim= 5/12 h = 25mn (slow fire growth)
*** tlim= 1/3 h = 20mn (medium fire growth)
*** tlim= 1/4 h = 15mn (fast fire growth)
charge calorifique (MJ/m2 du placher)..... qfd = 400.00000
Surface du plancher (m2)..... af = 25.50000
Surface totale des faces du compartiment (m2)...: at= 156.80000
hauteur équivalente des ouvertures (m).....heq= 1.00000
Surface des ouvertures (m2).....av= 2.85000
Coefficient de transmission calorifique (Ws0.5/m2K)....., b=.19000D+04

NOMBRE DE NOEUDS TOUCHES PAR UNE CONDITION AUX LIMITES: 4

LA MATRICE NF EST:

Noeud N° DDDL selon X N° DDDL selon Y N° DDDL selon Z

1	0	0	0
2	1	2	3
3	4	5	6
4	7	8	9
5	10	11	12
6	13	14	15
7	16	17	18
8	0	0	0
9	19	20	21
10	22	23	24
11	25	26	27
12	28	29	30
13	31	32	33
14	34	35	36
15	37	38	39
16	0	0	0
17	40	41	42
18	43	44	45
19	46	47	48
20	49	50	51
21	0	0	0
22	52	53	54

NOMBRE DE DDL IMPOSES NULSNCLT= 12
NOMBRE DE DDL ACTIFS.....N= 54

NOMBRE DE POINTS DE GAUSS.....GP= 5
INDICE D'IMPRESSION (1 --> OUI; 0 --> NON).....M1= 0
INDICE DE MARGUERRE (1 --> OUI; 0 --> NON).....M2= 1

Longueur et orientation initiales des elements:

N0 de l'element...IEL: 1 longueur initiale...LE= .46000D+04 position initiale....ALPHAO= .15708D+01
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 2 longueur initiale...LE= .35000D+04 position initiale....ALPHAO= .15708D+01
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 3 longueur initiale...LE= .28333D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 4 longueur initiale...LE= .28333D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 5 longueur initiale...LE= .28333D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 6 longueur initiale...LE= .28333D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 7 longueur initiale...LE= .28333D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 8 longueur initiale...LE= .28333D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 9 longueur initiale...LE= .46000D+04 position initiale....ALPHAO= .15708D+01
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 10 longueur initiale...LE= .35000D+04 position initiale....ALPHAO= .15708D+01
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 11 longueur initiale...LE= .13750D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 12 longueur initiale...LE= .13750D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 13 longueur initiale...LE= .13750D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 14 longueur initiale...LE= .13750D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 15 longueur initiale...LE= .18333D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 16 longueur initiale...LE= .18333D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 17 longueur initiale...LE= .18333D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 18 longueur initiale...LE= .46000D+04 position initiale....ALPHAO= .15708D+01
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 19 longueur initiale...LE= .35000D+04 position initiale....ALPHAO= .15708D+01
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 20 longueur initiale...LE= .25000D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 21 longueur initiale...LE= .25000D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 22 longueur initiale...LE= .25000D+04 position initiale....ALPHAO= .00000D+00
Longueur et orientation initiales des elements:
N0 de l'element...IEL: 23 longueur initiale...LE= .46000D+04 position initiale....ALPHAO= .15708D+01

----- FIN DES DONNEES DU PROBLEME-----

CDMAX: 12
ANALYSE SOUS CHARGES MECANIQUES
NOMBRE D'INCREMENTS NI= 1

flag: 1 temps (en secondes): .00 inc: 1
inc 1xnorm 1.0000000000000000epsdl 1.0000000000000000E-007
flag: 1 temps (en secondes): .00 inc: 2
inc 2xnorm 4.535977320939256E-003epsdl 1.0000000000000000E-007
flag: 1 temps (en secondes): .00 inc: 3
inc 3xnorm 3.065174870026076E-005epsdl 1.0000000000000000E-007
flag: 1 temps (en secondes): .00 inc: 4
inc 4xnorm 2.220746943966955E-006epsdl 1.0000000000000000E-007
flag: 1 temps (en secondes): .00 inc: 5
inc 5xnorm 4.487485288362761E-009epsdl 1.0000000000000000E-007

NATURE= 1 INCR= 1 ITERATION= 5 TEMPS= .00000D+00 secondes

Déplacements aux noeuds

=====

selon:X [mm] selon:Y [mm] selon:Z [radians]

1	.00000D+00	.00000D+00	.00000D+00
2	-.13194D-01	-.29908D+00	-.78062D-03
3	.13530D+01	-.42352D+00	-.22163D-02
4	-.47864D-02	-.34057D+01	-.79940D-03
5	.12543D+01	-.10191D+02	-.25572D-02
6	.49482D-02	-.32236D+01	.88167D-03
7	.11687D+01	-.93677D+01	.29726D-02
8	.00000D+00	.00000D+00	.00000D+00
9	.13740D-01	-.53923D+00	.30777D-03
10	.10730D+01	-.76970D+00	.64534D-03
11	.12595D-01	-.43203D+00	-.50947D-04
12	.10569D+01	-.14961D+01	-.70665D-03
13	.11462D-01	-.46205D+00	.64394D-04
14	.10320D-01	-.28087D+00	.12317D-03
15	.10410D+01	-.18117D+01	.47602D-03
16	.00000D+00	.00000D+00	.00000D+00
17	.91654D-02	-.39246D+00	-.40524D-03
18	.10247D+01	-.46633D+00	.48772D-03
19	-.89879D-02	-.24760D+01	-.73539D-03
20	-.26498D-01	-.26354D+01	.65523D-03
21	.00000D+00	.00000D+00	.00000D+00
22	-.44999D-01	-.16031D+00	.89331D-03

INC,NITER 5 ITERATIONS EFFECTUEES SUR 50

FLAG 2INA 2
ANALYSE SOUS EXPANSION THERMIQUE
NOMBRE D'INCREMENTS NI= 9900

flag: 2 temps (en secondes): 2.00 inc: 1

inc 1xnorm 1.059229114241217E-009epsdl 1.0000000000000000E-007
***NINCR 2TEMPS 2.0000000000000000

NATURE= 2 INCR= 1 ITERATION= 1 TEMPS= .20000D+01 secondes

Déplacements aux noeuds

=====

selon:X [mm] selon:Y [mm] selon:Z [radians]

1	.00000D+00	.00000D+00	.00000D+00
---	------------	------------	------------

```

1 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
2 -.13194D-01 -.29908D+00 -.78062D-03
3 .13530D+01 -.42352D+00 -.22163D-02
4 -.47864D-02 -.34057D+01 -.79940D-03
5 .12543D+01 -.10191D+02 -.25572D-02
6 .49482D-02 -.32236D+01 .88167D-03
7 .11687D+01 -.93677D+01 .29726D-02
8 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
9 .13740D-01 -.53923D+00 .30777D-03
10 .10730D+01 -.76970D+00 .64534D-03
11 .12595D-01 -.43203D+00 -.50947D-04
12 .10569D+01 -.14961D+01 -.70665D-03
13 .11462D-01 -.46205D+00 .64394D-04
14 .10320D-01 -.28087D+00 .12317D-03
15 .10410D+01 -.18117D+01 .47602D-03
16 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
17 .91654D-02 -.39246D+00 -.40524D-03
18 .10247D+01 -.46633D+00 .48772D-03
19 -.89879D-02 -.24760D+01 -.73539D-03
20 -.26498D-01 -.26354D+01 .65523D-03
21 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
22 -.44999D-01 -.16031D+00 .89331D-03

```

INC,NITER 1 ITERATIONS EFFECTUEES SUR 50

NATURE= 2 INCR=450 ITERATION= 1 TEMPS= .90000D+03 s (15 min)

Déplacements aux noeuds

=====
selon:X [mm] selon:Y [mm] selon:Z [radians]

```

1 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
2 -.13194D-01 -.29908D+00 -.78062D-03
3 .13530D+01 -.42352D+00 -.22163D-02
4 -.47862D-02 -.34057D+01 -.79940D-03
5 .12543D+01 -.10191D+02 -.25572D-02
6 .49484D-02 -.32236D+01 .88167D-03
7 .11687D+01 -.93677D+01 .29726D-02
8 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
9 .13740D-01 -.53923D+00 .30777D-03
10 .10730D+01 -.76970D+00 .64534D-03
11 .12595D-01 -.43203D+00 -.50947D-04
12 .10569D+01 -.14961D+01 -.70665D-03
13 .11462D-01 -.46205D+00 .64394D-04
14 .10320D-01 -.28087D+00 .12317D-03
15 .10410D+01 -.18117D+01 .47602D-03
16 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
17 .91656D-02 -.39246D+00 -.40524D-03
18 .10247D+01 -.46633D+00 .48772D-03
19 -.89878D-02 -.24760D+01 -.73539D-03
20 -.26498D-01 -.26354D+01 .65523D-03
21 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
22 -.44998D-01 -.16031D+00 .89331D-03

```

INC,NITER 1 ITERATIONS EFFECTUEES SUR 50

NATURE= 2 INCR=900 ITERATION= 4 TEMPS= .18000D+04 s (30 min)

Déplacements aux noeuds

```
=====
selon:X [mm] selon:Y [mm] selon:Z [radians]
-----
 1 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
 2 -.39043D+00 -.28533D+00 -.73974D-03
 3 .13148D+01 -.40960D+00 -.23453D-02
 4 -.21514D+00 -.33334D+01 -.79550D-03
 5 .12194D+01 -.10367D+02 -.25718D-02
 6 -.38578D-01 -.31694D+01 .86826D-03
 7 .11376D+01 -.94904D+01 .30152D-02
 8 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
 9 .13707D+00 -.52499D+00 .29590D-03
10 .10454D+01 -.75657D+00 .68937D-03
11 .13473D+00 -.42855D+00 -.55280D-04
12 .10305D+01 -.14630D+01 -.72000D-03
13 .13240D+00 -.46128D+00 .64223D-04
14 .13006D+00 -.27941D+00 .12378D-03
15 .10158D+01 -.18150D+01 .45857D-03
16 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
17 .12771D+00 -.39156D+00 -.40723D-03
18 .10007D+01 -.46458D+00 .51956D-03
19 .10894D+00 -.24672D+01 -.72940D-03
20 .90797D-01 -.26158D+01 .65563D-03
21 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
22 .71687D-01 -.16096D+00 .87449D-03
```

INC,NITER 4 ITERATIONS EFFECTUEES SUR 50

NATURE= 2 INCR=*** ITERATION= 4 TEMPS= .36000D+04 s (60 min)

Déplacements aux noeuds

```
=====
selon:X [mm] selon:Y [mm] selon:Z [radians]
-----
 1 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
 2 -.80365D+01 .41308D+01 .77507D-04
 3 .21845D+01 .39990D+01 -.54375D-02
 4 -.42580D+01 .24545D+01 -.60337D-03
 5 .21655D+01 -.10209D+02 -.27663D-02
 6 -.47918D+00 .24980D+01 .60901D-03
 7 .21764D+01 -.77871D+01 .40236D-02
 8 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
 9 .32994D+01 .38362D+01 -.37132D-03
10 .21701D+01 .35710D+01 .12619D-02
11 .32692D+01 .28595D+01 -.92058D-03
12 .21860D+01 .21705D+01 -.17977D-02
13 .32387D+01 .15984D+01 -.82891D-03
14 .32085D+01 .63062D+00 -.62696D-03
15 .22011D+01 -.51581D+00 -.75844D-03
16 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
17 .31782D+01 -.31844D+00 -.84548D-03
18 .22181D+01 -.36887D+00 .67609D-03
19 .31412D+01 -.26891D+01 -.61633D-03
```

NATURE= 2 INCR=*** ITERATION= 4 TEMPS= .54000D+04 s (90 min)

Déplacements aux noeuds

=====
selon:X [mm] selon:Y [mm] selon:Z [radians]

1 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
2 -.15334D+02 .90202D+01 .70764D-03
3 .31911D+01 .88568D+01 -.83726D-02
4 -.81544D+01 .83257D+01 -.46933D-03
5 .32368D+01 -.93199D+01 -.29194D-02
6 -.97409D+00 .83472D+01 .45805D-03
7 .33339D+01 -.53843D+01 .49732D-02
8 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
9 .62060D+01 .86350D+01 -.10352D-02
10 .34067D+01 .83355D+01 .17145D-02
11 .61495D+01 .65302D+01 -.18618D-02
12 .34513D+01 .60735D+01 -.29452D-02
13 .60921D+01 .39080D+01 -.18315D-02
14 .60353D+01 .16435D+01 -.14748D-02
15 .34917D+01 .93635D+00 -.20405D-02
16 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
17 .59791D+01 -.24122D+00 -.13228D-02
18 .35383D+01 -.27068D+00 .72617D-03
19 .59248D+01 -.29792D+01 -.52076D-03
20 .58718D+01 -.23086D+01 .92479D-03
21 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
22 .58181D+01 -.21562D+00 .13822D-03

INC,NITER 4 ITERATIONS EFFECTUEES SUR 50

NATURE= 2 INCR=*** ITERATION= 4 TEMPS= .72000D+04 s (120 min)

Déplacements aux noeuds

=====
selon:X [mm] selon:Y [mm] selon:Z [radians]

1 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
2 -.20363D+02 .12467D+02 .96231D-03
3 .37414D+01 .12269D+02 -.10269D-01
4 -.10960D+02 .12202D+02 -.38560D-03
5 .38240D+01 -.84236D+01 -.29940D-02
6 -.15572D+01 .12319D+02 .42298D-03
7 .39751D+01 -.34607D+01 .55915D-02
8 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
9 .78455D+01 .12055D+02 -.14604D-02
10 .40970D+01 .11732D+02 .19594D-02
11 .77733D+01 .91800D+01 -.25274D-02
12 .41595D+01 .88133D+01 -.37463D-02
13 .76995D+01 .55785D+01 -.25610D-02
14 .76266D+01 .23680D+01 -.20918D-02
15 .42142D+01 .19810D+01 -.29289D-02
16 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
17 .75551D+01 -.18678D+00 -.16511D-02
18 .42791D+01 -.20285D+00 .70944D-03
19 .74907D+01 -.32091D+01 -.47390D-03
20 .74278D+01 -.22910D+01 .10215D-02
21 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
22 .73645D+01 -.23354D+00 -.41272D-04

INC,NITER 4 ITERATIONS EFFECTUEES SUR 50

NATURE= 2 INCR=*** ITERATION= 3 TEMPS= .10800D+05 s (180 min)

Déplacements aux noeuds

```
=====
selon:X [mm] selon:Y [mm] selon:Z [radians]
-----
 1 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
 2 -.25834D+02 .16497D+02 .88213D-03
 3 .43994D+01 .16252D+02 -.12037D-01
 4 -.14255D+02 .16222D+02 -.30919D-03
 5 .45057D+01 -.66933D+01 -.30150D-02
 6 -.26763D+01 .16636D+02 .50043D-03
 7 .46978D+01 -.68354D+00 .61663D-02
 8 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
 9 .89017D+01 .16035D+02 -.18871D-02
10 .48570D+01 .15692D+02 .20376D-02
11 .88188D+01 .12312D+02 -.32947D-02
12 .49381D+01 .11878D+02 -.46234D-02
13 .87327D+01 .75577D+01 -.34319D-02
14 .86480D+01 .32146D+01 -.28290D-02
15 .50016D+01 .32386D+01 -.38845D-02
16 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
17 .85660D+01 -.12610D+00 -.20178D-02
18 .50806D+01 -.13007D+00 .51277D-03
19 .84941D+01 -.35321D+01 -.46125D-03
20 .84242D+01 -.24030D+01 .11304D-02
21 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
22 .83537D+01 -.24888D+00 -.12012D-03
```

INC,NITER 3 ITERATIONS EFFECTUEES SUR 50

NATURE= 2 INCR=*** ITERATION= 3 TEMPS= .19800D+05 s (R_f)

Déplacements aux noeuds

```
=====
selon:X [mm] selon:Y [mm] selon:Z [radians]
-----
 1 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
 2 -.23205D+02 .17257D+02 .70026D-03
 3 .50616D+01 .17029D+02 -.11399D-01
 4 -.12613D+02 .16837D+02 -.27973D-03
 5 .51610D+01 -.49637D+01 -.29354D-02
 6 -.20222D+01 .17356D+02 .52165D-03
 7 .53388D+01 .78717D+00 .59442D-02
 8 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
 9 .85684D+01 .16719D+02 -.19290D-02
10 .54868D+01 .16381D+02 .17468D-02
11 .84894D+01 .12877D+02 -.34190D-02
12 .55605D+01 .12271D+02 -.47046D-02
13 .84069D+01 .79227D+01 -.35887D-02
14 .83258D+01 .33705D+01 -.29680D-02
15 .56185D+01 .35159D+01 -.39595D-02
16 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
17 .82476D+01 -.12037D+00 -.20889D-02
18 .56922D+01 -.12613D+00 .25841D-03
19 .81769D+01 -.36449D+01 -.48513D-03
20 .81083D+01 -.25171D+01 .11532D-02
21 .00000D+00 .00000D+00 .00000D+00
22 .80391D+01 -.24830D+00 -.51279D-04
```

INC,NITER 3 ITERATIONS EFFECTUEES SUR 50

dernier incrément de
temps avant la rupture
par instabilité

