

République Algérienne Démocratique Populaire
Ministère des études supérieures et des recherches scientifiques
Université Mentouri Constantine
Faculté de la science d'Ingénieur
Département de Génie Civil

N° d'ordre :.....

N° de série :.....



THESE

Pour obtenir le grade de Magister
Option : interaction matériaux, sols, structures

Présenter par :
BOURSAS FARID

Sujet de la thèse

Analyse du comportement des structures sous
influence du feu

Soutenue le :.../.... /2010

DEVANT LE JURY

Président : N. CHIKH Pr Université Mentouri Constantine.

Rapporteur : R. LASSOUED Mc Université Mentouri Constantine.

Examineurs : M. GUENFOUD Pr Université du 8 Mai 1945 Guelma.

N. DJEBBAR Mc Université Mentouri Constantine.

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| RESUME | 1 |
| INTRODUCTION GENERALE | 3 |
| CHAPITRE 1 : Généralité sur le feu | 7 |
| Introduction..... | 8 |
| 1.1 Terminologie feu et incendie | 11 |
| 1.2 Deroulement d'un incendie | 11 |
| 1.2.1 Le triangle du feu | 11 |
| 1.2.2 Le developpement d'un incendie | 12 |
| 1.3 Modelisation d'un incendie | 13 |
| 1.3.1 Feu normalise iso834 | 13 |
| 1.3.2 Feu hydrocarbure | 13 |
| 1.3.3 Feu exterieur | 14 |
| 1.3.4 Feu parametrique | 15 |
| 1.3.5 Feu reel..... | 16 |
| 1.4 Prevention et protection..... | 17 |
| 1.5 Actions..... | 18 |
| 1.5.1 Action mecaniques..... | 20 |
| 1.5.2 Action thermiques..... | 20 |
| 1.6 Comportement des matériaux a temperature elevee | 21 |
| 1.6.1 Béton | 21 |
| 1.6.1.1 Resistance béton ordinaire..... | 21 |
| 1.6.1.2 Déformation du béton..... | 21 |
| 1.6.1.3 Dilatation thermique du béton | 24 |
| 1.6.1.4 Chaleur spécifique du béton | 24 |
| 1.6.1.5 Conductivité thermique du béton..... | 25 |
| 1.6.2 Acier | 26 |
| 1.6.2.1 Résistance de l'acier..... | 26 |
| 1.6.2.2 Déformation de l'acier | 27 |
| 1.6.2.3 Dilatation thermique de l'acier | 27 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 1.6.2.4 | Chaleur spécifique de l'acier | 28 |
| 1.6.2.5 | Conductivité thermique de l'acier | 29 |
| | Conclusion | 29 |
| CHAPITRE 2 : Analyse bibliographique | | 30 |
| CHAPITRE 3 :Analyse des modèles..... | | 38 |
| Introduction : | | 39 |
| 3.1 | Modèles de transfert thermique : | 39 |
| 3.1.1 | Rappel sur le principe de transfert de la chaleur : | 39 |
| ➤ | Equation de la transmission de la chaleur : | 39 |
| ➤ | Flux de chaleur : | 40 |
| ➤ | Transmission de la chaleur par convection : | 40 |
| ➤ | Transmission de la chaleur par rayonnement : | 41 |
| 3.1.2 | Formulation par différences finis : | 41 |
| ➤ | rappel sur la méthode des différences finies avec schéma explicite : | 41 |
| ➤ | Formulation à partir de l'échange de chaleur entre mailles rectangulaires : | 42 |
| ➤ | Formulation classique en différence finies : | 43 |
| 3.2 | Modèles mécaniques en situation d'incendie : | 45 |
| 3.2.1 | Généralité sur le comportement mécanique des structures sous incendie : | 45 |
| 3.2.2 | Comportement des poteaux en béton armé sous feu: | 47 |
| 3.2.2.1 | Méthodes de calcul simplifiées : | 47 |
| ➤ | La méthode A : | 47 |
| ➤ | La méthode B : | 48 |
| 3.2.2.2 | Méthodes de calcul avancées : | 49 |
| 3.2.3 | Comportement des poteaux mixtes avec profil creux rempli de béton: | 49 |
| ➤ | Méthodes de calcul : | 50 |
| ➤ | Domaine d'application des trois méthodes : | 51 |
| ➤ | Méthodes de calcul simplifiées basées sur les valeurs tabulées prédéfinies : | 52 |
| ➤ | Méthodes de calcul simplifiées : | 53 |
| ✓ | Principe de la méthode : | 54 |
| ✓ | Détermination de l'effort normal ultime « poteau soumis à la compression centré » : | 54 |

| | |
|--|----|
| ✓ Détermination de l'effort normal ultime poteau soumis à une charge excentrée : | 56 |
| ➤ Méthodes de calcul avancées : | 57 |
| Conclusion : | 57 |

CHAPITRE 4 : Comportement des poteaux sous feu 59

| | |
|---|----|
| Introduction | 60 |
| 4.1 Comportement des poteaux en béton armé sous influence du feu | 61 |
| 4.1.1 Introduction | 61 |
| 4.1.2 Principe de la méthode | 61 |
| 4.1.3 Outil de calcul « logiciel cim'feu ec2 » | 62 |
| 4.1.4 Domaine de validité du logiciel | 63 |
| 4.1.5 Hypothèse de calcul | 63 |
| 4.1.6 Equations du modèle utilisées dans cim'feuEc2 | 64 |
| 4.1.7 Etude paramétrique sur des poteaux carrés et circulaires | 64 |
| 4.2 Comportement des poteaux creux remplis de béton sous influence du feu | 79 |
| 4.2.1 Introduction | 79 |
| 4.2.2 Description du logiciel potfire | 80 |
| 4.2.3 Analyse paramétrique par potfire | 84 |
| Conclusion | 91 |

CHAPITRE 5 : Modélisation numérique des éléments de structures sous feu 93

| | |
|--|----|
| Introduction | 94 |
| 5.1 Description et performance du logiciel safir | 94 |
| 5.2 Analyse thermique | 95 |
| 5.2.1 Sollicitation thermal | 95 |
| 5.2.2 Approche numerique pour l'analyse thermique | 96 |
| 5.2.3 Validite du modele thermale | 97 |
| 5.2.4 Parametres essentiels dans la simulation numerique | 87 |
| 5.2.5 Formats des fichiers safir thermal | 98 |
| 5.3 Analyse mécanique | 98 |
| 5.3.1 Approche numerique pour l'analyse mecanique | 98 |
| 5.3.2 Hypotheses | 98 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.3.3 | Validite du model mecanique | 99 |
| 5.3.4 | Format des fichiers safir mecanique | 99 |
| 5.4 | Exemple d'étude | 100 |
| 5.4.1 | Analyse des éléments poutres..... | 100 |
| 5.4.2 | Analyse des éléments poteaux | 113 |
| | Conclusion..... | 121 |
| | CONCLUSION GENERALE | 122 |
| | REFERENCE | 125 |
| | ANNEXE | 128 |

Résumé

Après avoir rappelé au **chapitre 1**, certaines généralités sur les notions de résistance au feu et Présenté les principaux caractéristiques de déroulement et de développement d'un incendie ainsi que leur modélisation qui nous permet d'évaluer le comportement des éléments sous feu. Au **chapitre 2** une analyse bibliographique a été faite pour but de présenté les différentes travaux de recherches dans le domaine du comportement au feu cependant les résultats des expérimentations sont illustré dans cette partie. On a donné quelques approches de calcul des structures en situation d'incendie et on a présenté au **chapitre 3**. Les modèles de calcul des poteaux en béton et creux remplis de béton sont tous tirer de l'Eurocode ; et on a détaillé la différence entre les méthodes de calcul avancé ou numérique et les méthodes de calcul simplifiées ainsi que ces limitations et hypothèses. Au **chapitre 4**, deux codes de calcul a été présenté pour le calcul des poteaux en béton armé et mixte, le premiers est cimfeu EC2 qui sert au calcul des éléments de structures en béton armé sous feu, le deuxième est Potfire qui sert a calculé les poteaux à profil creux remplis de béton ;par la suite une étude paramétrique a été réalisé par les deux codes pour déterminer l'influence de certain paramètres sur la résistance au feu et nous avons constaté que la géométrie ,l'enrobage ,la résistance du béton et le taux d'armatures ont une influence positive par contre la longueur de flambement le type de granulats et la teneur en eau provoque des diminutions de la résistance ;autre paramètres tell que la nuance d'aciers la longueur de flambement et l'épaisseur des parois pour les poteaux mixte a pratiquement pas d'influence sur la résistance au feu. A la fin on a présenté une modélisation numérique de ces éléments au **chapitre 5** .une évaluation du comportement des poutres a été réalisé toute en utilisant le programme basé sur la méthode des éléments finis SAFIR. Les résultats de l'analyse paramétrique par ce logiciel ont donné des résultats similaires aux celle obtenus par la méthode simplifie en matière de l'impacte des précédents paramètres étudiés ; et nous avons retiré que l'effet des conditions aux limites pour les poutres a été majeur. On a conclus notre étude par une comparaison entre la méthode de calcul des poteaux creux remplis de béton simplifié et avancée ; ou on a constaté que les méthodes numériques ont plus dans la sécurité plus que les méthodes simplifié.

Mots clés : Modélisation ; comportement au feu ; méthode simplifié ; méthode numérique ; méthode avancée ; Code de calcul ; résistance au feu ; conditions aux limites.

Summary

After a reminder of some general points concerning fire resistance on the **chapter 1**, the main characteristics of progress and development of fire ; as well as their modelling which allows to estimate the behavior of elements under fire conditions. On the **chapter 2** a bibliographical investigation was made for research works determination in the field of the behavior on fire conditions however experiments results are illustrated in this part. We gave some surrounding areas to structure's calculation in fire situation and we presented this in **chapter 3**. The calculation models of concrete and hollows filled with concrete culums are all taken from the Eurocode; and we detailed the difference between advanced methods and simplified methods of calculation as well as these limitations and hypotheses. In **chapter 4**, two calculation models was presented for the calculation of reinforced concrete and mixed culums, , the first ones is cimfeu EC2 who is calculate reinforcement concrete elements under fire conditions, the second is Potfire who serves to calculate hollow sections filled with concrete culums; afterward a parametric study was realized by both softwares to determine some parameters influence on fire resistance and we noticed that the geometry, concrete stengh and reinforcement rate have a positive influence on the other hand the length of buckling the type of aggregates and moisture content provokes decreases of the resistance; other parameters like nuance of structural steels the thickness of walls for mixed culums has practically no influence on the fire resistance. At the end we presented a numerical modelling of these elements in the **chapter 5**. An evaluation of the behavior of beams was realized using the program based on finit elements method SAFIR. The resultats of paramétric analysis by this software gave similar results to the one obtained by simplified method in parameters influence side; we concluded that the effect of boundary conditions for beams was major. We ended our study by a comparison between the simplified calculation method of the hollow sections filled with concrete and advanced method of calculation; than we noticed that the numerical methods are more in the safety than simplified methods.

Keywords : modelling ; the behavior on fire conditions ; simplified methods; numerical methods ; advanced method; calculation models ; fire resistance ; boundary conditions.

ملخص

بعد تذكير بأهم الأساسيات حول مقاومة البناءات في **الفصل الأول** قمنا بإعطاء خصائص نشوب الحريق وكيفية تطوره وحتى طريقة تجسيمه ، والتي تمكنا من تقييم سلوك المنشآت المعرضة للنار. في **الفصل الثاني** قمنا ببحث في المراجع وقمنا بتوضيح مختلف البحوث والتجارب في هذا المجال . كما قمنا بتقديم بعض طرق حساب المنشآت المعرضة للنار. في **الفصل الثالث** قدمنا طريقة حساب أعمدة منجزة لخرسانة مسلحة وأخرى مختلطة والتي كلها مستمدة من "قانون البناء الأوروبي" وقمنا بتقييم الطرق المبسطة والطرق المتقدمة في الحساب بتقديم مسلماتها ومجال استعمالها في **الفصل الرابع** استعملنا برنامجين الأول لحساب فروع المنشآت المصنوعة بالخرسانة المسلحة ، والثاني لحساب الأعمدة المختلطة . قمنا بتغيير بعض العوامل لمعرفة تأثيره على المقاومة تحت النار ، بعض العوامل كالمساحة ومقاومة الخرسانة لهم تأثير ايجابي على مقاومة الأعمدة بعكس بعض العوامل التي تؤثر سلبا أو لا تؤثر تقريبا كمقاومة الحديد ،

في الأخير قمنا بتجسيم ألي للمنشآت . في **الفصل الخامس** قمنا بتقييم عارضات وأعمدة تحت تأثير النار باستعمال «سفير» واكتشفنا التأثير الكبير للشروط في النهاية على الأعمدة قمنا في الأخير بعمل مقارنة بين الطرق المبسطة والطرق المتقدمة في حساب الأعمدة المختلطة، واستنتجنا أن الطرق المتقدمة في أمان أكثر من الطرق المبسطة.

الكلمات المفصلية: تجسيم ; سلوك المنشآت المعرضة للنار ; الطرق المبسطة ; الطرق المتقدمة ;
بتجسيم ألي ; للشروط في النهاية.

Introduction Générale :

Dans notre société moderne, l'incendie reste un risque permanent qui doit être pris en compte lors de la construction ou la réhabilitation de bâtiments. Aussi, depuis de nombreuses années, des règlements de conception des structures soit en béton, acier ou mixte sont proposés aux concepteurs afin de limiter autant que possible ce risque.

La manière la plus efficace de lutter contre les effets d'un incendie est d'éviter son déclenchement ainsi que sa propagation. Malgré toutes les précautions prises, l'expérience montre que les trois stades:

- Prévention
- Détection
- Extinction

Sont parfois dépassés et que les incendies arrivent à se Propager et prene une extension importante. Lorsqu'une structure est soumise à l'incendie, du fait que les propriétés de résistance et de rigidité des matériaux habituels de constructions se détériorent de manière significative avec l'élévation des températures, sa capacité portante diminue au fur et à mesure que sa température augmente. Si la durée et l'intensité de cet incendie sont trop importantes, la capacité portante de la structure peut décroître jusqu'au niveau des charges appliquées ; il peut alors en résulter une ruine complète ou partielle, ce qui peut se produire en un temps relativement court lorsque la montée en température est rapide.

Le comportement constructif d'un bâtiment en béton lors d'un incendie est un phénomène complexe à cause du nombre important de paramètres différents qui entrent en jeu. La façon actuelle classique dont on calcule la résistance au feu des bâtiments est fort incomplète. Toute la procédure de conception est très fortement simplifiée. Seuls la section des éléments et l'enrobage des armatures sont vérifiés à la lumière de certains critères de résistance au feu. La vérification de la stabilité générale sous l'influence d'actions directes ou indirectes dues à l'incendie est totalement absente. Seuls quelques programmes informatiques complexes traitent le comportement global de la structure, mais ils ne sont pas encore à la portée de n'importe quel concepteur.

Lorsqu'un incendie se déclare dans une partie de bâtiment, la température monte très rapidement, du moins s'il y a suffisamment de matériel combustible et d'oxygène. Les parties exposées de la

construction se réchauffent en fonction de la conductivité thermique des matériaux: très rapidement pour l'acier exposé, assez lentement pour le béton. Deux phénomènes viennent s'ajouter au niveau des matériaux: une réduction de la résistance mécanique et des dilatations thermiques.

Selon l'Eurocode 2 - partie 1-2 [1] et la plupart des normes nationales en matière de sécurité au feu, on doit, lors d'une analyse globale d'un bâtiment au feu, tenir compte du mode de ruine le plus probable, des caractéristiques thermiques des matériaux des éléments exposés, et des effets des dilatations thermiques et déformations. La norme ne spécifie cependant pas la façon dont ces effets doivent être pris en compte dans le projet. Par simplification, l'analyse de la sécurité au feu se limite donc à l'analyse des éléments de construction individuels. En pratique ça signifie que les sections de béton et les enrobages d'armatures doivent respecter certaines valeurs minimales pour une exposition à un feu ISO normalisé. Dans le cas d'incendies réels, on constate cependant que la ruine de constructions en béton n'apparaît que rarement suite à une diminution des caractéristiques des matériaux soumis à haute température mais presque toujours à cause de l'incompatibilité du bâtiment à reprendre les dilatations thermiques. Heureusement, les constructions en béton résistent non seulement très bien au feu mais présentent également une grande résistance globale de par leur robustesse et leur possibilité de redistribuer les charges. Les cas de ruine par le feu sont donc extrêmement rares.

Le contenu de notre travail se présente de la manière suivante :

- Dans ce **premier chapitre** nous avons abordé tout d'abord les différentes généralités sur le feu à savoir :
 - Le déroulement de l'incendie base sur le triangle de feu dont les trois principaux acteurs sont : combustible, carburant, source d'inflammation.
 - Développement de l'incendie qui est essentiellement caractérisé par une phase constante, une phase croissante et la généralisation du feu.
 - Modélisation d'un incendie, elle a été spécifiée par l'Eurocode à savoir un feu ISO834, feu paramétré et feu naturel. C'est la sollicitation thermique sur l'élément de structure ou sur la structure globale. Son évolution est une fonction du temps. La façon la plus simple de représenter un incendie est d'utiliser des courbes nominales, soit une relation donnant l'évolution de la température des gaz en fonction du temps. Des courbes ont été établies à partir de l'expérience sur des feux réels et les plus fréquemment.

- Prévention et protection : Le risque d'incendie existera toujours puisqu'il est impossible de ne pas utiliser que des produits incombustibles dans les bâtiments, aussi le respect et la mise en place d'un ensemble de mesures de prévention adéquates et leur prise en compte dans la conception du bâtiment sont essentiels pour limiter et maîtriser le risque incendie. La prévention contre l'incendie est divisée en deux types de protection :
 - ✓ Prévention active
 - ✓ Prévention passive
- L'action mécanique sur les éléments de structures est spécifiée par 'Eurocode 1. Bases du calcul et actions sur les structures Partie 2-2 : Actions sur les structures'.
- Action thermique que nous avons considérée dans notre travail est basée sur la sollicitation préconisée par les règlements Eurocode à savoir la courbe du feu ISO834.
- Comportement des matériaux soit le béton ou l'acier fonction de la température, plusieurs paramètres ont été considérés dans notre analyse selon les modèles spécifiés par l'Eurocode.
 - ✓ Résistance Béton ordinaire
 - ✓ Déformation du béton
 - ✓ Dilatation thermique du béton
 - ✓ Conductivité thermique du béton
 - ✓ Résistance de l'acier
 - ✓ Déformation de l'acier
 - ✓ Dilatation thermique de l'acier
 - ✓ Chaleur spécifique de l'acier
 - ✓ Conductivité thermique de l'acier

L'analyse de ce premier chapitre nous a permis d'identifier l'action thermique sur les éléments de structure et le comportement des matériaux utilisés (béton, acier) fonction de la température. Ces modèles de comportement des matériaux seront utilisés dans nos différentes approches d'évaluation de la résistance au feu des différents éléments de structures à savoir (les poteaux en béton, poteaux mixte et poutre en béton et poutre mixte).

- Dans **le chapitre deux**, l'analyse bibliographique que nous avons réalisée a pour but de synthétiser les différents travaux dans le domaine des sollicitations couplés thermo –

mécanique pour différents types de matériaux et élément de structures. Quelques approches théoriques ont été appréhendé ainsi que les essais disponibles dans la littérature.

- Dans **le troisième chapitre** nous avons considéré les différents modèles de transfert de chaleur et le comportement mécanique des structures sous feu qui s'articule selon trois approches différentes :
- Analyse par éléments séparés la liaison avec les autres éléments sera remplacée par les conditions aux limites appropriées.
 - Analyse de parties de la structure, une partie de la structure sera directement prise en compte. Des conditions aux limites appropriées pour représenter sa liaison avec le reste de la structure seront considérées
 - Analyse de structure globale, dans laquelle la structure totale sera utilisée dans le calcul

Dans notre analyse nous avons opté pour l'analyse des éléments de structures et en utilisant les conditions aux limites nous avons supposé un premier palier d'intégration de l'élément de structure dans la structure elle-même. Des modèles de calcul couplés entre le comportement thermique et le comportement mécanique sont inexistant et ce dans un but simplificateur. Ainsi pour l'analyse du comportement mécanique, la distribution des températures au sein des poteaux est obtenue soit expérimentalement soit à l'aide d'un modèle thermique. Le comportement mécanique est alors déterminé par une procédure itérative prenant en compte l'évolution de la température à chaque pas de temps ainsi que leurs influences sur les propriétés mécaniques.

Dans cette analyse nous avons recense trois types d'approche :

- Méthodes de calcul simplifiées basées sur les valeurs tabulées prédéfinies. Ces valeurs établies pour les sections transversales les plus fréquentes sur la base des essais expérimentaux et forfaitaire pour le dimensionnement ou la vérification des différents éléments mixtes vis-à-vis leur résistance au feu.
- Les méthodes simplifiées basées sur des formulations analytiques ne concernent que les éléments de structures. Pour les profils creux rempli de béton, il s'agit de l'annexe G de l'Eurocode 4, partie 1-2
- Les méthodes de calcul avancées permettent une estimation rigoureuse et précise du comportement globale des structures sous l'influence du feu. Elles font appel à des modèles numériques basés sur la méthode des éléments finis ou la méthode des

différences finies. Les conditions aux limites peuvent être spécifiques pour les éléments de structures, donc ce qui permet une plus grande flexibilité dans les modèles qui peuvent refléter la physique du problème considéré.

L'analyse de cette étape nous a essentiellement définie les procédures de calcul des différents éléments de structures sous influence du feu. Nous utiliserons dans notre approche pour l'évaluation de la résistance au feu des éléments de structures la méthode simplifiée dans un premier temps, dans un deuxième palier une autre méthode basée sur l'Eurocode 2 annexe B en terme de comportement mécanique et un modèle thermique basé sur les différences finies, pour conclure nous utiliserons les méthodes de calcul avancée basée sur les éléments finis.

➤ Pour le **quatrième chapitre** nous avons réalisé pour deux types de structures poteaux en béton et mixte. L'analyse a été concrétisée par le Logiciel CIMFEU pour les poteaux en béton armé, pour les poteaux mixte (creux rempli de béton) l'analyse a été menée par le logiciel POTFIRE. Une analyse paramétrique a été réalisée afin d'identifier les paramètres les plus influents sur le comportement de ces éléments sous l'influence du feu, ces paramètres sont : la géométrie ; le chargement ; le taux d'armature ; l'enrobage et la longueur de flambement ; la résistance caractéristique du béton ; la limite élastique des armatures ainsi que le type de granulat et la teneur en eaux.

Pour la résolution du problème analysée, nous avons utilisé la méthode simplifiée pour les poteaux creux remplis de béton. Une analyse paramétrique a été concrétisée et les paramètres influents sur le comportement ont été identifiés.

Pour l'analyse des poteaux en béton armé, nous nous sommes appuyés les spécifications de l'annexe B.3 de l'Eurocode 2 partie 1-2 qui propose l'évaluation du risque de flambement des poteaux en conditions d'incendie par la méthode fondée sur l'estimation de la courbure. Le champ de température dans la section est déterminé selon la théorie de conductivité de Fourier. La deuxième phase est la détermination du diagramme de moment-courbure pour l'effort normal agissant en situation d'incendie $N_{Ed,fi}$ en utilisant pour les armatures et le béton. Le principe de la sommation des couches est utilisé pour déterminer la courbe $M_{Ed,fi}$ et $1/r$ lors d'une sollicitation axiale ou excentrée en situation d'incendie. La résolution dans le domaine non linéaire est réalisée par la méthode de Newton-Raphson. Ceci permet de déterminer le moment

résistant ultime $M_{Rd,fi}$ avec l'effort normal concomitant $N_{Ed,fi}$ et le moment nominal du second ordre $M_{2,fi}$ pour la courbure correspondant au moment résistant ultime .

La confrontation des sections circulaire et carrée en fonction des paramètres (la géométrie ; le chargement ; le taux d'armature ; l'enrobage et la longueur de flambement ; la résistance caractéristique du béton ; la limite élastique des armatures ainsi que le type de granulat et la teneur en eaux).

➤ Dans **le chapitre cinq** nous avons analysé deux types d'élément de structure à savoir les poteaux en béton armé et mixte (creux rempli de béton) et les poutres en béton armé, profilée en acier et mixte avec deux conditions aux limites (appui simple et appui encastré). La condition que la poutre soit encastrée est dans l'optique de l'intégrer dans une structure.

La résolution est menée par la méthode avancée basée sur les éléments finis. Cette méthode nous a permis de confronter notre résultat obtenu par le Logiciel POTFIRE pour les poteaux creux remplis de béton. Les résultats obtenus nous ont permis d'identifier les limites de ce Logiciel et de le prendre en considération uniquement dans un calcul sommaire d'avant projet.

Une comparaison entre les différentes structures de poteaux en béton et creux remplis de béton sont pratiquement similaire. Par contre l'effet des conditions aux limites dans les poutres intervient d'une manière très significative dans le comportement des structures sous l'influence du feu.

Toute cette résolution a été menée par le Logiciel SAFIR.

Dans notre conclusion nous émettons l'influence des différents paramètres sur le comportement des éléments de structures sous influence du feu. Nous tenons à signaler qu'Analyse de parties de la structure est nécessaire pour avoir un aperçu du comportement structurel. L'analyse globale de la structure donnera un sens très positif au comportement ainsi qu'à l'ajustement des différents règlements en vigueur.

Chapitre 01

Généralité sur le feu

Introduction :

Chaque année des millions de personnes décèdent à cause du feu ; ainsi que des dégâts matériels considérables sont enregistrés.

Les objectifs de la sécurité incendie [1] sont la protection efficace contre les risques d'incendie des personnes et des biens, et plus précisément ils concernent :

- La sauvegarde des vies des occupants de l'immeuble.
- La protection des vies des services d'intervention.
- La protection de l'intégrité du bâtiment.
- La sauvegarde des bâtiments adjacents.

Les exigences de base de la protection incendie consistent à :

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

1.1 Terminologie feu et incendie :

Un feu est une combustion. On le trouve dans des fours, des chaudières sous forme de combustion contrôlée. Dans le domaine de l'incendie il devient une combustion incontrôlée. Il prend alors une dimension telle qu'il peut provoquer un incendie [2].

1.2 Déroulement d'un incendie :**1.2.1 Le triangle du feu :**

Pour qu'un feu (une combustion) prenne naissance, trois conditions doivent être réunies

Simultanément:

- **Présence d'un combustible** : matière inflammable solide: (bois, charbon, papier..).

Liquide:(essence, alcools...) ; gazeux: (butane, propane...).

- **Présence d'un carburant** : corps qui se combinant avec le combustible qui permet la combustion (oxygène, air, peroxyde...)

➤ **source d'inflammation** : source d'énergie nécessaire au démarrage de la combustion (Flamme étincelle décharge électrique...)

Ces trois composantes sont souvent représentées graphiquement sous forme d'un triangle

Appelé triangle du feu [3].



Figure 1.1 : triangle du feu [3]

1.2.2 Le développement d'un incendie :

Un incendie comporte une phase de développement où la température s'élève, puis une phase de décroissance où cette température diminue [6].

Les caractéristiques d'un incendie réel sont montrées sur la figure [1.2] et comportent :

➤ **Une phase couvante**

Feu couvant à très basse température avec une durée souvent difficile à estimer.

Cette phase n'est pas montrée sur la figure [1.2].

➤ **Une phase de croissance appelée « pré-flashover » (feu localisé)**

La durée de cette phase dépend principalement des caractéristiques du compartiment.

Le feu reste localisé jusqu'à une généralisation probable du feu.

➤ **Un « flashover » (feu généralisé)**

C'est un feu généralisé. Cette phase est généralement très courte.

➤ **Une phase de « post flashover »**

Cette phase correspond à un feu généralisé dont la durée dépend de la charge calorifique et de la ventilation.

➤ Une phase décroissante

Le feu commence à diminuer jusqu'à ce que tous les matériaux combustibles aient complètement brûlé.

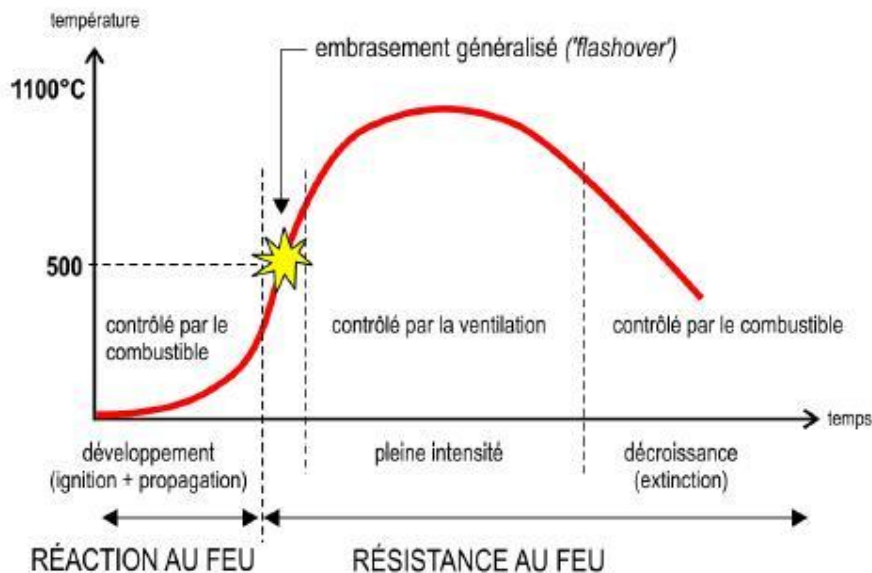


Figure 1.2 : phases de développement d'un incendie [9]

1.3 Modélisation d'un incendie :

La façon la plus simple de représenter un incendie est d'utiliser des courbes nominales, soit une relation donnant l'évolution de la température des gaz en fonction du temps [6].

Des courbes ont été établies à partir de l'expérience sur des feux réels et les plus fréquemment utilisées sont :

1.3.1 Feu normalisé ISO834 :

Le feu conventionnel est caractérisé par une température ambiante qui augmente de façon continue avec le temps mais avec un taux de croissance.

Une courbe logarithmique est utilisée en laboratoire pour modéliser le feu la valeur de durée de résistance au feu n'indique pas la durée réelle pendant laquelle une composante résiste dans un incendie de bâtiment. elle constitue une comparaison indiquant la sévérité d'un incendie au quel la composante peut résister [4].

Tableau 1.1 : valeurs température – temps pour la courbe ISO834 [12]

| temps (min) | température (C°) |
|-------------|------------------|
| 0 | 20 |
| 5 | 576 |
| 10 | 678 |
| 15 | 739 |
| 30 | 842 |
| 60 | 945 |
| 90 | 1006 |
| 120 | 1049 |
| 180 | 1110 |
| 240 | 1153 |
| 300 | 1186 |
| 360 | 1214 |

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

Avec

θ_g = température des gaz dans le compartiment en °C

t = temps en minutes

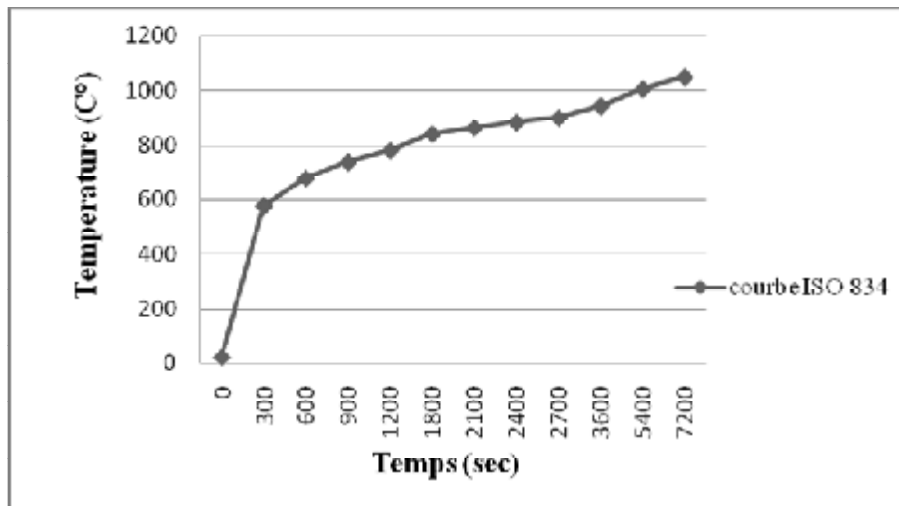


Figure 1.3 : courbe nominale du feu conventionnel ISO834

1.3.2 Feu hydrocarbure :

Développé dans les années 70 par la compagnie pétrolière Mobil présente une montée en température très rapide avec une température de 900 °C dans les 5 premières minutes et un plateau à 1100 °C. Cette recherche avait été initiée pour mettre au point une procédure de test

pour évaluer les matériaux de protection contre le feu pour les plates formes de forage en mer et les complexes pétroliers [9].

La courbe des hydrocarbures température/temps est donnée par :

$$\theta_g = 20 + 1080.(1-0.325.e^{-0.167t}-0.675.e^{-2.5t})$$

Où :

θ_g = température des gaz dans le compartiment en °C

t = temps en minutes

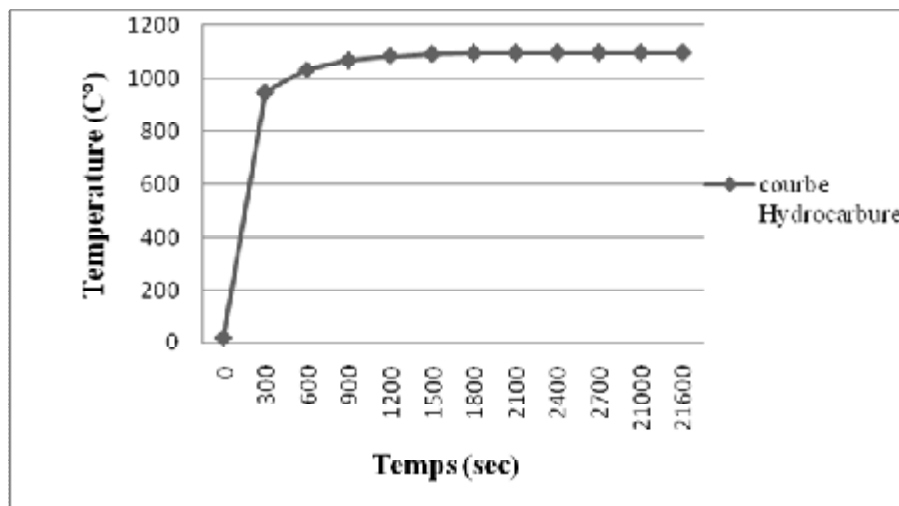


Figure 1.4 : courbe hydrocarbure du feu [12]

1.3.3 Feu extérieur :

Lorsque nous examinons la résistance au feu d'une structure extérieurement, les températures des matériaux du bâtiment seront plus proche des températures d'incendie correspondant, on peut donc utiliser une courbe « d'incendie extérieure ».

La courbe de feu extérieure est une courbe plafonnée à une élévation de la température égale à $20 + 660$ C°, une température nettement inférieure à la courbe standard.

Elle s'applique directement de l'intérieur du compartiment en feu concerné ou d'un compartiment se trouvant au dessous ou à coté du la face sollicitée [4].

$$\theta_g = 20 + 660.(1 - 0.687.e^{-0.32t} - 0.313.e^{-3.8t})$$

Où :

θ_g = température des gaz dans le compartiment en °C

t = temps en minutes

1.3.4 Feu paramétrique :

Les feux paramétriques constituent un moyen simple pour tenir compte d'importants phénomènes physiques pouvant influencer le développement d'un feu dans un bâtiment particulier. Comme les feux nominaux, ils consistent en la détermination d'une courbe température-temps, mais ces courbes tiennent compte de certains paramètres destinés à idéaliser certains aspects de la réalité.

Les feux paramétriques sont basés sur l'hypothèse que la température est uniforme dans le compartiment. Ce qui limite leur champ d'application aux conditions de « flashover » dans des compartiments de dimensions modérées. Ils constituent néanmoins un pas significatif vers la considération de la nature réelle d'un feu particulier par rapport aux feux nominaux [5].

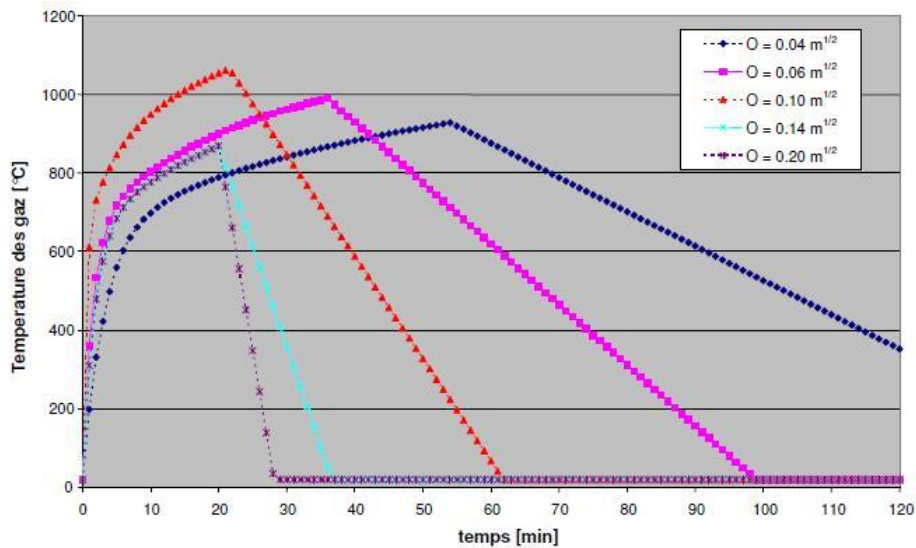


Figure 1.5 : Exemple de feux paramétriques [5]

1.3.5 Feu réel :

Les courbes température-temps naturelles devront être déterminées pour un compartiment spécifique.

Si le projet a été mené avec une approche performancielle, la capacité portante ou la capacité de compartimentage en alternative à la méthode qui fait référence aux classes est vérifiée vis-à-vis de l'action thermique en utilisant la courbe température-temps naturelle, cette courbe température-temps naturelle peut être déterminée comme suit :

- Modèles d'incendies expérimentaux.
- Modèles d'incendies numériques simplifiés.
- Modèles d'incendies numériques avancés.

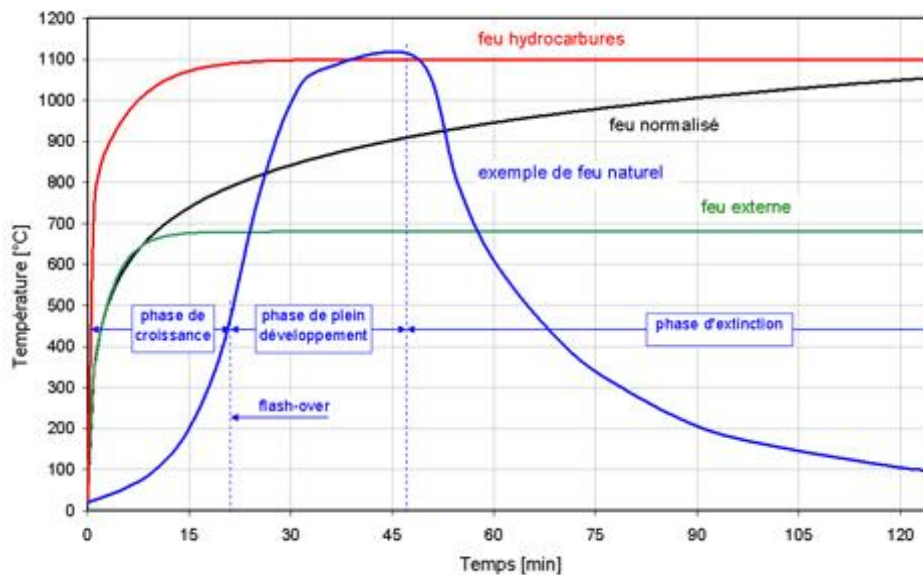


Figure 1.6 : Exemple de feu naturel

1.4 Prévention et protection :

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

La prévention contre l'incendie est divisée en deux types de protection :

➤ Prévention active :

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

Le feu doit être détecté au plus tôt pour être combattu efficacement. L'ensemble des protections actives doit être efficace dans les deux premières phases de développement du sinistre [6].

Nous présentons quelques dispositifs de protection active :

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

➤ Prévention passive :

La protection passive regroupe les moyens mis en œuvre pour limiter les effets destructeurs du feu.

- Résistance au feu des matériaux ou dispositifs coupe-feu et pare flammes, emploi de matériaux avec différentes réactions ou résistances au feu.
- Conception résistante au feu comme spécifiés dans les réglementations.

1.5 Actions :

1.5.1 Action mécaniques :

En situation d'incendie, les charges mécaniques appliquées aux structures peuvent être obtenues en utilisant les formules suivantes [7] :

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,j} + (\psi_{1,1} \text{ ou } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{k,j} Q_{k,i}$$

Où :

$G_{k,j}$ Valeur caractéristique des actions permanentes

$Q_{k,1}$ Action variable principale caractéristique

$Q_{k,i}$ Valeur caractéristique des actions variables d'accompagnement

$\psi_{1,1}$ Facteur pour valeur fréquente d'une action variable

$\psi_{2,1}$ Facteur pour valeurs quasi-permanentes des actions variables

Les valeurs recommandées de $\psi_{1,1}$ et $\psi_{2,1}$ sont données dans le tableau (1.2).

Tableau 1.2 : Valeurs recommandées des facteurs ψ pour les bâtiments [7]

| Action | Ψ_0 | Ψ_1 | Ψ_2 |
|--|----------|----------|----------|
| Charges imposée dans les bâtiments catégories | | | |
| Catégorie A : domestique ; zones résidentielles | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| Catégorie B : zones de bureaux | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| Catégorie C : zones de congrégation | 0,7 | 0,7 | 0,6 |
| Catégorie D : zones de commerces | 0,7 | 0,7 | 0,6 |
| Catégorie E : zones de stockage | 1,0 | 0,7 | 0,8 |
| Catégorie F : zones de trafic routier poids du Véhicule $\leq 3\text{KN}$ | 0,7 | 0,9 | 0,6 |
| Catégorie G : zones de trafic routier $30\text{ KN} < \text{poids du véhicule} \leq 160\text{ KN}$ | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| Catégorie H : toits | 0 | 0 | 0 |
| charge de neige sur les bâtiments | | | |
| Finlande ; Islande, Norvège, Suède | 0,7 | 0,5 | 0,2 |
| Autre Pays membre du comité européen, pour les lieux situés a une altitude $H > 1000\text{ m a.s.l.}$ | 0,7 | 0,5 | 0,2 |
| Autre Pays membre du comité européen, pour les lieux situés a une altitude $H \leq 1000\text{ m a.s.l.}$ | 0,5 | 0,2 | 0 |
| Charges de vent sur les bâtiments | 0,6 | 0,2 | 0 |
| Température (sans incendie) dans les bâtiments | 0,6 | 0,5 | 0 |

Une autre notion largement utilisée dans les méthodes de calcul des Eurocodes est le niveau de chargement pour la situation d'incendie $\eta_{fi,t}$ qui est définie comme

$$\eta_{fi,t} = \frac{Ed_{fi}}{Ed}$$

Avec

Ed : Effet de calcul des actions à température normale

Ed_{fi} : Effet de calcul des actions en situation d'incendie. Elle peut être déterminée d'une manière différente par :

$$\eta_{fi,t} = G_k + \psi_{fi,1} Q_{k;1} / \gamma_G G_k + \gamma_{Q;1} Q_{k;1}$$

où $\gamma_{Q;1}$ est le facteur partiel pour l'action variable principale 1.

En fait, le niveau de charge $\eta_{fi,t}$ dépend fortement du facteur $\psi_{1,1}$ qui varie en fonction des catégories de bâtiments [8].

1.5.2 Action thermiques:

Il y a plusieurs façons de modéliser l'incendie et mettre en évidence les actions thermiques à l'intérieur d'un bâtiment. Dans un ordre croissant de complexité, les modèles utilisés le plus couramment sont :

- les courbes nominales.
- les courbes paramétriques.
- les modèles de zones.
- les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics) [9].

1.6 Comportement des matériaux à température élevée :

1.6.1 Béton :

1.6.1.1 Résistance Béton ordinaire :

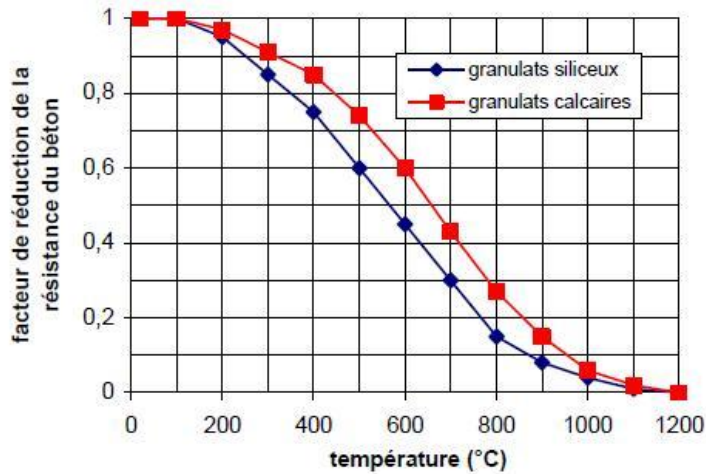


Figure 1.7 : Evolution de la résistance du béton en fonction de la température θ et du type de granulats [10]

Les bétons contenant au moins 80 % en masse de granulats calcaires sont considérés comme des bétons à granulats calcaires [10].

La figure [1.7] montre que le facteur de réduction de la résistance caractéristique du béton siliceux est moins que celui du béton à base du calcaire, que signifie que la résistance du béton siliceux est moins de celle du béton à base du calcaire.

1.6.1.2 Déformation du béton

Les propriétés de résistance et de déformation du béton sous contrainte uniaxiale à températures élevées sont obtenues à partir de la relation contrainte-déformation illustrée à la figure [1.8].

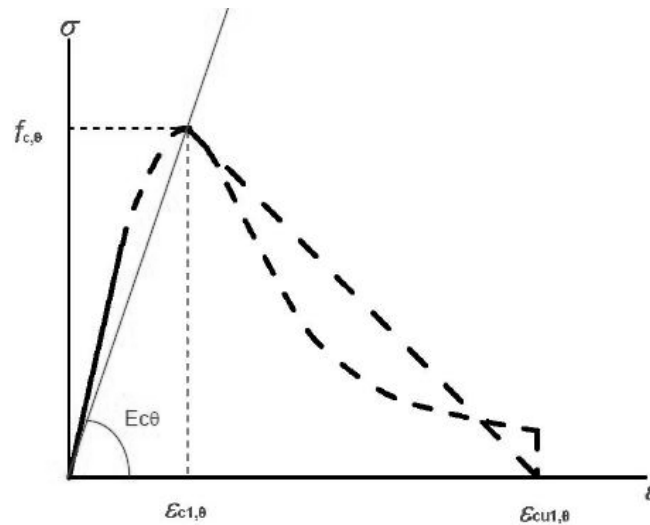


Figure 1.8 : Modèle mathématique de la relation contrainte-déformation du béton en compression aux températures élevées [10]

La relation contrainte-déformation est définie par deux paramètres :

- la résistance à la compression, $f_{c,\theta}$,
- la déformation $\epsilon_{c1,\theta}$ correspondant à $f_{c,\theta}$

Les valeurs de chacun de ces paramètres sont données dans le tableau [1.3] en fonction des températures du béton.

Pour les valeurs de température intermédiaires, une interpolation linéaire peut être utilisée.

Les paramètres spécifiés dans le tableau peuvent être utilisés pour du béton de densité normale réalisé avec des granulats siliceux ou des granulats calcaires (sont considérés comme granulats calcaires ceux contenant au moins 80 % en masse de granulats calcaires).

Tableau 1.3 : Valeurs des paramètres $f_{c,\theta}$, $\varepsilon_{c1,\theta}$ pour béton [10]

| Température du béton | Granulats siliceux | | | Granulats calcaires | | |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | $f_{c,\theta} / f_{ck}$ | $\varepsilon_{c1,\theta}$ | $\varepsilon_{cu1,\theta}$ | $f_{c,\theta} / f_{ck}$ | $\varepsilon_{c1,\theta}$ | $\varepsilon_{cu1,\theta}$ |
| θ | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] |
| [°C] | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 20 | 1,00 | 0,0025 | 0,0200 | 1,00 | 0,0025 | 0,0200 |
| 100 | 1,00 | 0,0040 | 0,0225 | 1,00 | 0,0040 | 0,0225 |
| 200 | 0,95 | 0,0055 | 0,0250 | 0,97 | 0,0055 | 0,0250 |
| 300 | 0,85 | 0,0070 | 0,0275 | 0,91 | 0,0070 | 0,0275 |
| 400 | 0,75 | 0,0100 | 0,0300 | 0,85 | 0,0100 | 0,0300 |
| 500 | 0,60 | 0,0150 | 0,0325 | 0,74 | 0,0150 | 0,0325 |
| 600 | 0,45 | 0,0250 | 0,0350 | 0,60 | 0,0250 | 0,0350 |
| 700 | 0,30 | 0,0250 | 0,0375 | 0,43 | 0,0250 | 0,0375 |
| 800 | 0,15 | 0,0250 | 0,0400 | 0,27 | 0,0250 | 0,0400 |
| 900 | 0,08 | 0,0250 | 0,0425 | 0,15 | 0,0250 | 0,0425 |
| 1 000 | 0,04 | 0,0250 | 0,0450 | 0,06 | 0,0250 | 0,0450 |
| 1 100 | 0,01 | 0,0250 | 0,0475 | 0,02 | 0,0250 | 0,0475 |
| 1 200 | 0,00 | - | - | 0,00 | - | - |

1.6.1.3 Dilatation thermique du béton

La déformation thermique $\varepsilon_{c(t)}$ du béton en fonction de la température est illustrée à la figure [1.9].

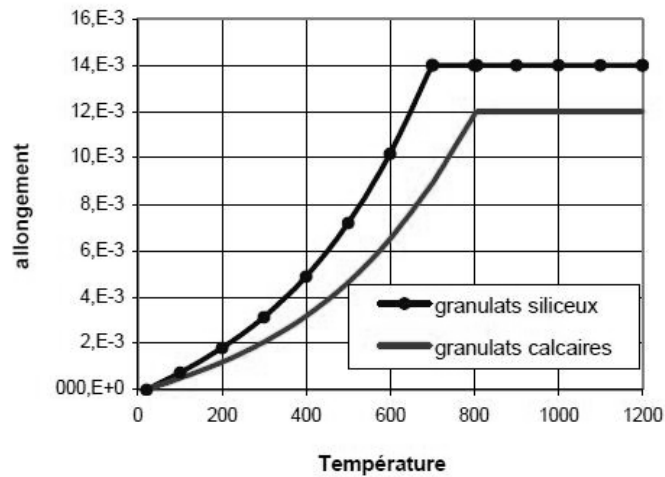


Figure 1.9 : Dilatation du béton en fonction de la température [10]

Selon [10] la dilatation du béton à granulats calcaires augmente lentement avec l'évolution de la température jusqu'à atteindre 800 C° où la dilatation devient constante malgré l'augmentation de température.

De la même façon pour le béton siliceux mais avec plus d'allongement qui atteint les 14.E⁻³ puis devient constant.

1.6.1.4 Chaleur spécifique du béton :

La variation de la chaleur spécifique $c_{p(t)}$ du béton en fonction de la température et de la teneur en eau est illustrée à la figure [1.10].

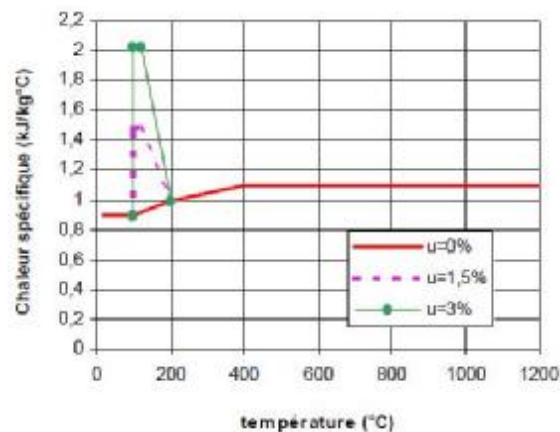


Figure 1.10: Chaleur spécifique du béton, $c_{p(t)}$ en fonction de la température pour 3 teneurs en eau [10]

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

Puis la chaleur spécifique augmente linéairement jusqu'à atteindre le 1.5 kJ/kg C° à 400C° où elle devient constante.

1.6.1.5 Conductivité thermique du béton

La variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique λ_c du béton, en fonction de la température, est illustrée à la figure [1.11].

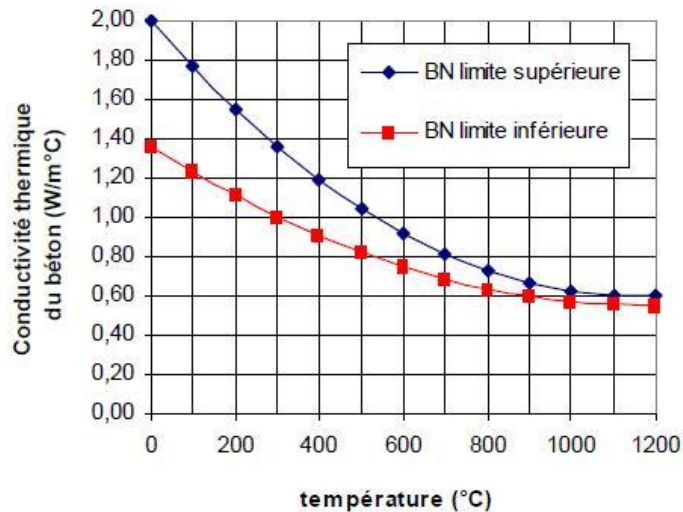


Figure 1.11 : Variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique pour les bétons normaux (BN) en fonction de la température [10]

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

Les courbes de conductivité thermique font apparaître à 20 °C une conductivité thermique des bétons de calcaire inférieure d'environ 20 % à celle des bétons de silice [10].

1.6.2 Acier :

1.6.2.1 Résistance de l'acier :

Le facteur de réduction de la résistance caractéristique de l'acier de béton armé en fonction de la température θ est illustré à la figure [1.12].

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

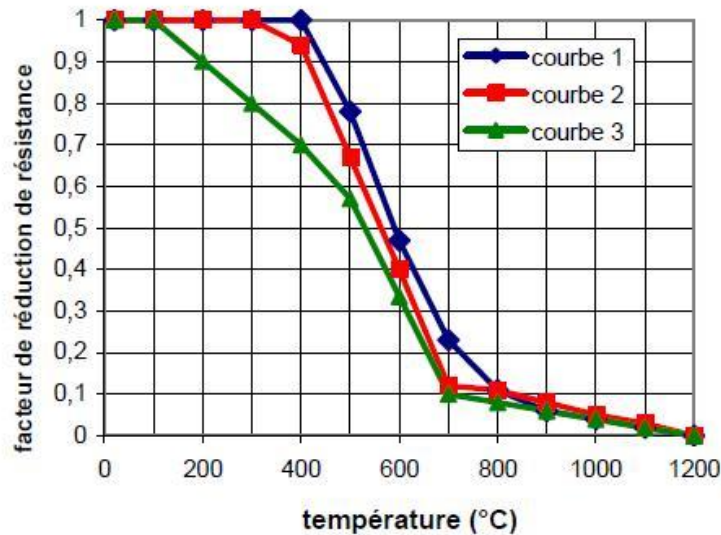


Figure 1.12 : facteur $k_{s(\theta)}$ de réduction de la résistance caractéristique (f_{yk}) des armatures [10]

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

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

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

La différence entre les courbes 1 ; 2 et 3 est liée au fait que les résultats expérimentaux montrent que le palier de plasticité des aciers disparaît à chaud, et que donc le facteur $k_{s(\theta)}$ dépend de l'allongement à la rupture.

Pour la résistance de l'acier de précontrainte La diminution de résistance est beaucoup plus rapide.

1.6.2.2 Déformation de l'acier

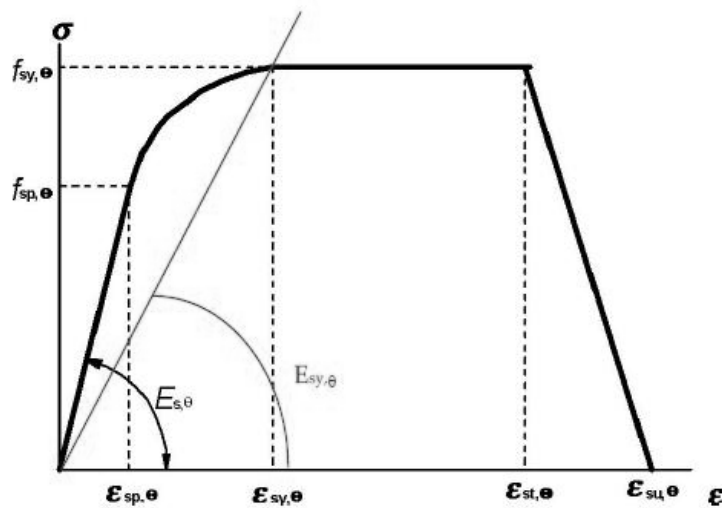


Figure 1.13 : La relation contrainte-déformation [11]

La relation contrainte-déformation régissant le comportement mécanique est définie par les paramètres suivants :

- $f_{y,\theta}$ Limite d'élasticité efficace ;
- $f_{p,\theta}$ Limite de proportionnalité ;
- $E_{a,\theta}$ Pente du domaine élastique linéaire ;
- $\varepsilon_{p,\theta}$ Déformation à la limite de proportionnalité ;
- $\varepsilon_{y,\theta}$ Déformation plastique ;
- $\varepsilon_{t,\theta}$ Déformation limite en élasticité ;
- $\varepsilon_{u,\theta}$ Déformation ultime.

1.6.2.3 Dilatation thermique de l'acier

La variation de la dilatation thermique $\varepsilon_{s(\theta)}$ en fonction de la température est illustrée à la figure [1.14].

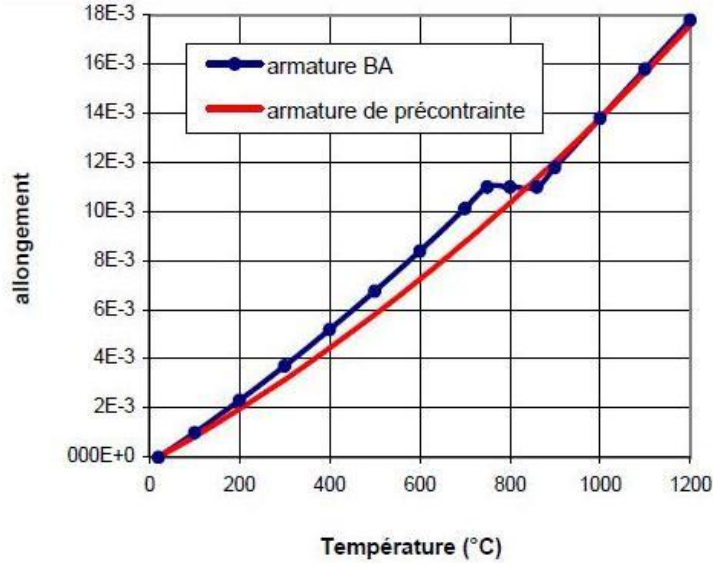


Figure 1.14 : Dilatation thermique de l'acier [11]

Nous constatons une diminution de la conductivité thermique en fonction de l'évolution de la température jusqu'à la valeur de 800 C° ou elle présente un pallier.

1.6.2.4 Chaleur spécifique de l'acier

Les propriétés thermiques de l'acier ne sont pas définies dans l'Eurocode 2 [10]. Elles ne sont en général pas nécessaires, sauf quand le pourcentage d'acier est important. On peut se référer aux valeurs présentées dans l'Eurocode 3 [11].

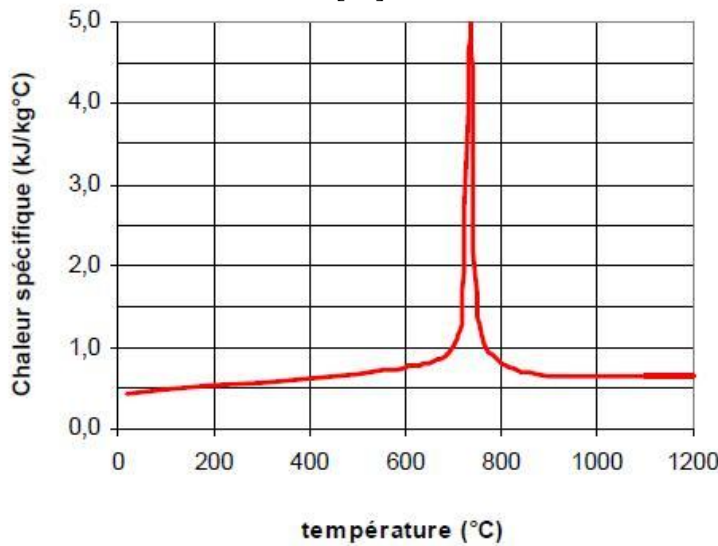


Figure 1.15 : Chaleur spécifique de l'acier au carbone, en fonction de la température [11].

1.6.2.5 Conductivité thermique de l'acier

La variation de la conductivité thermique λ_s de l'acier en fonction de la température est illustrée à la figure [1.16] :

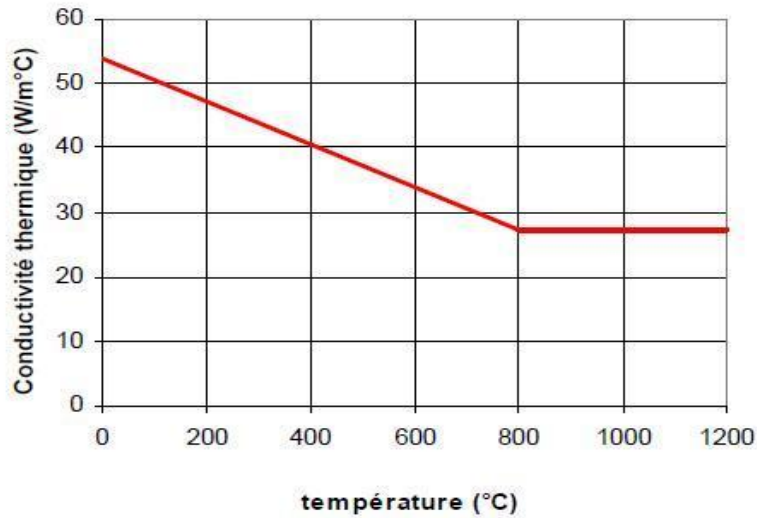


Figure 1.16: Conductivité thermique de l'acier au carbone en fonction de la température [11].

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les principales généralités du feu leur déroulement et développement ainsi que les différents types de modélisation des incendies. Nous avons détaillé et d'une manière explicite les différentes actions sollicitant les éléments de structure à la condition d'incendie et les caractéristiques des matériaux béton et acier sous température élevée.

Chapitre 02

Analyse bibliographique sur le
Comportement au feu des
structure en béton et mixte

Introduction :

Ce chapitre sera consacré à L'analyse bibliographique qui a pour but de synthétiser les différents travaux dans le domaine des sollicitations couplés thermo – mécanique pour différents types de matériaux et élément de structures. Quelques approches théoriques ont été appréhende ainsi que les essais disponibles dans la littérature.

- **D. Dhima [13]** : Propose une méthode simplifiée pour la vérification de la résistance d'un élément à la condition d'incendie. L'auteur spécifie que la résistance au feu (température uniforme) est assurée si la température de cet élément, après une durée d'incendie est inférieure à sa température critique. Une procédure de détermination de la température critique est proposée selon la norme XP ENV 1993-1-2 présentée selon différentes sollicitations de l'élément (élément simplement fléchi sans risque de déversement, élément comprimé ou fléchi avec risque de déversement, élément comprimé fléchi). L'approche permet de vérifier les éléments nus ou protégés. Dans le cas où l'élément est protégé cette procédure évalue l'épaisseur de la couche de protection.

- **Daniel Joyeux [14]** : Considère que l'incendie est une action accidentelle, n'intervient pas comme charge supplémentaire dans les combinaisons de charge, mais agit indirectement en modifiant les caractéristiques mécaniques des matériaux, qui sont fonction de la température. L'auteur spécifie donc que l'action due à un incendie n'est pas une action mécanique mais plutôt une action thermique. La courbe température – temps (dites courbe conventionnelle) est obtenue selon des essais. C'est une courbe monotone et croissante, donc elle n'admet pas de limite. La réglementation définit alors la stabilité des éléments de structure pour des durées dont la plage varie entre 15 minutes et 6 heures. L'auteur présente et commente le flux de chaleur des éléments métalliques non protégés défini par l'EUROCODE 1. En se basant sur l'hypothèse que la masse volumique de l'acier est indépendante de la température l'auteur argumente les lois de variation de la chaleur spécifique et de la conductivité thermique caractérisant l'acier fonction de la température. Le facteur de massivité est analysé selon que l'élément de structure soit protégé ou non ainsi que l'exposition de celui-ci vis-à-vis du feu. L'importance de la protection des éléments de structure en acier est montrée, cette protection translate le seuil de température avant la perte de stabilité.

- **Daniel Joyeux and al [15]** : Les auteurs donnent un aperçu des outils actuels disponibles et leur application lors d'un concept d'incendie naturel. Ils présentent un concept global de sécurité incendie permettant de prendre en compte l'ensemble des facteurs et acteurs intervenant lors du développement d'incendie et ce pour définir le comportement au feu des structures métalliques. Les textes réglementaires font référence à un incendie conventionnel (courbe ISO 834), cet incendie n'est nullement représentatif de l'action thermique sur les éléments de structures provoquée par l'incendie réelle. L'incendie réelle dépend essentiellement de la nature du local dans lequel le feu a démarré et des caractéristiques de ce local (nature des parois, nature et quantité du combustible, surface d'échange gazeux avec l'extérieur du local...). Les auteurs montrent que l'évolution d'un incendie naturel vis-à-vis d'un incendie conventionnel sur un seul paramètre (quantité du combustible) est très différente. L'incendie naturel atteint des températures très importantes et peut être nuisible pour les éléments à faible inertie thermique.

L'incendie naturel est fonction des paramètres suivants :

- ✓ Charge d'incendie
 - ✓ Caractéristiques des parois.
 - ✓ Ouvertures.
 - ✓ Scénarios d'incendies (Incendie localisé, incendie généralisé).
- **Jean Marie Aribert [16]** : En se fixant comme objectif l'optimisation du dimensionnement (en particulier le pourcentage d'armature longitudinale) pour obtenir la résistance au feu donnée en évitant une protection extérieure (peinture intumescente, produit projeté). L'annexe H de l'EN1994 -1-2 préconise une méthode de calcul de la charge de flambement à l'incendie, éventuellement avec un certain excentrement, un calcul préalable est du champ des températures pour une durée de résistance au feu est concrétisé au préalable. La méthode de calcul ne tient pas compte des imperfections structurales des poteaux (défauts de rectitudes, contraintes résiduelles...), ni des effets du second ordre. A la base de ces insuffisances la méthode peut conduire à des résultats relativement insécuritaires au-delà d'un certain élancement.

L'utilisation d'un logiciel SISMEF développé au CTICM « version incendie » adaptée aux poteaux mixtes à profils creux » Ce logiciel utilise :

Une formulation Lagrangienne actualisée (grands déplacements nécessitant une résolution incrémentale avec, à chaque pas, une procédure itérative de type Newton Raphson.

Prise en compte du glissement acier béton (connexion complète ou partielle, ou encore absence d'adhérence mécanique)

Comportement non linéaire des matériaux (acier, béton, connexion) incluant ce comportement avec la température (dans la situation d'incendie), de la dilatation thermique des matériaux, du fluage de l'acier.....

Elément finis à deux nœuds de connexion répartie spécialement développé pour la discrétisation des poteaux à profil creux en supposant :

Un glissement acier-béton uniforme dans toute la section (pas de décollement acier béton)

Une fonction d'interpolation linéaire du glissement en coordonnée curviligne entre les nœuds i et j de l'élément.

Cette approche est confrontée en modélisant l'élément avec différentes conditions aux limites à des essais les déplacements en tête du poteau, les déformées transversales à mi-hauteur et les résultats sont très concluant. Cette étude être introduite comme nouvelle annexe H, dans le guide Français de compléments non contradictoire et annexes alternatives, associé aux annexe Nationales de EN1993-1-2 et EN1994-1-2.

- **J.Krippa, L.Twilt, J.B.Schleich [17]:** Dans le but de rehausser le niveau de sécurité pour qu'il soit convenable, plusieurs nations se sont investies dans l'établissement des règlements plutôt descriptifs qui s'avère présenté plusieurs inconvénients. Ainsi les auteurs préconisent une conception basée sur quelques tests expérimentaux (analyse du comportement d'un portique comparé par rapport à une poutre sur appuis continus, durée du feu dépend essentiellement de la quantité et la nature du combustible....), ainsi donc, ils précisent que le modèle du feu dépend de paramètres physique. A la base de ces différentes constatations, ils proposent une démarche d'ingénierie sous feu qui consiste en :

Revue qualitative du projet : Toutes les valeurs des paramètres liés au projet ne sont pas connues, donc il est nécessaire de les estimer en réalisant aussi différents scénarios du feu. Cette première étape consiste en :

Définition des objectifs de sécurité incendie et des critères d'appréciation, généralement en accord avec les autorités, établissement des paramètres de conception prenant en considération le concept architectural et les mesures de protection incendie prévues, Caractérisation du bâtiment et de ses occupants, en estimant les paramètres non indiqués par le concepteur, identification des sources potentielles d'incendie ainsi que leurs conséquences prévisibles, sélection des scénarios d'incendie qui seront retenus pour l'analyse quantitative, établissement des propositions d'études pour l'analyse qualitative, indication des méthodes d'analyse à utiliser.

Analyse quantitative du projet : Cette étape consiste, en utilisant les sous-systèmes ou méthodes appropriés et en prenant le temps comme variable indépendante, à analyser de manière quantitative les différentes propositions d'études retenues à l'étape précédente.

Sources de chaleur : identification des sources potentielles de chaleur, choix des équipements ; Choix du contenu : la vitesse de croissance d'un incendie peut être contrôlée par le choix du contenu d'un bâtiment.

Disposition du contenu : l'éloignement des objets les uns des autres limitera la propagation du feu entre eux ; Choix des revêtements intérieurs Géométrie du local

Contrôle par la ventilation

Systèmes d'extinction

Éléments de construction

Évaluation des résultats des analyses par rapport aux critères d'appréciation

Si les critères ne sont pas satisfaits, lorsqu'il s'agit de la sécurité des personnes, il y a lieu de refaire l'analyse en prenant des mesures soit pour contrôler le développement et la propagation du feu de manière à pouvoir disposer d'un temps d'évacuation plus important soit pour réduire la durée nécessaire pour l'évacuation.

Présentation des résultats obtenus et établissement du rapport.

L'utilisation de l'ingénierie incendie, pour concevoir des ouvrages, permettra une meilleure adéquation des mesures de sécurité aux risques encourus.

- **Ch. Renaud, D. Joyeux [18] :** En se basant sur les hypothèses simplifiées des Eurocodes, les auteurs proposent une méthodologie qui s'applique aux éléments tendus et fléchis, évaluant ainsi le degré de stabilité au feu exposés sur les quatre faces à partir d'un taux de chargement déterminé en conditions normales d'utilisation. Des

valeurs tabulées sont proposées pour vérifier le degré de stabilité des éléments en H, U ou I. Le but de cette étude conduit à protéger les structures métalliques par une protection caractérisée au préalable. Toutefois le dimensionnement de ces structures peut être amélioré en appliquant les calculs de l'Eurocode 3 partie 1-2.

- **Wahid Nechnech [19]** : Un modèle couplé endommagement- plasticité est formulé en considérant le comportement non linéaire du béton sous un chargement thermo - mécanique. Les variations irréversibles des caractéristiques thermiques et mécaniques sont prises en compte ainsi que le développement de déformation d'interaction thermo - mécanique ainsi que la fermeture des fissures lors du chargement cyclique. L'utilisation du principe de la contrainte effective a permis de découpler la réponse thermo- élasto -plastique de la réponse endommagée. Ce modèle offre un traitement complet du béton sous charge mécanique et thermique aussi bien dans le domaine de la compression que dans celui de la traction. L'ensemble des paramètres du modèle est identifiable expérimentalement par des essais simples. L'insuffisance de ce modèle est le choix de la variable d'endommagement (isotrope) ne décrit nullement l'anisotropie liée à la fissuration. L'auteur présente pour la validation de son modèle trois applications, la confrontation du modèle par rapport aux essais à permis le calage des paramètres du modèle, la deuxième confrontation est réalisé sur plusieurs séries d'essais cycliques de traction et de compression afin de montrer la bonne prise en compte de l'endommagement lors des cycles de charge et décharge en tenant compte de la fermeture des fissures. Différentes structures en béton armé soumise à des chargements mécanique et thermique est confronté au modèle. Cette analyse permet à l'auteur de fournir une prédiction fiable du comportement des structures en béton armé. Ces simulations permettent la compréhension des mécanismes de ruines.

- **Bo Wu, Yu- ye Xu [20]** : L'auteur analyse le comportement structurel des poteaux dont la section est sous influence du feu avec différentes condition aux limites sous une sollicitation axiale et excentrée l'analyse est réalisé en élément finis. Le développement des contraintes internes ainsi que la déformation au milieu de l'élément sont analysées. Les sections analysées mettent en évidence un accroissement des forces axiales supplémentaires dans des colonnes de béton armé dont les conditions aux limites peuvent représenter des encastremets sous une sollicitation de

feu, cet accroissement peut atteindre approximativement 65-70 % des forces axiales dans des colonnes à température ambiante. L'augmentation de la déformation à mi hauteur du poteau avec une contrainte en rotation est plus lente sans contrainte rotative.

- **B. Wu, J.Z. Lu [21]** : En utilisant le principe de travail virtuel, un modèle d'élément poutre en béton armé sous l'influence de haute température est établi. Le modèle proposé est analytique, l'auteur le confronte par rapport à des essais expérimentaux effectués sur un portique. L'élément poutre renforcée avec des contraintes axiales et rotatives élastiques. Cette configuration a été choisie dans le but d'une analyse paramétrique incluant le facteur temps. L'auteur remarque que la contrainte axiale induit une force axiale de compression qui augmente la déflexion à mi travée de la poutre quand la température augmente et plus on augmente la contrainte axiale et plus la déflexion augmente. Par contre si la valeur de la rigidité en torsion est augmentée cette déflexion diminue.

- **J. M. Franssen, J. C. Dotreppe [22]** : Pour examiner l'influence de la forme circulaire sur le comportement dans les conditions de feu, une étude de recherche expérimentale a été exécutée. Dans ce papier, les auteurs décrivent la procédure de test, les observations faites et les valeurs obtenues pour la résistance au feu. Des méthodes théoriques se sont développées pour une conception sûr et efficace rapide de colonnes en béton armé dans des conditions de feu. Ces méthodes ont été appliquées avec succès aux colonnes circulaires. Les auteurs appliquent différents cas de charges et déterminent ainsi la résistance au feu pour les quatre types de poteaux considérés.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons relaté les différents travaux dans le domaine du comportement au feu ainsi que les différentes approches au niveau des règlements. Plusieurs travaux de recherches sur le comportement des éléments de structures sous feu ont été réalisés des poteaux en béton armé, en aciers et mixtes, des poutres en béton et mixte, les connections poteau-poutres. Nous avons constaté dans le domaine d'analyse des poutres poteaux en béton armé, en acier et mixte des insuffisances en matière d'évaluation du temps de tenue soit d'un élément poteau ou poutre ou d'une structure ; pour cela nous avons envisagé cette étude pour

des éléments de structure dont l'évaluation des paramètres est basé sur l'utilisation des codes de calcul.

Chapitre 03

Analyse des Modèles

Introduction :

Ce chapitre décrit les différents principes de transfert de chaleur, et des généralités sur le comportement mécanique des structures sous influence du feu. Les différentes approches de calcul des structures au sein de l'Eurocode sont considérées. Pour cela nous sommes intéressés aux éléments poteaux en béton armé et mixte tout en détaillant les principes des méthodes de résolution mécanique de ces éléments en situation d'incendie.

3.1 Modèles de transfert thermique :**3.1.1 Rappel sur le principe de transfert de la chaleur :**

Nous distinguons trois modes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. A la surface des éléments, les échanges se font essentiellement par convection et rayonnement. Pour l'acier matériau homogène la chaleur est uniquement transférée par conduction. Pour le béton matériau poreux, l'échange de chaleur est plus complexe les trois phénomènes sont pris en compte (rayonnement, convection et conduction), à cela s'ajoute le transfert de masse.

➤ **Equation de la transmission de la chaleur :**

L'équation différentielle régissant le transfert de chaleur par conduction dans les éléments de structure exposés au feu, est basée sur l'équation de Fourier, L'écriture de cette équation dans un système cartésien donne :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

Ou :

λ : Conductivité thermique du milieu considéré [W/mK]

ρ : Masse volumique [kg/m^3]

C : Chaleur spécifique [$J/kg K$]

T : Température en [K]

t : Temps en [s]

Q : Chaleur interne générée [W/m^3]

La solution de cette équation ne peut être obtenue que lorsque les conditions initiales et les conditions aux limites sont connues. Pour le cas de l'incendie, les conditions initiales représentent la distribution des températures avant l'analyse (température ambiante avant incendie). Pour chaque surface de l'élément analysé les conditions aux limites peuvent être déterminées. Sur la frontière extérieure elles peuvent être différentes (température imposée ou flux imposé).

Dans notre contexte d'analyse, ceci correspond au flux de chaleur net en surface exposée au feu de l'élément analysé. Ce flux est exprimé à partir de la valeur de la température des gaz chauds et est décomposé en la somme de deux flux distincts :

- Une composante convective
- Une composante radiative

Il est à noter que des phénomènes physiques se produisent lors de cette sollicitation (transfert de masse provoqués par la migration de la vapeur d'eau et que cette équation ne peut décrire tous ces phénomènes. Le flux de chaleur et le transfert de masse peuvent être décrits par des équations couplées.

➤ Flux de chaleur :

La quantité de chaleur dq [W] qui, pendant l'intervalle de temps [s], traverse selon sa normale \vec{n} la surface dS d'un milieu homogène et isotrope, sous l'effet d'un champ de température non uniforme est donnée par la relation de Fourier :

$$dq = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} dS \Delta t \quad (3.2)$$

Ou : $\frac{\partial T}{\partial n}$ est la dérivée normale de la température et λ est la conductivité du milieu considéré.

Le signe négatif signifie que la chaleur se propage dans le sens opposé au gradient de température.

Pour un élément d'épaisseur Δx limité par deux faces parallèles pour des températures T_1 et T_2 l'équation (3.2) s'écrit :

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} S \Delta t = \frac{\lambda}{\Delta x} \Delta t S (T_1 - T_2) \quad (3.3)$$

En supposant que la paroi est constituée de plusieurs plaques accolées formés de matériaux différents et de différentes épaisseurs Δx_i et de différentes conductivités thermiques $\Delta \lambda_i$ la quantité du flux qui traverse ces plaques est :

$$q = \frac{1}{\sum_i \frac{\Delta x_i}{\lambda_i}} \Delta t S (T_1 - T_2) \quad (3.4)$$

➤ **Transmission de la chaleur par convection :**

La convection est régie par le transport de la chaleur par un fluide en mouvement. Elle suppose que le flux de chaleur net sur un élément de surface est proportionnel à la différence de température du milieu ambiant T_f et la température de l'élément de surface T_s . Ce phénomène peut s'exprimer par la relation suivante en considérant la conductivité Thermique pour le matériau considéré.

$$q = \lambda(T) \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_S = h_c [T_f - T_s] \quad (3.5)$$

Ou :

h_c : est le coefficient de convection [W/m^2K], il dépend essentiellement des conditions d'écoulement du fluide (dans le cas de l'incendie : les gaz chauds) mais également des caractéristiques géométriques.

➤ **Transmission de la chaleur par rayonnement :**

La transmission de la chaleur par rayonnement suit la loi de Stefan-Bolzman. Le flux de chaleur qui traverse un élément de surface est proportionnel à la différence des puissances quatrième des températures absolues de surfaces qui échange le rayonnement. Ce phénomène s'exprime par la relation suivante :

$$q = \lambda(T) \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_S = \epsilon_{sp} \sigma [T_f^4 - T_s^4] \quad (3.6)$$

Ou :

σ : est la constante de Boltzman ($5.68 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$) ϵ_p est l'émissivité relative globale entre le milieu ambiant et la paroi de l'élément, ce paramètre dépend de la géométrie de l'enceinte et du solide étudié, de leur distance et de leur émissivité notée respectivement notée ϵ_s et ϵ_f . L'émissivité globale est :

$$\epsilon_p = \epsilon_s \epsilon_f \quad (3.7)$$

T_f et T_s sont exprimés en K

3.1.2 Formulation par différences finies :

➤ **rappel sur la méthode des différences finies avec schéma explicite :**

Dans cette méthode, nous cherchons à approcher en un certain nombre de points les températures à l'instant $(t + \Delta t)$ en fonction des températures à l'instant t . L'équation locale du transfert de la chaleur et les conditions aux limites sont transformées en un système d'équations aux différences finies (assimilation d'une différentielle à une petite variation de la

grandeur physique pendant une petite variation de temps), dont les inconnues sont les températures aux points considérés. La discrétisation est obtenue en découpant la section étudiée par un maillage de forme et de dimension adaptée et en divisant le temps en intervalles élémentaires successifs Δt .

➤ **Formulation à partir de l'échange de chaleur entre mailles rectangulaires :**

Nous nous plaçons dans le cas général d'un élément constitué de différents matériaux et discrétisé en un maillage rectangulaire non uniforme. Chaque maille, représentée par ses indices de position i et j , est caractérisée par les paramètres suivants :

- ses dimensions Δx_i et Δy_i ,
- sa conductivité thermique $\lambda_{j,i}$,
- sa chaleur spécifique $C_{j,i}$
- sa masse volumique $\rho_{j,i}$

Nous ne supposons que les paramètres de chaque maille (température, conductivité thermique...) sont caractérisés par leur valeur au centre de la maille.

Soit une maille (i,j) dont le centre est notée 0 comme indiquée sur la figure 3.1. Le bilan thermique de cet élément pendant l'intervalle de temps Δt s'effectue en considérant le flux reçu par conduction des quatre mailles adjacentes, $(i-1,j)$, $(i+1,j)$, $(i,j-1)$, $(i,j+1)$.

Nous considérons plus particulièrement le flux de chaleur entre les mailles

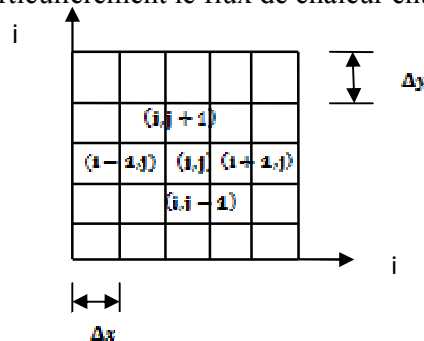


Figure 3.1 : Discrétisation de la section en éléments discrets

Si la maille (i,j) est à l'intérieur de la section, nous pouvons considérer que le flux traverse deux Parois d'épaisseur $\Delta x_{i-1/2}$ et $\Delta x_{i/2}$ et de conductivité thermique $\lambda_{(i-1,j)}$ et $\lambda_{(i,j)}$. Le flux de chaleur est obtenu en appliquant la relation (3.3) :

$$Q_{(i-1,j) \rightarrow (i,j)} = \Delta y_j \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\frac{\Delta x_{i-1}}{2} + \frac{\Delta x_i}{2}} \Delta t \quad (3.8)$$

Si la maille (i,j) se trouve à la frontière du domaine, nous pouvons considérer que le flux traverse une paroi d'épaisseur $\Delta x_i/2$, et de conductivité thermique $\lambda(i,j)$, après un échange de chaleur à la surface caractérisée par le coefficient α_f . Le flux de chaleur peut être obtenu en appliquant la relation (3.4) :

$$Q_{(i-1,j) \rightarrow (i,j)} = \Delta y_j \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\frac{1}{\alpha_f} + \frac{1}{2} \frac{\Delta x_i}{\lambda(i,j)}} \Delta t \quad (3.9)$$

Pour trouver la quantité de chaleur totale reçue par la maille (i,j) , il faut ajouter non seulement les flux de chaleur transmis par les autres mailles adjacentes, mais encore la quantité de chaleur absorbée par la maille (i,j) pendant l'intervalle de temps Δt , définie par :

$$Q_{abs} = C_{(i,j)} \rho_{(i,j)} \Delta x_i \Delta y_j (T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t) \quad (3.10)$$

Finalement le bilan thermique pour la maille (i,j) s'écrit :

$$Q_{(i-1,j) \rightarrow (i,j)} + Q_{(i,j) \rightarrow (i+1,j)} + Q_{(i,j-1) \rightarrow (i,j)} + Q_{(i,j) \rightarrow (i,j+1)} = Q_{abs} \quad (3.11)$$

Dans le cas où nous avons une sollicitation sur toutes les faces nous présentons la configuration schématique des éléments discrets de l'élément considéré.

➤ Formulation classique en différence finies :

Nous nous plaçons toujours dans le cas général d'un élément constitué de différents matériaux et discrétisé en un maillage rectangulaire non uniforme. Pour chaque maille (i,j) on peut transformer l'équation du transfert de la chaleur (3.1) de la manière suivante :

La dérivée première de la température (erreur d'ordre δx^2) au point (i,j) peut être approchée

Par les relations :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{i,j} = \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\frac{\Delta x_{i-1}}{2} + \frac{\Delta x_i}{2}} \quad (\text{Différence centrée en amont}) \quad (3.12)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{i,j} = \frac{(T_{i+2,j} - T_{i,j})}{\frac{\Delta x_{i+2}}{2} + \frac{\Delta x_i}{2}} \quad (\text{Différence centrée en aval}) \quad (3.13)$$

Où Δx_i est la discrétisation spatiale suivant x .

Puisque la conductivité thermique peut varier d'une maille à l'autre, on obtient :

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{i,j} = \frac{(T_{i,j} - T_{i-2,j})}{\frac{\Delta x_{i-2}}{2} + \frac{\Delta x_i}{2}} \quad (\text{Différence centrée en amont}) \quad (3.14)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{i,j} = \frac{(T_{i,j} - T_{i-2,j})}{\frac{\Delta x_{i+2}}{2} + \frac{\Delta x_i}{2}} \quad (\text{Différence centrée en amont}) \quad (3.15)$$

La différence centrée du second ordre s'écrit donc :

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) \right|_{i,j} = \frac{\frac{(T_{i+2,j} - T_{i,j})}{\frac{\Delta x_{i+2}}{2} + \frac{\Delta x_i}{2}} \frac{(T_{i,j} - T_{i-2,j})}{\frac{\Delta x_{i-2}}{2} + \frac{\Delta x_i}{2}}}{\Delta x_i} \quad (3.16)$$

Après considération similaire de la dérivée suivant y et multiplication par $\Delta x_i \Delta y_j$, la forme locale de l'équation de la chaleur entre la maille (i, j) est la suivante :

$$C_{(i,j)} \rho_{(i,j)} \Delta y_i \Delta y_j \frac{\partial T_{i,j}}{\partial t} = \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j}) \Delta y_j}{\frac{1}{2} [\frac{\lambda_{x_{i+1}}}{\lambda_{i+1,j}} + \frac{\lambda_{x_i}}{\lambda_{i,j}}]} - \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j}) \Delta y_j}{\frac{1}{2} [\frac{\lambda_{x_{i-1}}}{\lambda_{i-1,j}} + \frac{\lambda_{x_i}}{\lambda_{i,j}}]} + \frac{(T_{i,j+1} - T_{i,j}) \Delta x_j}{\frac{1}{2} [\frac{\lambda_{y_{i+1}}}{\lambda_{i,j+1}} + \frac{\lambda_{y_i}}{\lambda_{i,j}}]} - \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j}) \Delta y_i}{\frac{1}{2} [\frac{\lambda_{y_{j-1}}}{\lambda_{i,j-1}} + \frac{\lambda_{y_i}}{\lambda_{i,j}}]} \quad (3.17)$$

Le terme de gauche de cette relation représente la puissance calorifique échangée par conduction avec les mailles voisines et le terme de droite correspond à la variation de chaleur interne conduisant à l'échauffement ou au refroidissement de la maille.

En remplaçant $\frac{\partial T}{\partial x}$ et $\frac{\partial T}{\partial y}$ par leurs expressions approchées en fonction de la température à

l'instant t , on peut à chaque pas de temps estimer les températures à l'instant $t+\Delta t$

Si l'on discrétise $\frac{\partial T_{i,j}}{\partial t} = \frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t}{\Delta t}$ pour $t \in [t, t + \Delta t]$, on obtient pour chaque maille (i, j) à l'intérieur de la section :

$$T_{i,j}^{t+\Delta t} = T_{i,j}^t + \frac{\Delta t}{c(\rho, \rho) \Delta x_i \Delta y_j} \left\{ \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j}) \Delta y_j}{\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta x_{i+1}}{\lambda_{i+1,j}} + \frac{\Delta x_i}{\lambda_{i,j}} \right]} - \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j}) \Delta y_j}{\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta x_{i-1}}{\lambda_{i-1,j}} + \frac{\Delta x_i}{\lambda_{i,j}} \right]} + \frac{(T_{i,j+1} - T_{i,j}) \Delta x_j}{\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta y_{j+1}}{\lambda_{i,j+1}} + \frac{\Delta y_j}{\lambda_{i,j}} \right]} - \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j}) (T_{i,j+1} - T_{i,j}) \Delta x_i}{\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta y_{j-1}}{\lambda_{i,j-1}} + \frac{\Delta y_j}{\lambda_{i,j}} \right]} \right\} \quad (3.18)$$

Où toutes les grandeurs ρ, c, λ qui dépendent de la température sont évaluées à l'instant t. Lorsque la maille (i, j) constitue une frontière du domaine, on procède de la même manière ; on remplace dans l'expression précédente un des termes de conduction interne par le flux de Surface correspondant, soit (3.10) si la maille (i, j) constitue une frontière extérieure du domaine, soit (3.11).

3.2 Modèles mécaniques en situation d'incendie :

3.2.1 Généralité sur le comportement mécanique des structures sous incendie :

Le comportement mécanique d'une structure en situation d'incendie est tributaire de la manière dont elle se comporte une fois qu'elle est soumise à cette sollicitation. Nous pouvons donc dire qu'il existe un couplage thermomécanique. La résistance au feu peut être schématisée comme une suite d'événement selon l'organigramme suivant :

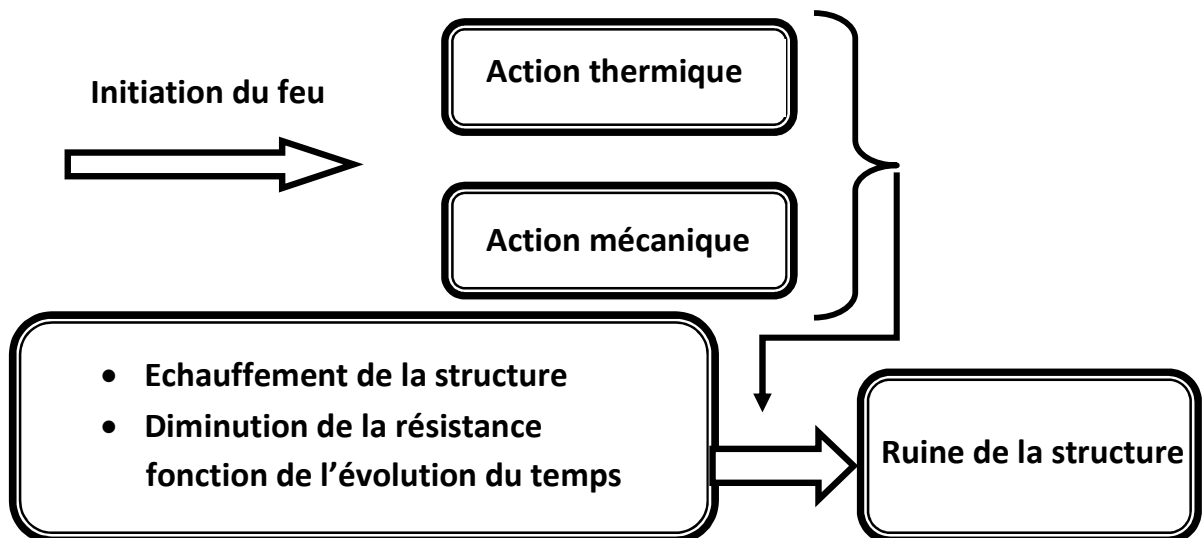


Figure 3.2 : organigramme de résistance au feu

L'objectif visé est de décrire le comportement mécanique des structures ou des éléments de structure en situation d'incendie. Pour cela il faut réaliser soit :

- des essais au feu
- Etablir un modèle de calcul.

La description du comportement permet d'établir la relation déplacement fonction du temps ou la capacité portante fonction du paramètre temps.

Concernant le calcul du comportement mécanique des structures exposées au feu, il peut être réalisé par les trois approches ci-dessous figure [3.2].

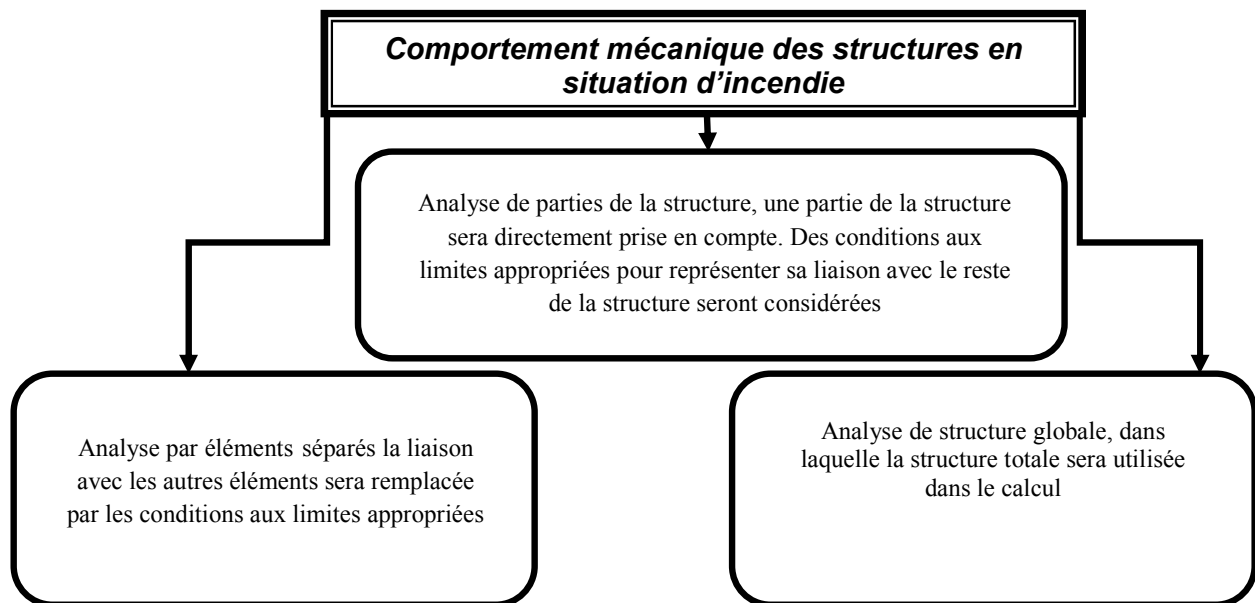


Figure 3.3 : approches essentiel de calcul du comportement mécanique en situation d'incendie

Les figures [3.2] et [3.3] montrent les trois types d'approche de l'analyse du comportement mécanique d'une structure sous l'influence d'un feu. On peut constater que l'analyse par élément est simple. Pour une analyse globale de la structure plusieurs phénomènes couplés à l'action du feu peuvent être considéré tel que la stabilité de la structure, effet d'interaction d'une partie de la structure sur une autre partie ou sur la structure globale.

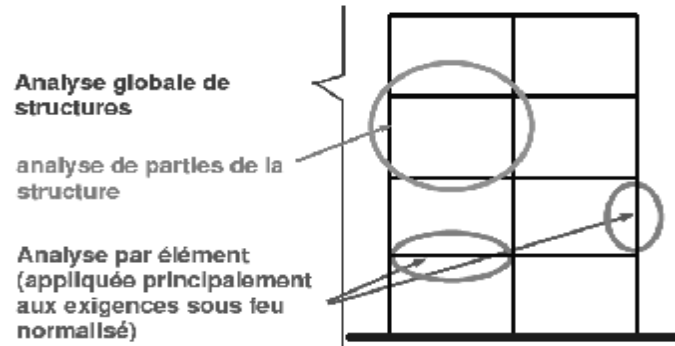


Figure 3.4 : Différentes analyses mécanique sous action du feu

| Analyse par élément | Analyse globale de structures |
|---|---|
| | |
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ Analyse des éléments indépendants ➤ simple à appliquer ➤ En général, appliquée sous feu normalisé | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Effet d'interaction entre différentes parties de structure ➤ rôle de la compartimentation ➤ stabilité globale |

Figure 3.5 : Analyse mécanique par éléments et analyse globale d'une structure sous l'influence d'un feu

3.2.2 Comportement des poteaux en béton armé sous feu:

3.2.2.1 Méthodes de calcul simplifiées :

Il existe deux méthodes simplifiées pour la vérification de la résistance au feu des poteaux en béton armé :

➤ La méthode A :

Cette méthode est basée sur l'équation suivante :

$$R = 120[(R_{Nfi} + R_a + R_l + R_b + R_n) / 120]^{1,8} \tag{3.19}$$

Où :

$$R_{n,fi} = 83 \left[100 - \mu_{fi} \frac{1+\alpha}{(0,85/\alpha_{rc}) + \alpha} \right] \tag{3.20}$$

$\mu_{fi} = N_{edfi} / N_{rd}$ niveau de chargement de calcul en situation d'incendie

$$R_a = 1,60(a-30)$$

$$R_l = 9,60(5 - l_{of})$$

$$R_b = 0,09 b'$$

$R_n = 0$ pour $n=4$ (armature d'angle uniquement)

$=12$ pour $n > 4$

a est la distance de l'axe des barres d'acier longitudinales au parement (mm) :

$25 \text{ mm} \leq a \leq 80 \text{ mm}$.

ℓ_{ofi} est la longueur efficace d'une colonne en condition d'incendie ℓ_{ofi} peut être estimée égale à ℓ_0 à température normale dans tous les cas. Pour les bâtiments contreventés pour lesquels la résistance au feu normalisé est supérieure à 30 min dans le cas de colonnes continues. La longueur efficace ℓ_{ofi} peut être prise égale à $0,5 \ell$ pour les étages intermédiaires et $0,5 \ell \leq \ell_{ofi} \leq 0,7 \ell$ pour l'étage supérieur, expression dans laquelle ℓ est la longueur réelle de la colonne (entre axe d'étage).

$b' = 2A_c / (b+h)$ pour les sections rectangulaires .

$= \varnothing_{col}$ pour les sections circulaires.

$200 \text{ mm} \leq b' \leq 450 \text{ mm}$; $h \leq 1,5 b$

ω = est le ratio mécanique d'armatures à température normale :

$$\omega = \frac{A_s f_{yd}}{A_c f_{cd}} \quad (3.21)$$

a_{cc} est le facteur de résistance à la compression qui tient compte des effets à long terme sur la résistance mécanique, la valeur pour les actions normales est entre 0,8 et 1,0 la valeur à prendre en compte ici est la valeur à froid soit 0,85.

En situation d'incendie, la résistance de calcul à la compression du béton est

$f_{cd fi} = a_{cc} \cdot f_{ck} / Y_{cfd} = 1,00 \cdot f_{ck} / 1,00 = f_{ck}$ à comparer avec $f_{cd} = 0,85 \cdot f_{ck} / Y_c$ à froid.

La méthode A est applicable pour une excentricité maximale du premier ordre qui sera fixée dans l'annexe nationale belge entre 0,15h à 0,40h

Symboles :

b : largeur de la colonne

h : hauteur de la colonne

μ_{fi} (μ_{fi}): niveau de chargement

n : nombre de barres d'armature longitudinales

a : distance axe armature-paroi

➤ La méthode B :

Elle est également uniquement valable pour les constructions contreventées. Elle est basée sur des calculs empiriques prenant en compte les effets du second ordre et la réduction des caractéristiques mécaniques du béton et aciers en fonction du champ de température.

- Niveau du chargement maximal.
- Excentricité du premier ordre $e/b \leq 0,25$ avec $e_{\max} = 100$
- Elancement $\lambda_{fi} = \ell_{of} / i \leq 30$
- Pourcentage d'armature ω

Les résultats sont donnés au tableau 5.2b de l'Eurocode 2 partie 1-2[10]

L'Eurocode 2 partie 1-2 donne en annexe informative C un grand nombre de tableaux avec les résultats de calcul de colonnes en cas d'incendie et en fonction de la résistance au flambement de constructions contreventées. Les tableaux donnent les dimensions minimales des sections et des armatures en fonction de l'élancement (jusqu'à 80) de l'excentricité du premier ordre (e avec e/b jusqu'à 0,5) du pourcentage d'armatures et du niveau de chargement.

L'annexe B3 de l'Eurocode 2 partie 1-2 propose aussi une Méthode d'évaluation d'une section droite en béton armé exposée à un effort normal et/ou un moment fléchissant par la méthode fondée sur l'estimation de la courbure.

3.2.2.2 Méthodes de calcul avancées :

Ces méthodes sont valables pour n'importe quel élément de structures y compris les poteaux en béton armé, elles sont essentiellement basées sur les méthodes numériques (éléments finis ou différences finis) pour la détermination de la capacité portante et de la déformation à tous points du poteau.

3.2.3 Comportement des poteaux mixtes avec profil creux rempli de béton:

Plusieurs recherches [23, 24, 25, 26, 27, 28,29] ont été menées établissant des méthodes de calcul permettant de calculer la résistance au feu des poteaux mixtes avec profil creux rempli de béton. Des modèles de calcul couplés entre le comportement thermique et le comportement mécanique sont inexistant et ce dans un but simplificateur. Ainsi pour l'analyse du comportement mécanique, la distribution des températures au sein des poteaux est obtenue soit expérimentalement soit à l'aide d'un modèle thermique. Le comportement mécanique est alors déterminé par une procédure itérative prenant en compte l'évolution de la température à chaque pas de temps ainsi que leurs influences sur les propriétés mécaniques.

Les modèles numériques basés essentiellement sur la méthode des éléments finis, utilisant l'hypothèse de **Bernoulli** les poteaux sont discrétisés par des éléments finis barre à deux nœuds et six degrés de liberté :

- Deux déplacements
- Une rotation

Par nœud, les déformations dues à la torsion ainsi que ceux dues aux cisaillements sont négligés. Seules les contraintes normales sont prises en considération.

En présence d'un champ de température les contraintes thermique impliquant une déformation longitudinale résultante respectivement des contraintes normales, des dilatations thermique, des contraintes résiduelles et du fluage.

Parallèlement à cela, des méthodes de calcul simplifiées basées sur les relations 'moment – courbure' et 'résistance axiale-déformation longitudinale' permettent d'analyser la stabilité au feu des poteaux mixtes. Elles sont établies au niveau de la section transversale la plus sollicitée et combinées avec l'équation d'équilibre global [24, 27].

Dans ces procédures l'état ultime des poteaux après un temps d'exposition au feu donné correspond à la condition de flexion au niveau de la section critique n'excède pas le moment résistant.

Les valeurs du moment résistant sont calculées en incrémentant par pas successifs la déformation longitudinale et la courbure (lié à la déformation transversale du poteau) et en déduisant les contraintes normales à partir des relations contrainte déformation des différents matériaux. Cette formulation tient compte des dilatations thermiques, des imperfections géométriques et des non linéarités matérielles (variation des lois de comportement élasto - plastique fonction de la variation des températures) sur la capacité portante des poteaux.

➤ **Méthodes de calcul :**

Selon l'Eurocode 4 partie 1.2, la vérification du comportement au feu des structures mixtes (poutre, poteau, plancher) peut être effectuée selon trois méthodes différentes à savoir :

- Méthodes de calcul simplifiées basées sur les valeurs tabulées prédéfinies. Ces valeurs établies pour les sections transversales les plus fréquentes sur la base des essais expérimentaux et forfaitaire pour le dimensionnement ou la vérification des différents éléments mixtes vis-à-vis leur résistance au feu.
- Les méthodes simplifiées basées sur des formulations analytiques ne concernent que les éléments de structures. Pour les profils creux rempli de béton, il s'agit de l'annexe G de l'Eurocode 4, partie 1-2
- Les méthodes de calcul avancées permettent une estimation rigoureuse et précise du comportement globale des structures sous l'influence du feu. Elles font appel à des modèles numériques basés sur la méthode des éléments finis ou la méthode des différences finies. Les conditions aux limites peuvent être spécifiques pour les

éléments de structures, donc ce qui permet une plus grande flexibilité dans les modèles qui peuvent refléter la physique du problème considéré.

➤ **Domaine d'application des trois méthodes :**

L'Eurocode spécifie les différentes possibilités d'application des trois méthodes sous condition de feu nominale ; et le tableau [3.1] montre que nous avons plus de possibilité d'appliquer ces méthodes sous feu nominal.

Tableau 3.1: Domaine d'application des différentes méthodes de calcul en situation de feu nominal (normalisé)

| Type d'analyse | Valeur tabulée | Modèles de calcul simplifiés | Modèles de calcul avancés |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Analyse par élément | Oui Feu normalisé ISO-834 | Oui | Oui |
| Analyse de parties de la structure | Non applicable | Oui (si disponible) | Oui |
| Analyse globale de la structure | Non applicable | Non applicable | Oui |

Sous condition de feu naturel, l'application des méthodes de calcul simplifiées est largement limitée par le fait que la condition d'échauffement des éléments est totalement différente de celles sous condition de feu normalisé. C'est la raison pour laquelle le tableau [3.2] montre une majorité négative des situations d'application pour les méthodes de calcul simplifiées. Le seul exemple pour lequel elles peuvent être utilisées concerne les éléments en acier avec ou sans protection passive contre l'incendie et entièrement entourés par le feu.

Tableau 3.2: Domaine d'application des différentes méthodes de calcul sous condition de feu naturel

| Type d'analyse | Valeur tabulée | Modèles de calcul simplifiés | Modèles de calcul avancés |
|--------------------------|-----------------|------------------------------|---------------------------|
| Analyse par élément | Notn applicable | Oui (si disponible) | Oui |
| Analyse de parties de la | Non | Notn | Oui |

➤ **Méthodes de calcul simplifiées basées sur les valeurs tabulées prédéfinies :**

Ces méthodes permettent de déterminer en fonction de la résistance au feu normalisé que l'on veut atteindre (R30, R60, R90, ou R120) et en fonction

- Du taux de chargement $\eta_{fi,t}$
- Des dimensions minimales de la section transversale (b, h ou d)
- Quantité minimale d'acier
- Enrobage

L'application de la méthode de calcul par valeur tabulée peut être réalisée dans deux situations différentes figure [3.6], l'une en cas de vérification où les dimensions des éléments de structure sont déjà connues et l'autre en cas de prédimensionnement où, en revanche, les actions mécaniques de calcul sont déjà définies.

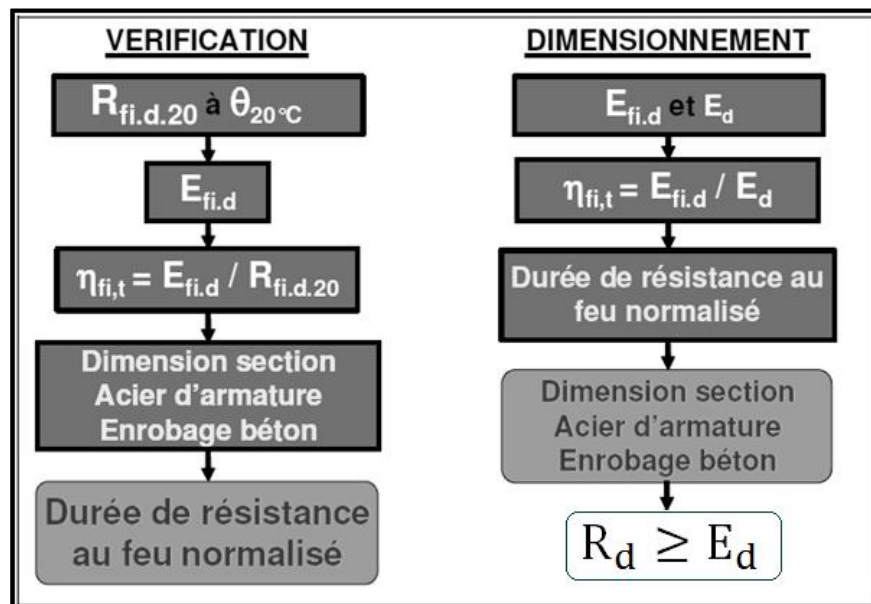


Figure 3.6 : deux possibilités d'application des méthodes de calcul simplifiées

En cas de vérification on peut évaluer l'effet des actions mécanique en situation d'incendie $E_{fi,d}$ afin d'en déduire $\eta_{fi,t} = \frac{E_{fi,t}}{R_d}$, parce que les dimensions de la section de l'élément ainsi que sa capacité portante vis-à-vis de la charge R_d sont déjà connues. A partir de la valeur du niveau de chargement, des dimensions de la section de l'élément et des conditions sur les dispositions constructives, les valeurs tabulées permettent d'obtenir le degré de résistance au feu de l'élément à vérifier par rapport à celui imposé par la réglementation.

En cas de prédimensionnement les sections de l'élément ne sont pas encore connues, par contre les effets des actions $E_{fi,d}$ et E_d sont connus à partir des combinaisons de charges pour le dimensionnement à température normale et en situation d'incendie. Dans ce cas le choix du niveau du chargement est pris dans un sens de sécurité et peut être décrit par la relation

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{fi,d}}{E_d} \quad (3.22)$$

A partir de cette valeur du niveau de chargement et du degré de résistance au feu normalisé, les dimensions minimales de la section ainsi que les dispositions constructives correspondantes de l'élément peuvent être définies. Enfin la section ainsi définie doit être vérifiée pour la condition d'utilisation à température normale, à savoir $R_d = E_d$.

➤ Méthodes de calcul simplifiées :

Une campagne d'essai réalisé en France a permis de mettre en évidence une méthode de calcul déterminant la charge ultime des poteaux mixtes avec profil creux rempli de béton, non protégés extérieurement et soumis à l'action de l'incendie conventionnel [31, 30]. Des coefficients minorateurs permettent de considérer l'excentricité accidentelle de charge d'une part et de faire correspondre les valeurs calculées avec les résultats d'essais. Un coefficient de correction est pris en considération avec un chargement centré équivalent aux moments de flexion (charge excentrée). Cette méthode a été proposée dans les années 80 par COMETUBE. Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés [30, 31] dans l'optique de valider la méthode et définir son domaine d'application pour lequel elle donne une évaluation jugée satisfaisante de la charge ultime. Les résultats de ces investigations ont permis la modification de la méthode de manière à tenir compte en outre de l'évolution des connaissances sur le comportement du béton aux températures élevées (diagramme contrainte-déformation, ductilité...), mais également pour couvrir les résultats d'essais les plus récents [32, 33].

L'Annexe G reprend en partie la méthode proposée par **COMETUBE**, Elle utilise une évolution des caractéristiques mécaniques des matériaux pris dans le document normatif du **DTU [41]**, mais avec une évolution des caractéristiques thermiques issues de l'**Eurocode 4**.

Le calcul de la résistance au feu des poteaux mixtes se décompose en deux étapes :

- D'une part, un calcul thermique permettant d'estimer la distribution et l'évolution des températures dans la section transversale du poteau, compte tenu des propriétés thermo-physiques des matériaux,
- D'autre part, une étude mécanique permettant de déterminer la capacité portante, (effort normal ultime), compte tenu de l'affaiblissement des caractéristiques mécaniques des matériaux avec la température.

✓ **principe de la méthode :**

Détermination de l'évolution de la température au sein de l'élément composé.

Pour les poteaux mixtes la présence, du béton conduit à d'importants gradients de températures au sein de la section droite du poteau. De ce fait, pour évaluer le champ de température, il faut avoir recours à des modèles de transferts thermiques bidimensionnels.

Il faut donc évaluer le flux de chaleur auquel est soumis le poteau. Il est exprimé à partir de la valeur de la température des gaz chauds, et est habituellement décomposé en la somme de deux flux distincts, à savoir : une composante convective et une composante radiative.

Le modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

- La résistance au transfert thermique dans l'acier est négligeable ;
- la résistance thermique entre l'acier et le béton est supposée nulle ;
- Le béton est considéré comme un matériau homogène.

L'évolution de la température dans les éléments de structure exposée au feu est fondée principalement sur l'équation différentielle de transfert de la chaleur, ou équation de FOURIER.

✓ **Détermination de l'effort normal ultime « poteau soumis à la compression centré » :**

Pour l'aspect mécanique, la détermination de l'effort normal ultime est basée sur la connaissance du champ de température à chaque instant au cours de l'incendie, déterminée par le modèle thermique. Ainsi à partir de cet état, il est possible de déterminer l'effort normal ultime repris par le poteau.

Cependant, dans le cas d'un profilé métallique (profil creux par exemple), les inévitables imperfections géométriques et structurales diminuent la résistance au flambement. La charge ultime s'écrit :

$$N_{cr} = \frac{\Gamma^2 E_a^* I}{l^2} \quad (3.23)$$

Ou : E_a^* est le module d'élasticité de l'acier qui conduit à la valeur de la contrainte critique donnée par les courbes de flambement (N, λ).

E_a^* Ce coefficient n'est pas le module de Young, Son introduction permet de tenir compte des imperfections géométriques et structurales du profil creux dus essentiellement aux contraintes résiduelles et hétérogénéité de la limite élastique (CECM).

Par contre dans le cas ou l'élément présente une homogénéité sans contrainte, sollicitée axialement, la charge critique correspond à la charge de flambement élastique N_{cr} ou charge d'Euler.

Dans le cas des profils creux remplis de béton la charge ultime d'un profil creux rempli de béton s'écrit :

$$N_{f,cr} = \frac{\Pi^2}{l_\theta^2} (E_{a,\theta,\sigma} I_a + E_{c,\theta,\sigma} I_c + E_{s,\theta,\sigma} I_s) \quad (3.24)$$

l_θ : Longueur de flambement en situation d'incendie. Les longueurs de flambement dans des conditions au feu sont généralement prises égales à 0,5 fois la longueur totale du poteau, ou 0.7 fois la longueur dans d'autres cas.

$E_{a,\theta,\sigma}$: Module tangent déduit de la relation contrainte-déformation pour le matériau i à la température θ , et pour une contrainte $\sigma_{i,\theta}$.

- I_i : Moment d'inertie de la section du matériau i par rapport à l'axe principal d'inertie y ou z de la section mixte.

L'utilisation de la compatibilité des déformations dus aux efforts agissant dans la section (acier, béton et armatures), permet de déterminer la charge ultime du poteau

$$\varepsilon_b = \varepsilon_s = \varepsilon_a = \varepsilon$$

Pour cet allongement, l'effort normal ultime est obtenu par l'égalité entre $N_{f,cr}$ figure [3.7]

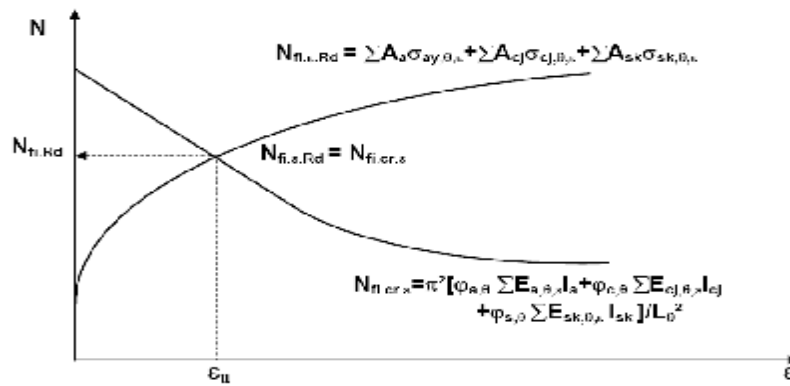


Figure 3.7: Détermination de la charge ultime des profils creux remplis de béton pour un champ de température donné

Effort de compression avec flambement (Eulérien) et $N_{fi,pl,Rd}$ effort normal de plastification du poteau, défini par la relation suivante :

$$N_{fi,pl,Rd} = A_a \frac{\sigma_{a,\theta}}{\gamma_{M,fi,a}} + A_c \frac{\sigma_{c,\theta}}{\gamma_{M,fi,c}} + A_s \frac{\sigma_{s,\theta}}{\gamma_{M,fi,s}}$$

Où

A_i Aire de la section transversale du matériau i ,

$\sigma_{i,\theta}$ Contrainte dans le matériau i , à la température θ , et

$M_{fi,i,t}$ Coefficient partiel de sécurité du matériau i en situation d'incendie.

Nous avons donc l'allongement et la charge à l'état ultime à chaque instant de l'incendie ϵ_{ult} et $P_{u,t}$. Ainsi, pour une tenue au feu déterminée, on peut connaître la charge maximale à appliquer au poteau.

- ✓ **Détermination de l'effort normal ultime poteau soumis à une charge excentrée :**

Dans le cas une excentricité est prise en compte on peut utiliser la relation suivant en évaluant les coefficients α_1 et C_m sur les courbes figure [3.8]

$$N_{eq} = \alpha_1 C_m N_{fi,sd}$$

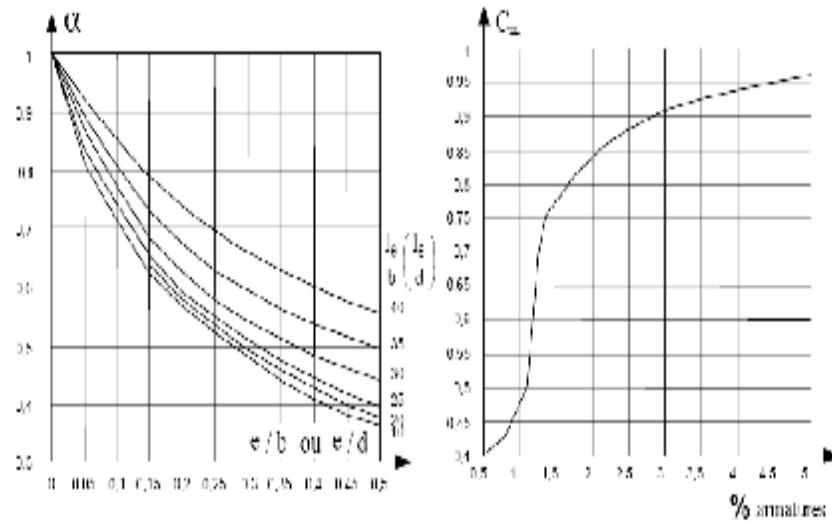


Figure 3.8: Abaques pour la prise en compte de l'excentricité

➤ **Méthodes de calcul avancées :**

Il est mentionné dans l'Eurocode partie feu que, les modèles de calcul sont généralement utilisés pour la vérification de la résistance au feu des structures. Trois modèles peuvent être considérés pour pouvoir concrétiser cette approche.

- Un modèle d'action thermique, qui permet de simuler les actions thermiques qui seront prises en compte dans la détermination de l'échauffement des structures. Ces actions sont représentées par la relation température-temps conforme à la courbe d'incendie normalisée ISO 834.
- La répartition et l'évolution de la température en tout point des éléments de structures soumis à l'incendie peuvent être estimées par l'utilisation d'un modèle de transfert thermique. Ces modèles sont essentiellement basés sur la méthode des différences finies ou des éléments finis, prennent en compte les non linéarités liées à l'évolution des propriétés matérielles avec la température. Les échanges de chaleur se font essentiellement par convection et rayonnement au niveau des surfaces exposées en situation d'incendie. A l'intérieur des matériaux (acier et béton), la chaleur est uniquement transférée par conduction.
- Un modèle de comportement mécanique pour déterminer :
 - La capacité portante de l'élément de structure analysé
 - La déformation en tout point de l'élément de structure,

Ces modèles font appel le plus souvent à la méthode des éléments finis en tenant compte des effets non-linéarités couplées à la plasticité des matériaux et aux grands déplacements, amplifiées par l'action de la température. Pour la résolution est essentiellement basée sur les méthodes itératives.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné les différentes approches de calcul du comportement des poteaux en béton armé et profil creux remplis de béton. Les différentes méthodes simplifiées ou avancées avec leur domaine de validité ainsi que les hypothèses de chaque méthode. L'application de ces méthodes nous a conduits à la nécessité de calcul informatique qui nous permettra l'étude et l'analyse de la résistance au feu de ces types d'éléments de structure, ainsi qu'une maîtrise des paramètres influant la résistance au feu.

Enfin le quatrième et cinquième chapitre fait l'objectif d'évaluation du comportement au feu de ces éléments par ces méthodes toute en utilisant des logiciels informatiques de calcul.

Chapitre 04

Comportement des poteaux
sous feu

Introduction :

Nous proposons dans ce chapitre l'analyse des poteaux en béton armé et des poteaux en profil métallique creux rempli de béton. Une analyse paramétrique a été réalisée afin d'identifier les paramètres les plus influents sur le comportement de ces éléments sous l'influence du feu, ces paramètres sont : la géométrie ; le chargement ; le taux d'armature ; l'enrobage et la longueur de flambement ; la résistance caractéristique du béton ; la limite élastique des armatures ainsi que le type de granulats et la teneur en eau.

Pour la résolution du problème analysé, nous avons utilisé la méthode simplifiée de l'Eurocode 4 annexe G pour les poteaux creux remplis de béton ou l'analyse a été concrétisée par le Logiciel POTFIRE qui est basé sur cette partie de l'Eurocode.

Pour l'analyse des poteaux en béton armé, nous nous sommes appuyés sur les spécifications de l'annexe B.3 de l'Eurocode 2 partie 1-2 qui propose l'évaluation du risque de flambement des poteaux en conditions d'incendie par la méthode fondée sur l'estimation de la courbure, l'analyse a été menée par le logiciel CIMFEU.

Une confrontation des deux types de sections circulaires et carrées en fonction des paramètres a été réalisée afin de déterminer le type de section le plus résistant.

4.1 Comportement des poteaux en béton armé sous influence du feu**4.1.1 Introduction :**

Le comportement du béton soumis aux effets d'une forte sollicitation thermique, issue d'un feu, met en jeu des phénomènes physiques complexes, tel que l'influence de l'eau, écaillage du béton... Notre analyse portera essentiellement sur le comportement thermomécanique et la détermination des moments ultimes.

Les méthodes simplifiées qui existaient dans les règlements de calcul français et qui distinguaient le cas d'une flexion composée avec compression de celui d'une compression centrée ont disparu de l'Eurocode 2. A la place, l'annexe B.3 de l'Eurocode 2 partie 1-2 propose d'évaluer le risque de flambement des poteaux en conditions d'incendie par la méthode fondée sur l'estimation de la courbure.

En France cette annexe prend un statut normatif (clause NA.3).

4.1.2 Principe de la méthode :

Cette méthode, valable uniquement pour l'évaluation de la résistance de poteaux dans des structures contreventées et consiste en :

- Calculer le champ de température dans la section au temps demandé.

Le champ de température dans la section est déterminé selon la théorie de conductivité de Fourier [35], selon le principe suivant :

| | | |
|---|---|---|
| Variation de la quantité de chaleur contenue dans la tranche | = | Somme nette des flux conduits (exprimés selon la loi de Fourier) + Termes de sources éventuels (réaction exothermique, ou condensation) - Termes de puits éventuels (réaction endothermique ou vaporisation) |
|---|---|---|

Figure 4.1 : les grandes lignes du modèle d'échange thermique

Déterminer le diagramme de moment-courbure figure [4.2] pour l'effort normal agissant en situation d'incendie $N_{Ed,fi}$, en utilisant le diagramme contrainte-déformation pertinent de la section 3 de l'Eurocode 2 partie 1-2 pour les armatures et le béton. La structure est discrétisée en plusieurs tranches, l'évaluation du moment et de la courbure correspondante pour une tranche donnée permet en utilisant le principe de sommation des couches de déterminer la courbe $M_{Rd,fi}$ et $1/r$. Lors de la sollicitation axiale ou excentrée en situation du feu.

- La résolution dans le domaine non linéaire est réalisée par la méthode de Newton-Raphson [36]. Ceci permet de déterminer le moment résistant ultime $M_{Rd,fi}$ avec l'effort normal concomitant $N_{Ed,fi}$ et le moment nominal du second ordre $M_{2,fi}$ pour la courbure correspondant au moment résistant ultime.

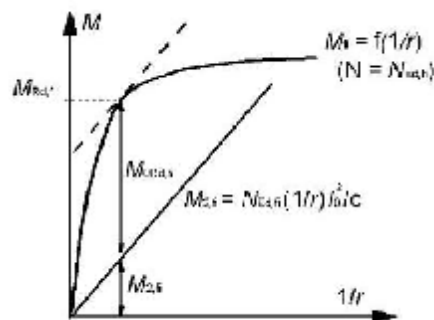


Figure 4.2 : relation effort axial et moment de courbure

- Déterminer le moment résistant ultime du premier ordre $M_{0Rd,fi}$ pour l'exposition au feu spécifiée et $N_{Ed,fi}$ comme la différence entre le moment résistant ultime $M_{Rd,fi}$ et le moment nominal du second ordre $M_{2,fi}$ ainsi calculé .
- Comparer le moment résistant ultime du premier ordre $M_{0Rd,fi}$ avec le moment fléchissant du premier ordre de calcul en conditions d'incendie $M_{0Ed,fi}$ (excentricité additionnelle due aux imperfections comprise).

L'expression du moment nominal du second ordre $M_{2,fi}$, sur la figure [4.2] fait apparaître le facteur c , fonction de la distribution de courbure :

- $c = 8$ si le moment total est environ constant.
- $c = \pi^2$ si le moment total est sinusoïdal (ou parabolique), on adopte en général cette valeur dans le cas d'une section constante.

4.1.3 Outil de calcul « CIM'Feu EC2 » :

Pour l'élaboration de nos calculs nous avons utilisé pour les poteaux en béton armé le Logiciel **CIM'Feu EC2**, Dont les principes de calcul sont basés sur l'évaluation du risque de flambement des poteaux en conditions d'incendie par la méthode fondée sur l'estimation de la courbure [10].

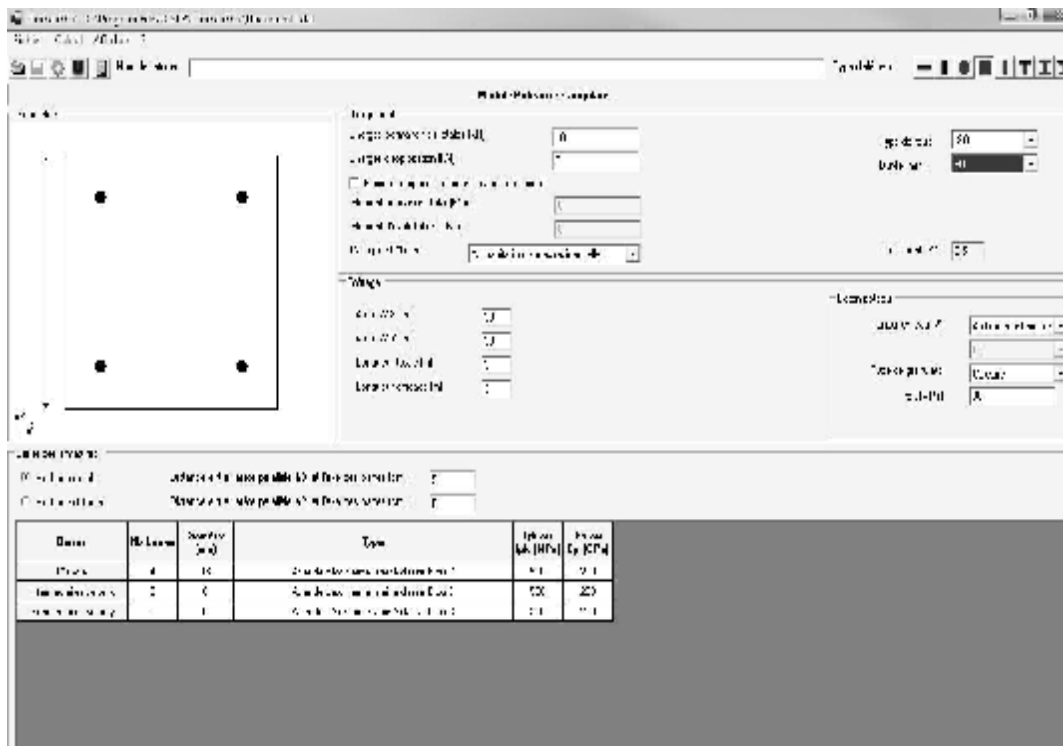


Figure 4.3 : Interface du logiciel CIM'Feu

4.1.4 Domaine de validité du logiciel :

- Cim'Feu traite les poteaux dont les côtés ou le rayon, selon que le poteau est rectangulaire ou circulaire, varient entre 8 et 120 cm, par pas de 1 cm.
- L'épaisseur des murs peut varier entre 8 et 40 cm par pas de 1 cm.
- Deux modes de saisie des armatures sont proposés pour les poteaux rectangulaires. Dans les deux cas, la section est doublement symétrique.
- Dans le cas des poteaux rectangulaires, le moment fléchissant est considéré autour de l'axe de forte inertie (X). L'utilisateur devra veiller à ce que la géométrie de la section qu'il aura déclarée soit cohérente avec cela.

4.1.5 Hypothèse de calcul :

Le logiciel **CIM'Feu EC2** développé par CIM'béton et CSTB suit la première méthode de vérification consistant en une analyse par éléments de structure, réputée utilisable de manière équivalente aux deux autres (une partie de la structure ; structure globale) sur le plan de la sécurité structurale vis-à-vis de l'incendie, moyennant les hypothèses suivantes :

- les conditions d'appuis et les conditions aux limites des éléments applicables à l'origine de l'incendie sont supposées inchangées pendant toute la durée d'exposition au feu.
- les effets des déformations thermiques dues aux gradients de thermiques sur la section droite sont à prendre en compte. Les effets des dilatations thermiques axiales ou dans le plan peuvent être négligées.

Il est précisé que les valeurs tabulées et les méthodes de calcul simplifiées ou avancées conviennent pour vérifier les éléments dans des conditions d'incendie.

Le logiciel CIM'Feu EC2 repose sur des méthodes de calcul avancées dont les conditions d'emploi sont décrites au chapitre 4.3 de l'Eurocode 2 partie 1-2[10]. Le traitement proposé met en œuvre :

- pour le calcul des températures une démarche de calcul numérique fondée sur les principes et hypothèses connus de la théorie des transferts thermiques et considérant les actions pertinentes spécifiées dans l'Eurocode 1 partie 1-2 et les variations des propriétés thermiques des matériaux en fonction de la température ;
- pour le calcul mécanique, une démarche de calcul numérique fondée sur les principes et hypothèses connus de la théorie de la mécanique des structures et considérant les

modifications des propriétés mécaniques des matériaux en fonction de la température et les effets des déformations d'origine thermique.

- Les structures considérées sont supposées avoir été préalablement dimensionnées et vérifiées à froid selon les règles Eurocode 2-1-1 / AN FRANCE.

4.1.6 Equations du modèle utilisées dans CIM'Feu EC2 :

En général, des solutions analytiques basées sur la forme locale du problème (équations aux dérivées partielles avec conditions aux limites) n'existent pas. Donc la résolution est faite numériquement. La plus part des modèles numériques pour l'analyse thermique des éléments soumis au feu sont réalisés par :

- méthodes des différences finies
- Méthodes des éléments finis

La méthode de résolution numérique est basée sur les différences finies est utilisé par le Logiciel CIM'Feu. L'utilisation de l'équation de fourrier discrétisée permet d'évaluer l'accumulation de la chaleur dans la tranche considérée.

4.1.7 Etude paramétrique sur des poteaux carrés et circulaires :

Dans cette étude nous avons analysé 34 poteaux de ce type sollicité à la compression simple avec la variation de différents paramètres influençant la résistance au feu tel que la géométrie ; le chargement ; le taux d'armature ; l'enrobage ; la longueur de flambement ; la résistance caractéristique du béton ; la limite élastique des armatures ainsi que le type de granulat et la teneur en eaux.

Tableau 4.1 : Caractéristiques géométriques et mécaniques du poteau carré

| Poteaux | B [mm] | N [KN] | As [nbφ16] | Er [mm] | Lf [mm] | Yc [Mpa] | Ys [Mpa] | % teneur en eau | granulat |
|---------|-----------|-----------|---------------|------------|------------|-------------|-------------|-----------------------|----------|
| PC01 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC02 | 350 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC03 | 400 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC04 | 300 | 10 | 8φ20 | 30 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC05 | 300 | 10 | 8φ25 | 30 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC06 | 300 | 10 | 8φ16 | 40 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC07 | 300 | 10 | 8φ16 | 50 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC08 | 300 | 100 | 8φ16 | 30 | 2 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC09 | 300 | 100 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC10 | 300 | 100 | 8φ16 | 30 | 4 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC11 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 20 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC12 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 25 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC13 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 300 | 0.5 | Calcaire |
| PC14 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 400 | 0.5 | Calcaire |
| PC15 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 500 | 1.5 | Calcaire |
| PC16 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 500 | 3 | Calcaire |
| PC17 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Silice |

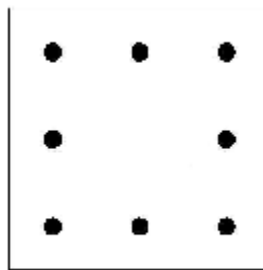


Figure 4.4 : poteau carré en béton armé

Tableau 4.2 : Caractéristiques géométriques et mécaniques du poteau circulaire

| Poteaux | D [mm] | N [KN] | As [nbφ16] | Er [mm] | Lf [mm] | Yc [Mpa] | Ys [Mpa] | % teneur en eau | granulat |
|---------|-----------|-----------|---------------|------------|------------|-------------|-------------|-----------------------|----------|
| PC01 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC02 | 350 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC03 | 400 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC04 | 300 | 10 | 8φ20 | 30 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC05 | 300 | 10 | 8φ25 | 30 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC06 | 300 | 10 | 8φ16 | 40 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC07 | 300 | 10 | 8φ16 | 50 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC08 | 300 | 100 | 8φ16 | 30 | 2 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC09 | 300 | 100 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC10 | 300 | 100 | 8φ16 | 30 | 4 | 30 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC11 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 20 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC12 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 25 | 500 | 0.5 | Calcaire |
| PC13 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 300 | 0.5 | Calcaire |
| PC14 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 400 | 0.5 | Calcaire |
| PC15 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 500 | 1.5 | Calcaire |
| PC16 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 500 | 3 | Calcaire |
| PC17 | 300 | 10 | 8φ16 | 30 | 3 | 30 | 500 | 0.5 | Silice |

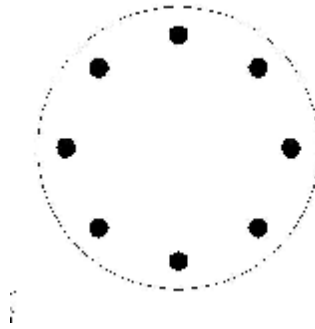


Figure 4.5 : poteau circulaire en béton armé

Nous réalisons une comparaison entre le comportement des poteaux carré et celui des poteaux circulaire on le mettant dans des conditions similaire pour avoir une idée de quelle type de section est le plus fiable.

➤ **Effet de la géométrie :**

Nous avons étudié l'influence de la largeur de section « B » des poteaux carré ainsi que le diamètre « D » de la section circulaire sur la résistance au feu représenté par le moment ultime résistant $M_{Rd, fi}$.

Les résultats de calcul sont regroupés dans les tableaux [4.3] et [4.4]

Tableau 4.3 : résistance au feu des poteaux en fonction de la largeur de la section

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | | |
|-----------------------------|------------------------------|---------|---------|
| | B=300mm | B=350mm | B=400mm |
| 30 | 99.25 | 119.11 | 140.51 |
| 60 | 69.87 | 85.17 | 99.98 |
| 90 | 44.26 | 55.37 | 66.55 |
| 120 | 27.41 | 35.95 | 44.15 |

Tableau 4.4 : résistance au feu des poteaux en fonction du diamètre de la section

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | | |
|-----------------------------|------------------------------|---------|---------|
| | D=300mm | D=350mm | D=400mm |
| 30 | 62.45 | 69.99 | 102.29 |
| 60 | 17.52 | 20.20 | 35.52 |
| 90 | 7.85 | 9.43 | 14.70 |
| 120 | 4.62 | 6.35 | 9.29 |

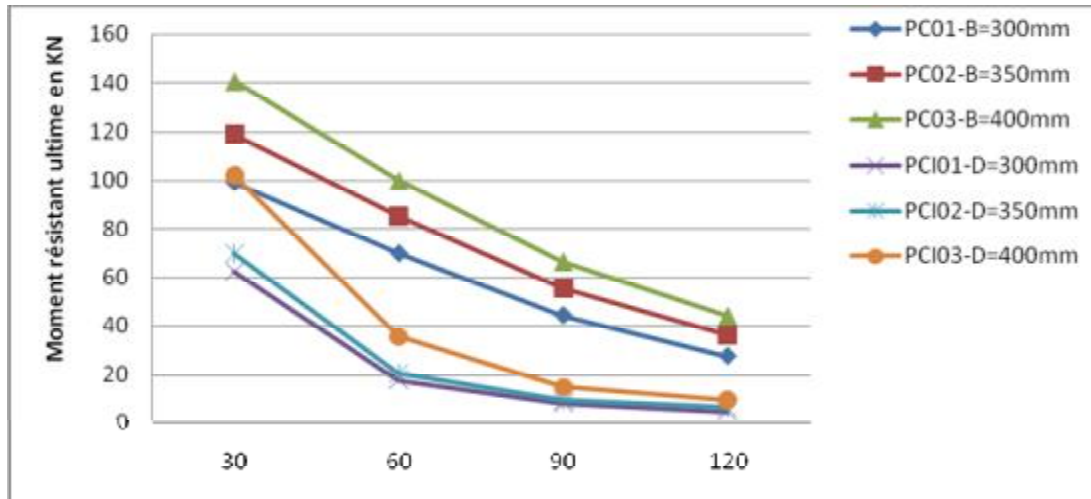


Figure 4.6 : Influence de la géométrie sur la résistance au feu

La figure 4.6 montre l'influence de l'augmentation de la largeur dans la section carrée et du diamètre dans la section circulaire sur la résistance au feu en fonction du temps de résistance au feu normalisé (R), nous notons que la plus grande augmentation atteint jusqu'à 44.21% en passant du PCI-02 d=350mm au PCI-3 d= 400mm après 60 min d'exposition au feu ; ainsi que nous constatons une convergence après 120 min ou la variation de la géométrie devient moins conséquente .

Nous remarquons aussi que la section carrée est plus résistante que la section circulaire sachant qu'ils ont pratiquement la même section utile ou la plus grande différence est de 79.53% entre les deux sections PC-03 b=400mm au PCI-03 d= 400mm après 90 min d'exposition au feu.

➤ **Effet du taux d'armature :**

Pour caractériser l'effet des armatures dans la résistance au feu ; les tableaux [4.5] et [4.6] montre une comparaison entre différents poteaux carrés et circulaires avec des variations de la section d'armature.

Tableau 4.5 : résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la section d'armature

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | | |
|-----------------------------|------------------------------|--------|--------|
| | 8φ16 | 8φ20 | 8φ25 |
| 30 | 99.25 | 151.9 | 228.28 |
| 60 | 69.87 | 106.13 | 154.65 |
| 90 | 44.26 | 67.09 | 98.91 |
| 120 | 27.41 | 41.48 | 62.18 |

Tableau 4.6 : résistance au feu des poteaux circulaires en fonction de la section d'armature

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | | |
|-----------------------------|------------------------------|-------|--------|
| | 8φ16 | 8φ20 | 8φ25 |
| 30 | 62.45 | 90.34 | 133.35 |
| 60 | 17.52 | 25.87 | 37.4 |
| 90 | 7.85 | 11.57 | 16.69 |
| 120 | 4.62 | 6.67 | 9.93 |

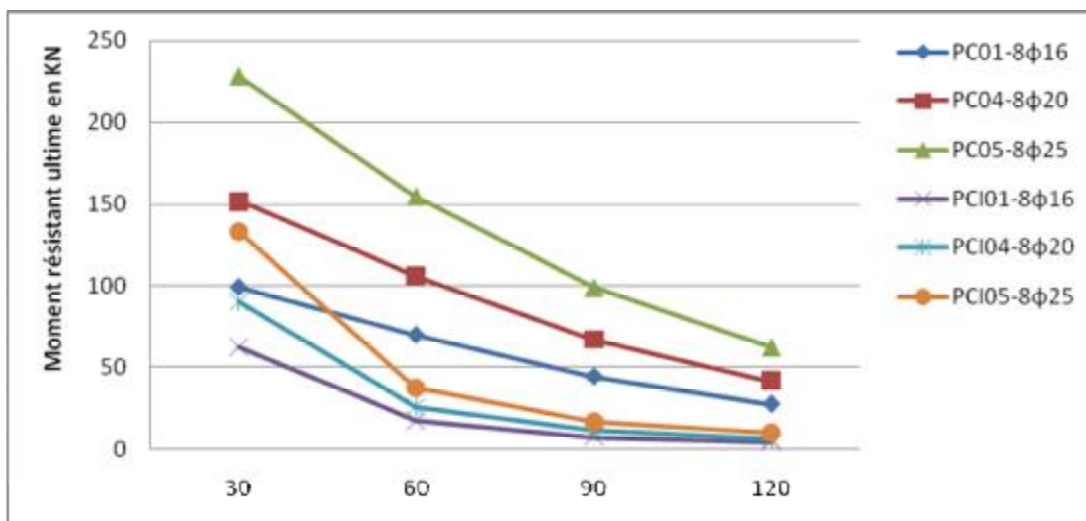


Figure 4.7 : Influence du taux d'armature sur la résistance au feu

La figure 4.7 nous éclairât sur l'augmentation de la section d'armature qui nous donne des déférences importantes de résistance au feu qui atteint les 50.11% dans la section carré mais la variation est cohérente par contre dans la section circulaire ou la différence est très grande après 30 min est touche en maximum 39.13% mais devient 15.69% après 120 min d'exposition au feu.

Ces résultats nous permettent donc de prendre en considération la section d'armature pour augmenter la résistance au feu et c'est ce que préconisent plusieurs études.

➤ **Effet de l'enrobage :**

Dans le but d'illustrer l'influence de l'enrobage sur la résistance au feu nous n'avons proposé quelques valeurs d'enrobage (E_r) ; les résultats sont représentés dans les tableaux [4.7] et [4.8].

Tableau 4.7 : résistance au feu des poteaux carrés en fonction de l'enrobage

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | | |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | $E_r = 30 \text{ mm}$ | $E_r = 40 \text{ mm}$ | $E_r = 50 \text{ mm}$ |
| 30 | 99.25 | 93.53 | 88.47 |
| 60 | 69.87 | 82.69 | 85.95 |
| 90 | 44.26 | 61.49 | 72.49 |
| 120 | 27.41 | 42.69 | 55.8 |

Tableau 4.8 : résistance au feu des poteaux circulaires en fonction de l'enrobage

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | | |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | $E_r = 30 \text{ mm}$ | $E_r = 40 \text{ mm}$ | $E_r = 50 \text{ mm}$ |
| 30 | 62.45 | 68.79 | 69.69 |
| 60 | 17.52 | 23.86 | 29.71 |
| 90 | 7.85 | 8.99 | 11.17 |
| 120 | 4.62 | 5.68 | 5.68 |

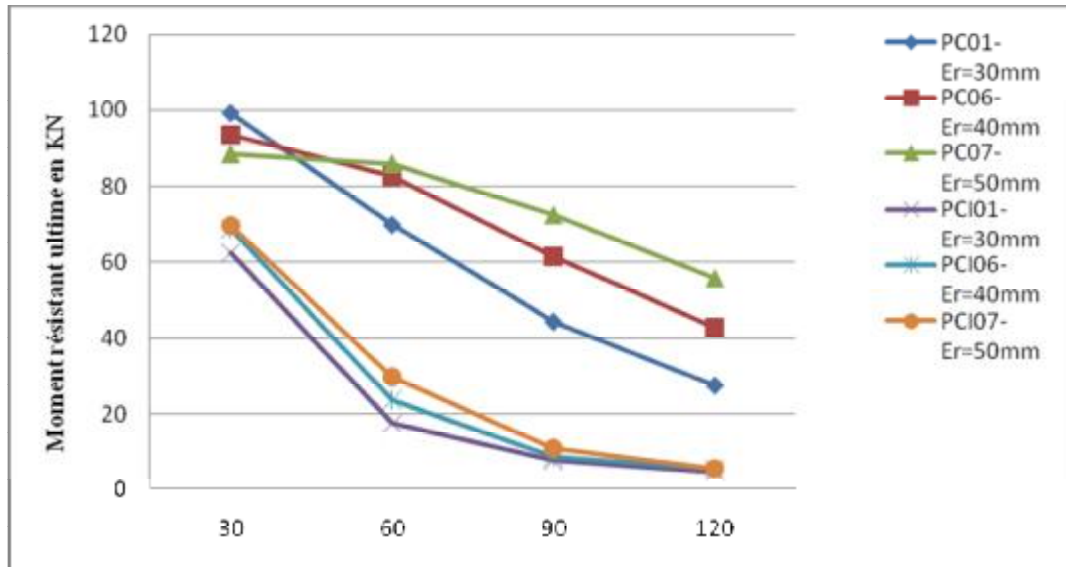


Figure 4.8 : Influence de l'enrobage sur la résistance au feu

La figure 4.8 montre que durant les 30 premières minutes l'augmentation de l'enrobage a un effet négatif sur la résistance au feu. Nous n'avons constaté une diminution de l'ordre de 2.21% en passant du poteau PCI-06 ($E_r=40\text{mm}$) au PCI-07 ($E_r=50\text{mm}$) ; mais après 30 min d'exposition au feu l'augmentation de l'enrobage affecte positivement la résistance au feu et qui atteint les 32.39% on passant des poteaux PC-06 ($E_r=40\text{mm}$) au PC-07 ($E_r=50\text{mm}$) après 120 min d'exposition.

➤ **Effet de la longueur de flambement :**

La longueur de flambement est un élément essentiel de la résistance d'un poteau ; l'influence de la longueur de flambement en condition d'incendie a été analysée en variant cette valeur ; nous présentons les résultats dans les tableaux [4.9] et [4.10].

Tableau 4.9 : résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la longueur de flambement

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | | |
|-----------------------------|------------------------------|---------|--------|
| | Lf= 2 m | Lf= 3 m | Lf=4 m |
| 30 | 107.32 | 106.02 | 104.34 |
| 60 | 77.41 | 73.88 | 71.12 |
| 90 | 50.99 | 48.04 | 44.91 |

Tableau 4.10 : résistance au feu des poteaux circulaires en fonction de la longueur de flambement

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | | |
|-----------------------------|------------------------------|--------|---------|
| | Lf= 2 m | Lf= 3m | Lf= 4 m |
| 30 | 66.27 | 62.5 | 57.12 |
| 60 | 21.73 | 17.43 | 15.68 |
| 90 | 12.07 | 9.53 | 7.89 |

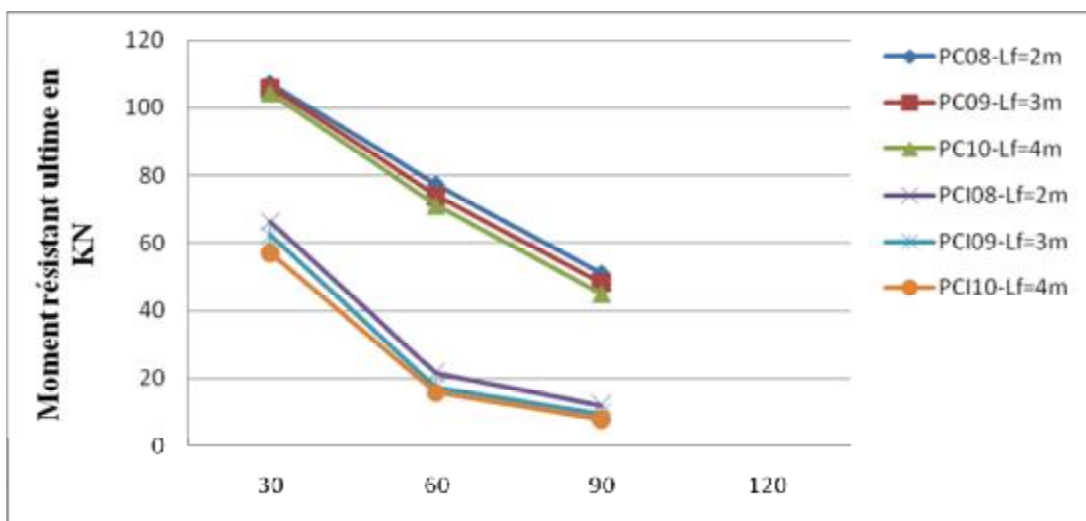


Figure 4.9 : Influence de la longueur de flambement sur la résistance au feu

L'augmentation de la longueur de flambement entraine une diminution du moment ultime, nous remarquons que le poteau carré a un meilleur comportement que le poteau circulaire.

➤ **Effet de la résistance caractéristique du béton :**

Lors de la variation de la résistance caractéristique du béton utilisé dans ces poteaux les résultats présentés dans les tableaux [4.11] et [4.12] sont constaté.

Tableau 4.11 : résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la résistance caractéristique du béton

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | | |
|-----------------------------|------------------------------|--------|--------|
| | Yc= 20 | Yc= 30 | Yc= 40 |
| 30 | 97.68 | 99.25 | 100.01 |
| 60 | 68.43 | 69.87 | 70.56 |
| 90 | 43.3 | 44.26 | 44.8 |
| 120 | 26.83 | 27.41 | 27.76 |

Tableau 4.12 : résistance au feu des poteaux circulaires en fonction de la résistance caractéristique du béton

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | | |
|-----------------------------|------------------------------|--------|--------|
| | Yc= 20 | Yc= 30 | Yc= 40 |
| 30 | 58.31 | 62.45 | 65.5 |
| 60 | 16.71 | 17.52 | 17.99 |
| 90 | 7.19 | 7.85 | 7.94 |
| 120 | 4.27 | 4.62 | 4.95 |

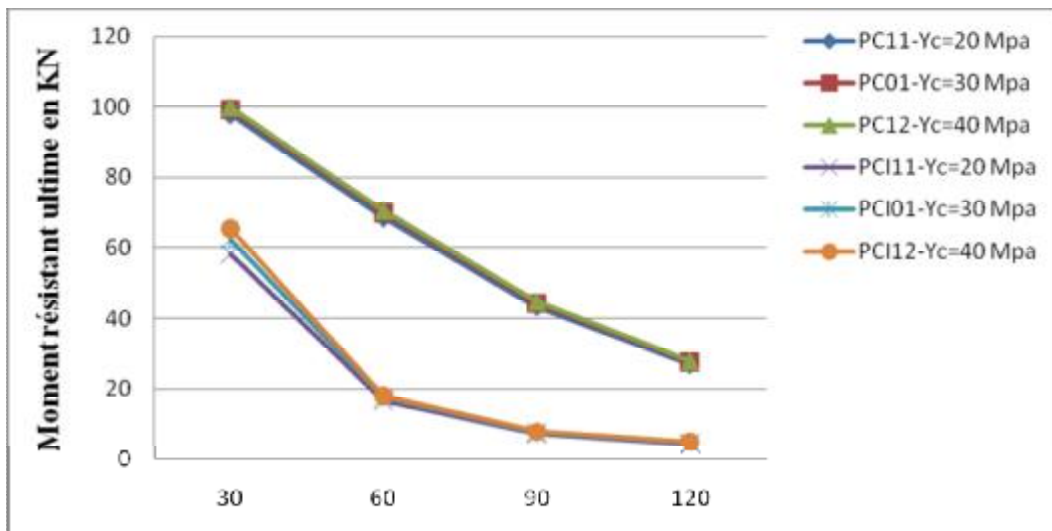


Figure 4.10 : Influence de la résistance caractéristique du béton sur la résistance au feu

Cette figure indique que pendant les 30 premières minutes d'exposition au feu l'augmentation de la résistance caractéristique du béton a une influence flagrante notamment dans la section carré ou nous constatons une augmentation qui atteint les 11.25% en passant du poteau PC-01 ($Y_c = 30$ Mpa) au PC-12 ($Y_c = 40$ Mpa), mais après 30 minutes les courbe se converge que signifie que l'augmentation de la résistance devienne sans influence.

➤ **Effet de la limite élastique des armatures:**

Les tableaux [4.13] et [4.14] résume les résultats de calcul de l'effet de la variation de la nuance des armatures sur les poteaux étudiés.

Tableau 4.13 : résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la nuance des armatures

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | | |
|-----------------------------|------------------------------|-------------|-------------|
| | $Y_s = 300$ | $Y_s = 400$ | $Y_s = 500$ |
| 30 | 60.7 | 80.07 | 99.25 |
| 60 | 43 | 56.52 | 69.87 |
| 90 | 27.44 | 35.9 | 44.26 |
| 120 | 17.06 | 22.27 | 27.41 |

Tableau 4.14 : résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la nuance des armatures

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | | |
|-----------------------------|------------------------------|-------------|-------------|
| | $Y_s = 300$ | $Y_s = 400$ | $Y_s = 500$ |
| 30 | 40.68 | 52.02 | 62.45 |
| 60 | 11.17 | 14.37 | 17.52 |
| 90 | 5.11 | 6.49 | 7.85 |
| 120 | 3.11 | 3.87 | 4.62 |

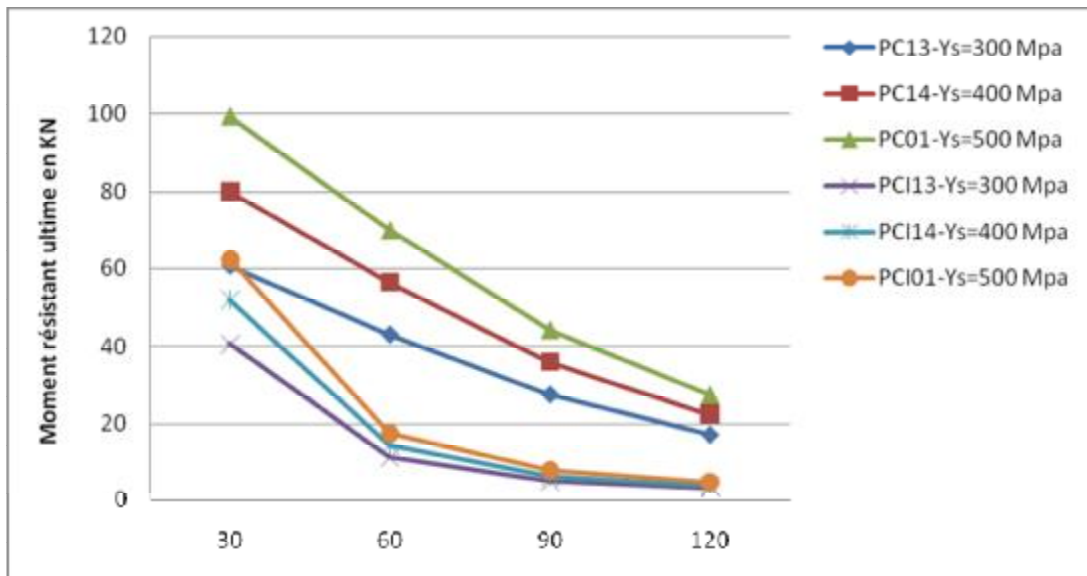


Figure 4.11 : Influence de la nuance des armatures sur la résistance au feu

La figure 4.11 indique que l'effet de la nuance d'aciers des armatures est considérable notamment dans les 30 premières minutes d'exposition au feu où la différence de résistance atteint les 23.40% en passant du poteau PC-13 ($Y_s = 300$ Mpa) au PC-14 ($Y_s = 400$ Mpa) et de la même façon pour les poteaux carrés, mais après 30 minutes nous remarquons que les courbes convergent ce qui signifie une diminution de l'effet de la nuance des armatures.

➤ **Effet de la teneur en eau :**

Dans le but d'évaluer l'effet de la teneur en eau sur la résistance au feu nous n'avons proposé différentes valeurs de teneur en eau et les tableaux [4.15] et [4.16] résumés les résultats.

Tableau 4.15 : résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la teneur en eau

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | | |
|-----------------------------|------------------------------|-------|-------|
| | 0.5% | 1.5% | 3% |
| 30 | 99.25 | 99.3 | 99.37 |
| 60 | 69.87 | 71.02 | 72.13 |
| 90 | 44.26 | 45.97 | 47.96 |
| 120 | 27.41 | 28.59 | 30.48 |

Tableau 4.16 : résistance au feu des poteaux circulaires en fonction de la teneur en eau

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | | |
|-----------------------------|------------------------------|---------|-------|
| | W=0.50% | W=1.50% | W=3% |
| 30 | 62.45 | 63.95 | 65.88 |
| 60 | 17.52 | 18.03 | 18.73 |
| 90 | 7.85 | 7.97 | 8.1 |
| 120 | 4.62 | 4.69 | 4.74 |

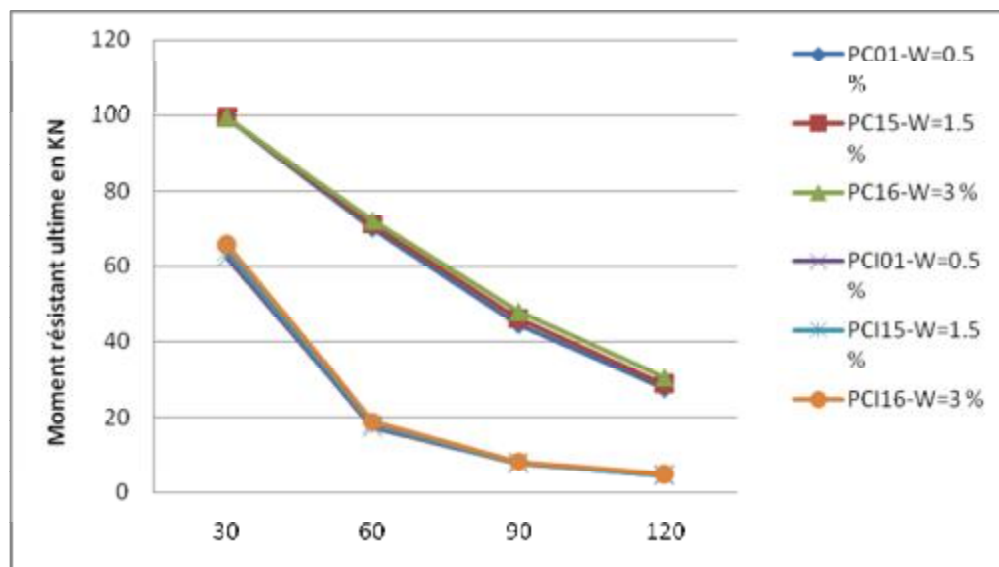


Figure 4.12 : Influence de la teneur en eau sur la résistance au feu

La figure 4.12 montre que l'effet de l'augmentation de la teneur en eau n'a pas une grande influence sur la résistance au feu notamment dans les 30 premières minutes mais après 30 minutes jusqu'à 120 l'effet devient de plus en plus clair ou le pourcentage atteint les 4.89 % en passant du poteau PCI-15 (W=1.5 %) au PCI-16(W=3 %).

➤ **Effet de type de granulats:**

Les tableaux [4.17] et [4.18] résume les résultats obtenus lors de l'utilisation du béton siliceux à la place du béton en calcaire et son impacte sur la résistance au feu.

Tableau 4.17 : résistance au feu des poteaux carrés en fonction de type de granulats

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | |
|-----------------------------|------------------------------|--------|
| | calcaire | silice |
| 30 | 99.25 | 98.61 |
| 60 | 69.87 | 68.91 |
| 90 | 44.26 | 43.41 |
| 120 | 27.41 | 26.77 |

Tableau 4.18 : résistance au feu des poteaux circulaires en fonction de type de granulats

| résistance au feu normalisé | Moment résistant ultime KN.m | |
|-----------------------------|------------------------------|--------|
| | calcaire | silice |
| 30 | 62.45 | 60.1 |
| 60 | 17.52 | 16.62 |
| 90 | 7.85 | 7.04 |
| 120 | 4.62 | 4.29 |

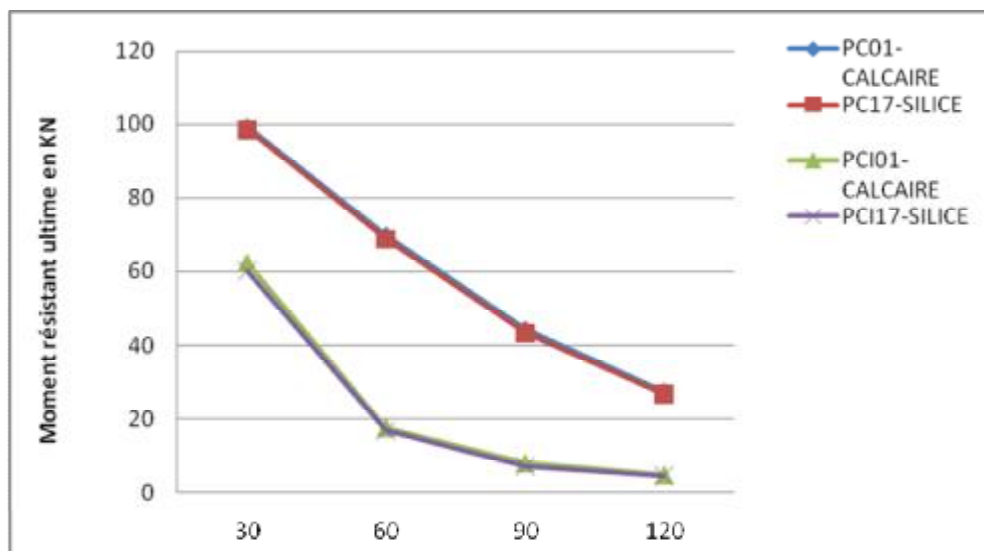


Figure 4.13 : Influence de type de granulats sur la résistance au feu

La figure 4.13 montre que l'utilisation du béton siliceux provoque une diminution de la résistance au feu qui atteint les 8.41 % dans les poteaux circulaire en passant de PCI-1 ou on a utilisé un béton à base du calcaire jusqu'à PCI-17 ou on a utilisé un béton siliceux.

4.2 Comportement des poteaux creux remplis de béton sous influence du feu

4.2.1 Introduction :

L'utilisation des poteaux mixtes avec profil creux rempli de béton s'est développée de façon régulière ces dernières années grâce aux travaux de recherche réalisée dans ce domaine, mais aussi grâce aux différents avantages que procure ce type de structure vis-à-vis aux structures en acier.

La figure 4.14 présente des différents exemples de section transversale de ce type de poteaux :

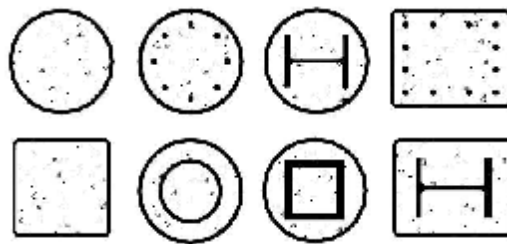


Figure 4.14 : différentes sections de poteaux creux remplis de béton

Le comportement des poteaux mixtes avec profil creux rempli de béton est différent que celui des poteaux non remplis. En effet le poteau classique dépend uniquement du degré d'utilisation (rapport entre la charge appliquée et la capacité portante du poteau dans les conditions de température ambiante) et de dimensions de la section transversale (habituelle représentées par le facteur de massivité). Ce qui conduit généralement à une résistance au feu assez limitée à 30 minutes. Dans le cas des profils creux remplis de béton, le remplissage de béton ne sert pas uniquement à augmenter la capacité portante et la rigidité du profil, mais il augmente également la résistance à l'incendie du poteau. Le processus de distribution des contraintes s'effectue depuis le tube d'acier chaud vers le noyau de béton assez froid. Ceci implique une élévation assez lente des armatures qui ne perdent pas leur résistance par rapport au tube d'acier directement exposé au feu et dont la perte de résistance est beaucoup plus rapide. Ainsi le béton de remplissage augmente fortement la résistance à l'incendie du poteau fonction du pourcentage d'armature utilisé.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser différents paramètres ainsi que leur influence sur le comportement mécanique des poteaux creux remplis de béton. L'effet géométrique de la section transversale est considéré pour une section carrée et circulaire. La variation de

l'épaisseur de la paroi est analysée dans un deuxième temps pour les deux sections transversales. L'influence du taux d'armature est aussi réalisée. L'incidence sur la résistance au flambement sous l'effet d'un incendie $N_{f,red}$ est aussi analysée en fonction de la longueur de flambement, de la résistance caractéristique du béton, des nuances d'acier de construction et d'armatures.

4.2.2 Description du Logiciel POTFIRE :

Le logiciel **POTFIRE** est développé par le CTICM à partir du modèle mis au point en 1992 par COMETUBE. Il est fondé sur les règles de l'annexe G de l'ENV 1994 – 1.2 [] POTFIRE permet soit, d'évaluer la durée de résistance au feu des poteaux creux remplis de béton non protégés soit, d'évaluer leur charge ultime (charge de ruine) après une certaine durée d'échauffement selon l'incendie conventionnel (feu ISO). Les sections considérées peuvent être circulaires, carrées et rectangulaires figure 4.14.

➤ **Domaine de validité du Logiciel POTFIRE :**

Tableau 4.19 : Domaine d'application du Logiciel POTFIRE

| Paramètres d'analyse | Limites de variations |
|-----------------------------|-----------------------|
| Diamètre ou coté | 140-400 |
| Pourcentage d'armature | 0% -5% |
| Longueur de flambement | 0-4.5 |
| Classe du béton | C 20/25-C40/50 |
| Degrés de résistance au feu | 0-120 |

➤ **Approche théorique de base utilisée dans le Logiciel POTFIRE :**

La méthode utilisée par **POTFIRE** est basée sur la méthode française "DTU "Calcul du comportement au feu des poteaux mixtes (acier + béton)", incluse également dans l'annexe G de l'Eurocode ENV 1994-1.2. C'est une méthode par sommation qui utilise les équations suivantes pour déterminer le champ de température et la résistance résiduelle de profils creux mixtes soumis à l'incendie conventionnel.

➤ **Propriétés thermiques des matériaux pris en compte dans le logiciel:**

• **Propriétés thermiques de l'acier :**

✓ Conductivité thermique (W/m°K) :

$$\lambda_a = -0,0329\theta + 54,7 \quad \text{Pour } 0^\circ\text{C} \leq \theta \leq 750^\circ\text{C}$$

$$\lambda_a = 30. \quad \text{Pour } 750^\circ\text{C} \leq \theta$$

(4.1)

✓ Chaleur spécifique (J/kg°K) :

$$C_a = 473 + 20,1 \times 10^{-3} \theta + 38,1 \times 10^{-6} \theta^2$$

(4.2)

• **Propriétés thermiques du béton :**

✓ Conductivité thermique (W/m°K) :

$$\lambda_b = 1,628 - 0,14 \left(\frac{\theta}{100} \right) \quad \text{Pour } 0^\circ\text{C} \leq \theta \leq 500^\circ\text{C}$$

$$\lambda_b = 0,928 - 0,07 \left(\frac{\theta}{100} \right) \quad \text{Pour } 500^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1000^\circ\text{C}$$

(4.3)

✓ Chaleur spécifique (J/kg°K) :

$$C_b = 921,1$$

➤ **Propriétés mécaniques des matériaux pris en compte dans le logiciel:**

• **Propriétés mécaniques de l'acier**

:

✓

Limite d'élasticité du profil
métallique :

$$\frac{f_{ay, \theta}}{f_{ay, 20^\circ\text{C}}} = 1,0 + \theta / (900 \log_e(\theta / 1750)) \quad \text{Pour } 0^\circ\text{C} < \theta \leq 600^\circ\text{C}$$

$$\frac{f_{ay, \theta}}{f_{ay, 20^\circ\text{C}}} = (340 - 0,34\theta) / (\theta - 240) \quad \text{Pour } 600^\circ\text{C} < \theta \leq 1000^\circ\text{C}$$

(4.4)

✓
métallique : Module d'Young du profil

$$\frac{E_{a,\theta}}{E_{a,20^\circ C}} = 1,0 + \theta / (2000 \log_e(\theta / 1100)) \quad \text{Pour } 0^\circ C < \theta \leq 600^\circ C$$

$$\frac{E_{a,\theta}}{E_{a,20^\circ C}} = (690 - 0,69\theta) / (\theta - 53,5) \quad \text{Pour } 600^\circ C < \theta \leq 1000^\circ C \quad (4.5)$$

✓
Limites d'élasticité du profil
métallique et module d'Young des aciers d'armature :

Tableau 4.20 : Limite d'élasticité du profil métallique et module d'Young des aciers d'armature

| Températures θ_s [°C] | 0 | 400 | 580 | 750 |
|--|---|-----|------|-----|
| $\frac{E_{s,\theta}}{E_{s,20^\circ C}}$ or $\frac{f_{sy,\theta}}{f_{sy,20^\circ C}}$ | 1 | 1 | 0,15 | 0 |

✓
Lois contrainte/déformation :

$$\frac{\sigma_{a,\theta}}{f_{ay,\theta}} = -0,06 + 1,416 \left[\frac{E_{a,\theta} \cdot \varepsilon_{a,\theta}}{f_{ay,\theta}} \right] - 0,651 \left[\frac{E_{a,\theta} \cdot \varepsilon_{a,\theta}}{f_{ay,\theta}} \right]^2 + 0,103 \left[\frac{E_{a,\theta} \cdot \varepsilon_{a,\theta}}{f_{ay,\theta}} \right]^3 \leq 1$$

$$\frac{E_{a,\theta,\sigma}}{E_{a,\theta}} = 1,416 - 1,302 \left[\frac{E_{a,\theta} \cdot \varepsilon_{a,\theta}}{f_{ay,\theta}} \right] + 0,309 \left[\frac{E_{a,\theta} \cdot \varepsilon_{a,\theta}}{f_{ay,\theta}} \right]^2 \quad \left(\frac{E_{a,\theta,\sigma}}{E_{a,\theta}} = 0 \quad \text{si } \frac{\sigma_{a,\theta}}{f_{ay,\theta}} = 1 \right) \quad (4.6)$$

• **Propriétés mécaniques du béton**

:

✓
Résistance à la compression :

$$\frac{f_{bc}(\theta)}{f_{bc}(20^\circ C)} = 1,0 \quad \text{Pour } 0^\circ C \leq \theta \leq 250^\circ C$$

$$\frac{f_{bc}(\theta)}{f_{bc}(20^\circ C)} = 1,3929 - 1,5714 \times 10^{-3} \theta \quad \text{Pour } 250^\circ C \leq \theta \leq 600^\circ C$$

$$\frac{f_{bc}(\theta)}{f_{bc}(20^{\circ}\text{C})} = 1,125 - 1,125 \times 10^{-3} \theta \quad \text{Pour } 600^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1000^{\circ}\text{C}$$

(4.7)

✓

Module tangent :

$$\frac{E_b(\theta)}{E_b(20^{\circ}\text{C})} = 1,0 \quad \text{Pour } 0^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 50^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{E_b(\theta)}{E_b(20^{\circ}\text{C})} = 1,1667 - 3,3333 \times 10^{-3} \theta \quad \text{Pour } 50^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 200^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{E_b(\theta)}{E_b(20^{\circ}\text{C})} = 0,85 - 1,75 \times 10^{-3} \theta \quad \text{Pour } 200^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 400^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{E_b(\theta)}{E_b(20^{\circ}\text{C})} = 0,35 - 5 \times 10^{-4} \theta \quad \text{Pour } 400^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 600^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{E_b(\theta)}{E_b(20^{\circ}\text{C})} = 0,05 \quad \text{Pour } 600^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1000^{\circ}\text{C}$$

(4.8)

➤ **Calcul de la charge de ruine, $N_{fi, Rd}$:**

La charge de ruine ($N_{fi, Rd}$) est calculée au moyen de la méthode de Guyaux-Janss [37]. Les calculs suivants sont ainsi effectués par POTFIRE.

$$N_{fi, cr} = \pi^2 \cdot [\Sigma(E_{a, \theta} \cdot I_a) + \Sigma(E_{c, \theta} \cdot I_c) + \Sigma(E_{s, \theta} \cdot I_s)] / l_{\theta}^2 \cdot \pi^2 [E_{a, \theta, \sigma} I_a + E_{c, \theta, \sigma} I_c + E_{s, \theta, \sigma} I_s] / l_{\theta}^2$$

$$N_{fi, pl, Rd} = \Sigma(A_a \cdot \sigma_{a, \theta}) / \gamma_{M, fi, a} + \Sigma(A_c \cdot \sigma_{c, \theta}) / \gamma_{M, fi, c}$$

$$+ \Sigma(A_s \cdot \sigma_{s, \theta}) / \gamma_{M, fi, s} + A_a \sigma_{a, \theta} / \gamma_{M, fi, a} + A_c \sigma_{c, \theta} / \gamma_{M, fi, c} + A_s \sigma_{s, \theta} / \gamma_{M, fi, s}$$

(4.9)

Où :

$N_{fi, cr}$: Charge critique de flambement d'Euler,

$N_{fi, pl, Rd}$: Valeur de calcul de la résistance plastique en compression axiale de la section Complète,

l_{θ} : Longueur de flambement en situation d'incendie,

$E_{i, \theta, \sigma}$: Module tangent déduit de la relation contrainte-déformation pour le matériau i à

la température θ , et pour une contrainte $\sigma_{i,\theta}$,

I_i : Moment d'inertie de la section du matériau i par rapport à l'axe principal d'inertie y ou z de la section mixte,

A_i : Aire de la section transversale du matériau i ,

$\sigma_{i,\theta}$: Contrainte dans le matériau i à la température θ ,

$E_{i,\theta,\sigma}$, I_i et $A_i \sigma_{i,\theta}$ doivent être calculés en sommant toutes les aires élémentaires $dy.dz$ avec le champ de températures θ après une durée d'incendie t .

Les valeurs de $E_{i,t}$ et $\sigma_{i,t}$ à utiliser sont telles que :

$$\varepsilon_a = \varepsilon_c = \varepsilon_s = \varepsilon$$

Où ε : Déformation axiale du poteau et,

ε_i : Déformation axiale du matériau i de la section.

La charge de ruine $N_{f_i, Rd}$ obtenue lorsque $N_{f_i, cr} = N_{f_i, pl.Rd}$ ($= N_{f_i, Rd}$) (4.10)

4.2.3 Analyse paramétrique par POTFIRE :

Nous allons utiliser le Logiciel POTFIRE pour analyser l'influence de différents paramètres sur la résistance d'un élément de structure mixte sous l'influence d'un feu conventionnel.

34 poteaux ont été concrétisés. Les tableaux [4.21] et [4.22] montrent les différentes caractéristiques des poteaux étudiés

Tableau 4.21 : Caractéristiques géométriques et mécaniques du poteau carré

| Poteaux | B [mm] | e [cm] | ρ [%] | Er [mm] | Lf [mm] | Ya [Mpa] | Ys [Mpa] | Yc [Mpa] |
|---------|-----------|-----------|---------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| PC01 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PC02 | 350 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PC03 | 400 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PC04 | 300 | 1 | 2 | 30 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PC05 | 300 | 1.5 | 2 | 30 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PC06 | 300 | 0.6 | 3.1 | 30 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PC07 | 300 | 0.6 | 4.8 | 30 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PC08 | 300 | 0.6 | 2 | 40 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PC09 | 300 | 0.6 | 2 | 50 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PC10 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 2 | 355 | 500 | 30 |
| PC11 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 4 | 355 | 500 | 30 |
| PC12 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 235 | 500 | 30 |
| PC13 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 300 | 500 | 30 |
| PC14 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 355 | 300 | 30 |
| PC15 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 355 | 400 | 30 |
| PC16 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 355 | 500 | 25 |
| PC17 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 355 | 500 | 20 |

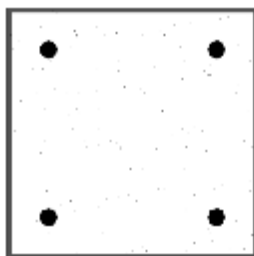


Figure 4.15 : poteau carré en profil creux rempli de béton

Tableau 4.22 : Caractéristiques géométriques et mécaniques du poteau circulaire

| Poteaux | D [mm] | e [cm] | ρ [%] | Er [mm] | Lf [mm] | Ya [Mpa] | Ys [Mpa] | Yc [Mpa] |
|---------|-----------|-----------|---------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| PCI01 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PCI02 | 350 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PCI03 | 400 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PCI04 | 300 | 1 | 2 | 30 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PCI05 | 300 | 1.5 | 2 | 30 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PCI06 | 300 | 0.6 | 3.1 | 30 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PCI07 | 300 | 0.6 | 4.8 | 30 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PCI08 | 300 | 0.6 | 2 | 40 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PCI09 | 300 | 0.6 | 2 | 50 | 3 | 355 | 500 | 30 |
| PCI10 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 2 | 355 | 500 | 30 |
| PCI11 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 4 | 355 | 500 | 30 |
| PCI12 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 235 | 500 | 30 |
| PCI13 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 300 | 500 | 30 |
| PCI14 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 355 | 300 | 30 |
| PCI15 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 355 | 400 | 30 |
| PCI16 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 355 | 500 | 25 |
| PCI17 | 300 | 0.6 | 2 | 30 | 3 | 355 | 500 | 20 |

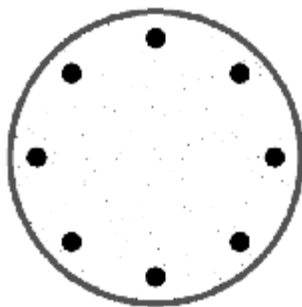


Figure 4.16 : poteau circulaire en profil creux rempli de béton

➤ Effet de la géométrie de la section :

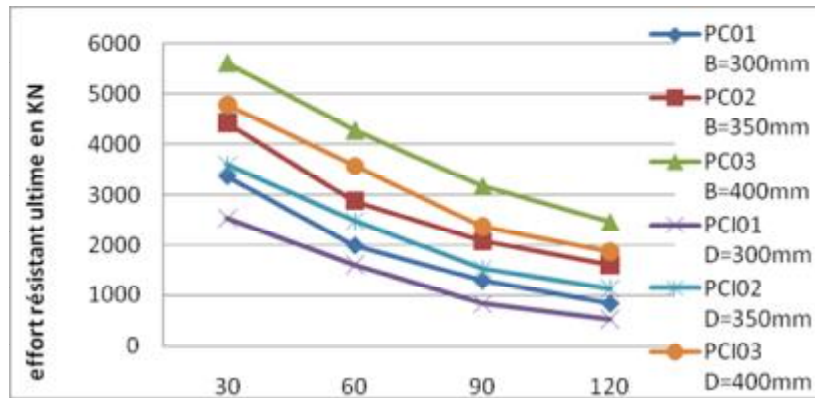


Figure 4.17 : Effet de la géométrie dans la section circulaire et carré

L'augmentation du diamètre pour la section circulaire ainsi que l'augmentation du côté dans la section carré donne des valeurs de résistance au feu considérablement importante et cela peut s'expliquer par le fait qu'une section plus large a plus d'aire de température basse et qui participe à la résistance.

➤ Effet de l'épaisseur de la paroi :

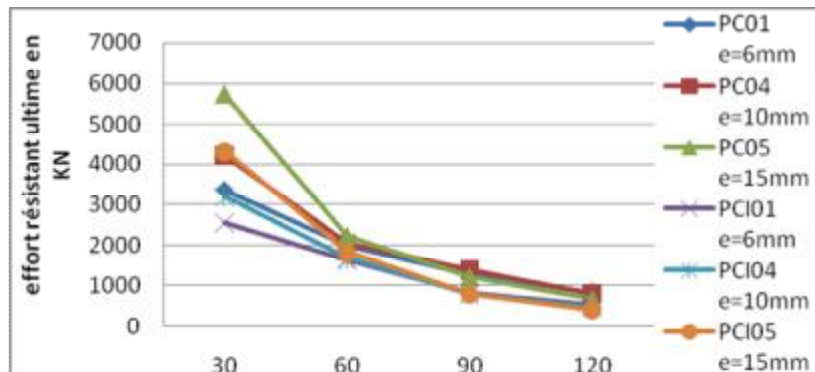


Figure 4.18 : Effet de l'épaisseur des parois dans la section circulaire et carré

La figure montre que l'augmentation de l'épaisseur des parois a une influence sur la résistance au feu dans les premières 30 minutes. par contre et après 60 minute d'exposition elle devient insignifiante et les courbes se convergent jusqu'à 120 minute.

➤ **Effet de l'enrobage :**

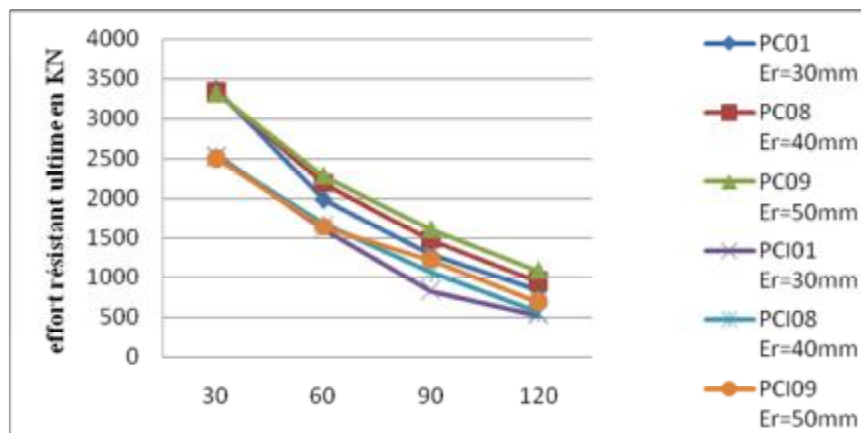


Figure 4.19 : Effet d'enrobage dans la section carré et circulaire

Lors de l'augmentation d'épaisseur des parois dans les deux sections la résistance a été augmentée notamment après 30 min, mais après 1 heure d'exposition au feu elle devient sans effet, car au début elle prend une partie de la résistance mais après 1 heure c'est le noyau béton qui va continuer seul à résister à la température élevée.

➤ **Effet du taux d'armature :**

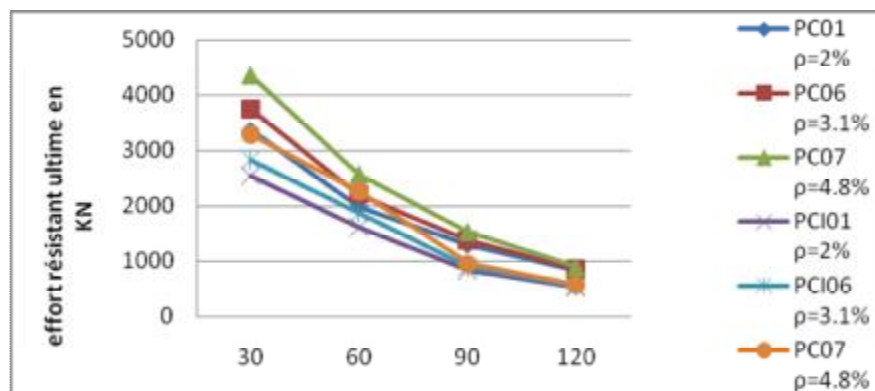
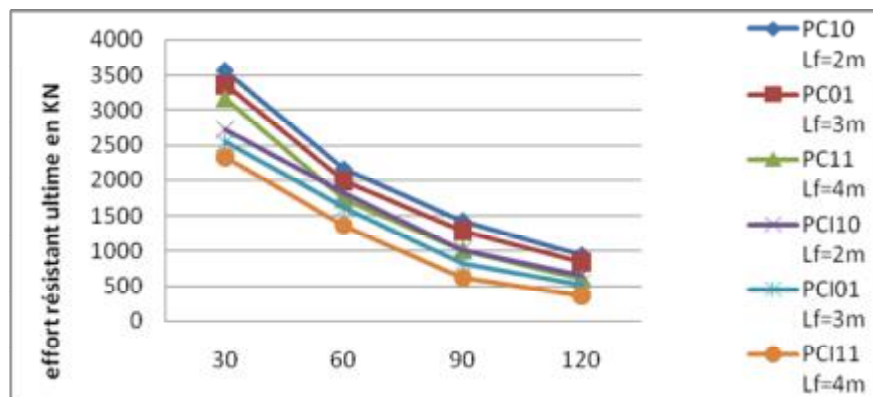


Figure 4.20 : Effet du taux d'armature dans la section carré et circulaire

La variation du taux d'armature a de grande influence sur la résistance au feu dans les deux sections carrées et circulaire.

➤ **Effet de la longueur de flambement :**

**Figure 4.21 : Effet de la longueur de flambement dans la section carré et circulaire**

L'augmentation de la longueur de flambement n'apporte rien à la résistance au feu par contre elle diminue la résistance après un certain temps d'exposition au feu.

➤ **Effet de la limite élastique des aciers :**

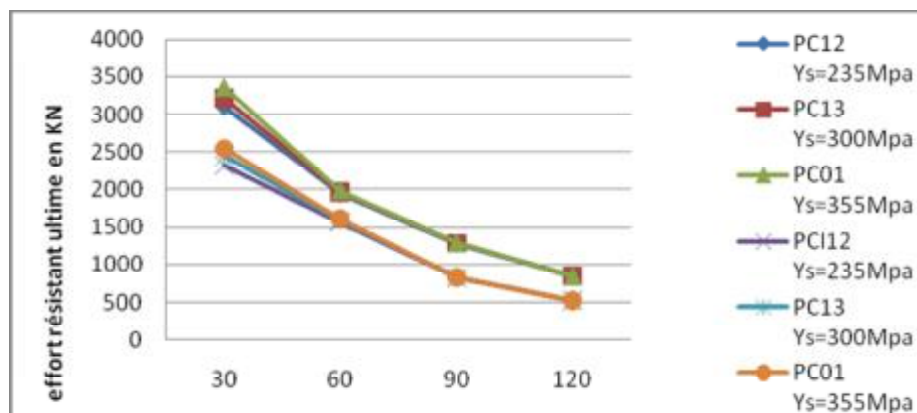


Figure 4.22 : Effet de la limite élastique de l'acier dans la section circulaire

La limite élastique des armatures n'a pas une grande influence sur la résistance au feu et les courbes sont pratiquement superposées.

➤ **Effet de la limite élastique des armatures :**

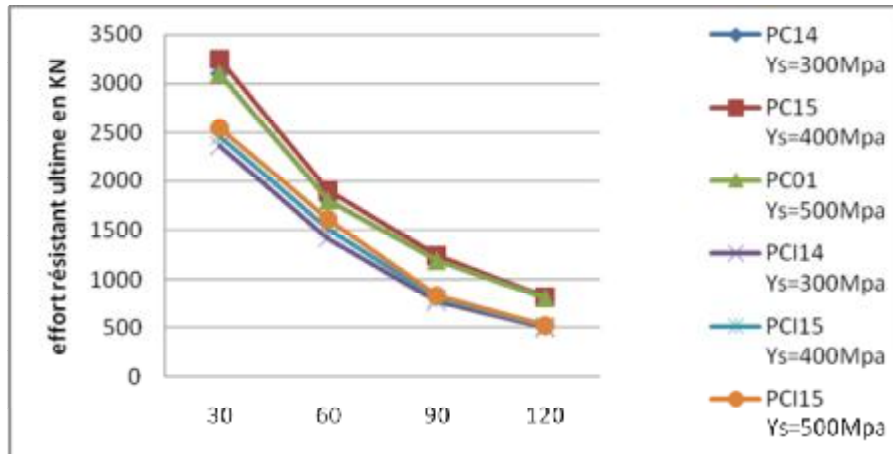


Figure 4.23 : Effet de la limite élastique des armatures dans la section carré et circulaire

La limite élastique d'aciers n'a pas une grande influence sur la résistance au feu notamment après 30 minutes d'exposition et les courbes sont pratiquement superposées.

➤ **Effet de la résistance du béton :**

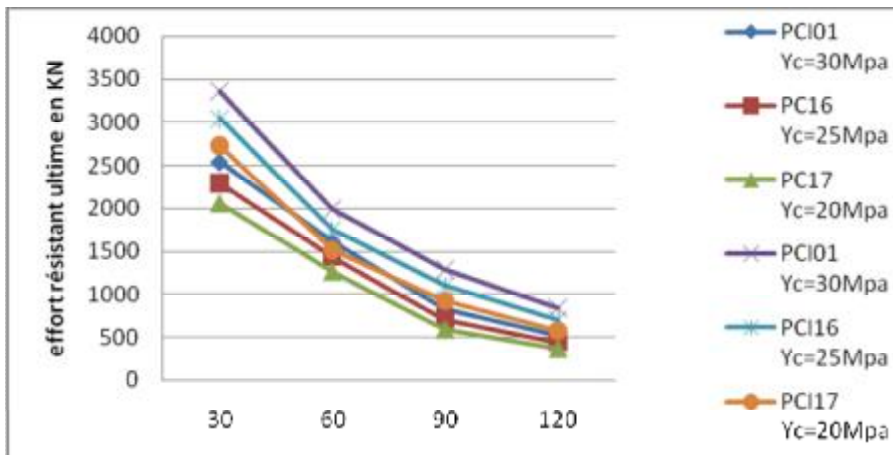


Figure 4.24 : Effet de la résistance du béton dans la section carré et circulaire

Certaines caractéristiques des matériaux ont une influence sur la résistance au feu telle que la résistance du béton, mais certaines autres n'apportent rien à la résistance comme la nuance de l'acier et la résistance élastique des armatures.

Conclusion :

Dans ce chapitre les méthodes simplifiées spécifiées au sein de l'Eurocode pour évaluer le comportement des poteaux en béton armé et en profil creux rempli de béton ; et plus précisément l'annexe B.3 de l'Eurocode 2 partie 1-2 et l'annexe G de l'Eurocode 4, partie 1-2 ont été considérées.

Nous avons réalisé des études paramétriques sur la résistance des poteaux sous feu à l'aide des logiciels Cimfeu et Potfire.

Les résultats obtenus à l'aide de ces logiciels ont permis de montrer l'incidence de certains paramètres sur la résistance au feu.

- L'augmentation de la largeur dans la section carrée et du diamètre dans la section circulaire ont un effet majeur sur la résistance au feu des deux types de poteaux (béton et mixte) en fonction du temps de résistance au feu normalisé. Donc l'augmentation de la section provoque plus de résistance aux poteaux.
- Durant les 30 premières minutes l'augmentation de l'enrobage aura un effet négatif sur la résistance au feu des types de poteau (béton et mixte) ; mais après 30 minutes d'exposition au feu l'augmentation de l'enrobage affecte positivement la résistance au feu et donne une augmentation significative.
- La résistance du béton a une influence importante sur la résistance au feu par rapport aux autres paramètres des matériaux utilisés dans les deux types de poteau ; la nuance des aciers n'intervient pas de la même façon que la résistance du béton dans les poteaux à profil creux remplis de béton. Cependant que la limite élastique des armatures a une influence considérable sur la résistance au feu des poteaux en béton armé et n'apporte rien aux poteaux à profil creux remplis de béton.
- La longueur de flambement n'affecte pas d'une manière significative à la résistance au feu pour les deux types de poteau.
- L'augmentation de la section d'armature donne des différences importantes de résistance au feu dans les deux types de poteaux donc elle augmente la résistance pour les deux cas analysés.

- L'augmentation de l'épaisseur des parois dans les poteaux à profil creux remplis de béton a une influence sur la résistance au feu dans les premières 30 minutes . après 60 minutes d'exposition au feu ce paramètre ne contribue pas.
- L'augmentation de La teneur en eau et l'utilisation de granulat siliceux provoque une petite diminution de la résistance des poteaux en béton armé.

Les résultats obtenus montrent aussi que la section carrée résiste plus que la section circulaire inscrite dans le carré.

Chapitre 05

Modélisation numérique des
éléments de structures sous feu

Introduction :

Une description du Logiciel SAFIR ainsi que la base théorique utilisée sont décrites dans ce chapitre. La fiabilité du modèle utilisé par le logiciel SAFIR a été confrontée à des essais à échelle réel.

Nous avons simulé deux types de poutres à savoir : une poutre en aciers et une poutre en profil partiellement enrobé de béton exposé sur trois faces. Deux conditions aux limites sont considérées simplement appuyées et encastées, le chargement est considéré uniformément réparti. Une analyse paramétrique dont l'objectif est de cerner les paramètres les plus influents dans le comportement a été réalisée.

Dans un deuxième temps nous nous sommes intéressés au comportement thermique et mécanique des éléments de structure idéalisés soit par un poteau en béton armé de section carré et d'un poteau en acier creux rempli de béton sous une sollicitation due à la température selon quatre faces. Les deux types de poteaux ont été calculés en situation d'incendie sous l'effet d'un chargement axial ou excentré. Les résultats de cette première analyse ont fait l'objet d'une comparaison en matière de résistance au feu. Une analyse paramétrique est réalisée sur l'effet de l'excentrement de la charge et le chargement fonction de la résistance au feu, les résultats obtenus sont commentés.

Cette procédure de calcul numérique classifiée dans les méthodes de calcul avancé est comparée à un calcul appartenant à la classe des méthodes simplifiées dont la dénomination du Logiciel utilisé dans ce cas est POTFIRE. Nous ne réalisons la comparaison que sur une structure de poteau en acier creux rempli de béton, ceci est essentiellement dû à la limitation du logiciel POTFIRE.

5.1 Description et performance du logiciel SAFIR :

Dans cette partie de notre recherche, nous utilisons le logiciel SAFIR comme environnement pour l'analyse des poutres en béton et mixte ou des poteaux en béton et mixtes sous une sollicitation thermique 'température très élevée'.

Le Logiciel SAFIR est un programme développé à l'Université de Liège et il est destiné à l'analyse des structures sous température élevée, ainsi que l'analyse sous température ambiante.

Le programme est basé sur la méthode des éléments finis peut étudier le comportement des structures 2D et 3D. La simulation en 2D pour l'analyse en plan, est essentiellement basée

sur des éléments triangulaires à trois nœuds ou des éléments quadrilatéraux à quatre nœuds. Pour l'analyse tridimensionnelle les éléments volumétrique peuvent être respectivement à six nœuds ou à huit nœuds. La sollicitation due à la température peut être considéré sur toute les faces selon le modèle d'analyse requit.

Les lois de comportement (contrainte déformation) des différents matériaux sont disponibles dans la librairie du logiciel SAFIR. L'analyse thermique permet de déterminer l'évolution de la température dans la section transversale dans chaque élément composant la structure. Elle est basée sur la théorie de Fourier qui explicite le flux thermique en intégrant tous les paramètres intervenant dans le comportement sous influence d'une température. Quant à l'analyse mécanique, les routines de résolution dans le domaine linéaire et non linéaire basé sur la méthode des déplacements sont prises en compte pour la détermination du comportement mécanique de la structure poteau sous un chargement axiale ou excentré.

Les éléments barres et Shell et treillis sont utilisés soit comme élément bidimensionnel (2D) ou comme élément tridimensionnel (3D) pour l'analyse du comportement de la structure. La loi contrainte déformation est généralement linéaire élastique pour l'acier et non linéaire pour le béton quelques modèles de matériaux comme le béton silicieux ou béton calcaire [38]. D'autres matériaux tels que le bois et l'aluminium sont aussi prédéfinis dans le Logiciel. L'analyse d'une structure sous feu en utilisant SAFIR est basée essentiellement sur deux étapes.

- Analyse thermique : permet d'évaluer l'évolution et la distribution de la température à l'intérieur de chaque élément de la structure.
- Analyse structurel : permet la détermination de la réponse mécanique de la structure en tenant compte de l'effet de la température couplé avec une sollicitation mécanique (chargement constant axial ou excentré).

Plusieurs travaux utilisant le logiciel SAFIR ont été confrontés par rapport à des travaux expérimentaux [39].

5.2 Analyse thermique :

5.2.1 Sollicitation thermal :

Nous pouvons intégrer n'importe quelle courbe de feu pour modéliser cette sollicitation :

- feu naturel (caractérisé par la courbe température-temps)
- feu ISO caractérisé par l'équation (1.1) traité au niveau du chapitre.

L'incrémentation de la variable temps permet d'idéaliser la courbe du feu ISO figure [5.2]

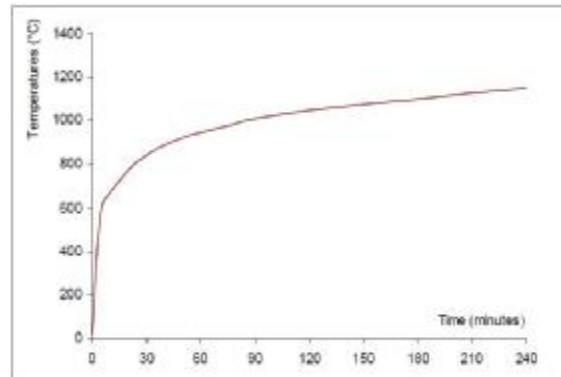


Figure 5.1 : courbe nominale du feu conventionnel ISO834

5.2.2 Approche numérique pour l'analyse thermique :

L'analyse thermique est basée sur la théorie du transfert thermique. La distribution de la température dans la section transversale est déterminée par l'équation de Fourier :

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + Q = \rho.c.\frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.1)$$

Où :

k : Conductivité thermique du matériau.

T : Température.

ρ : Densité.

Q : Quantité de chaleur par unité de volume.

c : Capacité thermique.

t : Temps.

(x, y) : Coordonnées de position de l'élément.

5.2.3 Validité du modèle thermique :

Différents essais au feu ont été réalisés en Europe, une comparaison a été faite entre les résultats expérimentaux et la simulation numérique la figure 5.2 a été enregistrée [2].

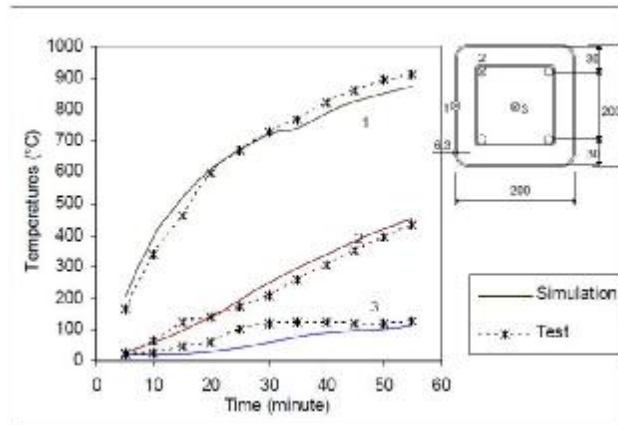


Figure 5.2 : comparaison entre la température calculée et l'autre mesuré dans la section transversale pour un essai au feu particulier

Celle ci montre la température mesurée au niveau des trois points 1 ,2 ,3 de la section ; les valeurs sont similaires aux autres valeurs calculés par la méthode des éléments finis avec SAFIR.

5.2.4 Paramètres essentiels dans la simulation numérique :

Le programme SAFIR permet de considérer les paramètres suivants :

- La teneur en eau prise en compte dans le calcul (92 kg/m³).
- Les propriétés thermiques (conductivité thermique et chaleur spécifique) sont donnés par l'Eurocode 3 ou l'Eurocode 4 selon les sections traitées (béton armé ou mixte) le béton siliceux peut être considéré.
- La température des gaz varie selon la courbe ISO834.
- Pour calculer le flux transmit à la section considérée durant l'exposition au feu il est nécessaire d'introduire les valeurs du coefficient de convection (h_c) ainsi que l'émissivité relatif (ϵ_m) et selon l'Eurocode qui préconise les valeurs suivants :
 $h_c=25 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $\epsilon_m=0.7$ [40].

5.2.5 Formats des fichiers SAFIR thermal :

SAFIR2007 utilise le format texte pour introduire les donnés du problème, ce fichier a l'extension « .in » et définit le problème en 19 séries de lignes séparé :

SERIES 1: Commentaires

SERIES 2: Ligne vide indique le démarrage de la définition des nœuds

SERIES 3: Nombre des nœuds

SERIES 4: Nombre des Dimensions

SERIES 6: Définir le degré de liberté pour chaque nœud

SERIES 7: Paramètre de calcul

SERIES 9: Fonction renuméroter les nœuds

SERIES 11: Nombre de matériaux

SERIES 12: Nombre d'éléments et vides

SERIES 13: Définition des nœuds

SERIES 14: Centre géométrique

SERIES 15: Déplacement et appuis

SERIES 16: Eléments, Exposition, Définition des vides

SERIES 17: Précision

SERIES 18: Définition des matériaux

SERIES 19: Définition du Temps (Calcul et affichage)

5.3 Analyse mécanique :

5.3.1 Approche numérique pour l'analyse mécanique :

L'analyse mécanique par SAFIR est basé sur la forme incrémentale du principe des travaux virtuel. la formule utilisé dans le model et l'assemblage par élément fini sont basé sur le principe des travaux virtuel. Pour cette analyse nus avons simulé les poutres et poteaux en élément 2D barres.

5.3.2 Hypothèses :

- La théorie de Bernoulli (section plane avant déformation reste plane après déformation).
- Théorème de Von karman (les déformations sont petites).
- Les rotations sont supposé petites.
- Les intégrations longitudinales sont calculées numériquement par la méthode de Gauss.
- Les intégrations des contraintes longitudinales et la rigidité de la section est basé sur le model fibre.

- L'effet d'expansion d'acier et du béton est considéré.

5.3.3 Validité du model mécanique :

Pour déterminer la validité du model mécanique du code de calcul SAFIR une comparaison a été réalisé [39] entre des essais expérimentaux et des simulations avec le code dans les deux conditions :

- ✓ Température ambiante.
- ✓ Température élevée.

5.3.4 Format des fichiers SAFIR mécanique :

SERIES 1: Commentaires.

SERIES 2: Ligne vide indique le démarrage de la définition des nœuds.

SERIES 3: Nombre des nœuds.

SERIES 4: Nombre des axes.

SERIES 5: Si existe d'autre information.

SERIES 6: Définir le degré de liberté pour chaque nœud

SERIES 7: Nombre de charge.

SERIES 8: Appuie incliné.

SERIES 9: Stratégie de Convergence.

SERIES 11: Stratégie de renuméroter.

SERIES 12: Nombre de matériaux.

SERIES 13: Nombre d'éléments.

SERIES 14: Définition des nœuds.

SERIES 15: Déplacement imposé et appuis.

SERIES 16: Eléments barres.

SERIES 17: Eléments solide.

SERIES 19: Eléments treillis.

SERIES 20: Oblique supports.

SERIES 21: Précision.

SERIES 22: Chargement.

SERIES 23: Caractéristique de mass.

SERIES 24: Définition des matériaux.

SERIES 25: Définition du Temps.

SERIES 26: Résultats.

5.4 Exemple d'étude :

5.4.1 Analyse des éléments poutres :

- Poutre en en acier et mixte :
- Différentes sections analysées :

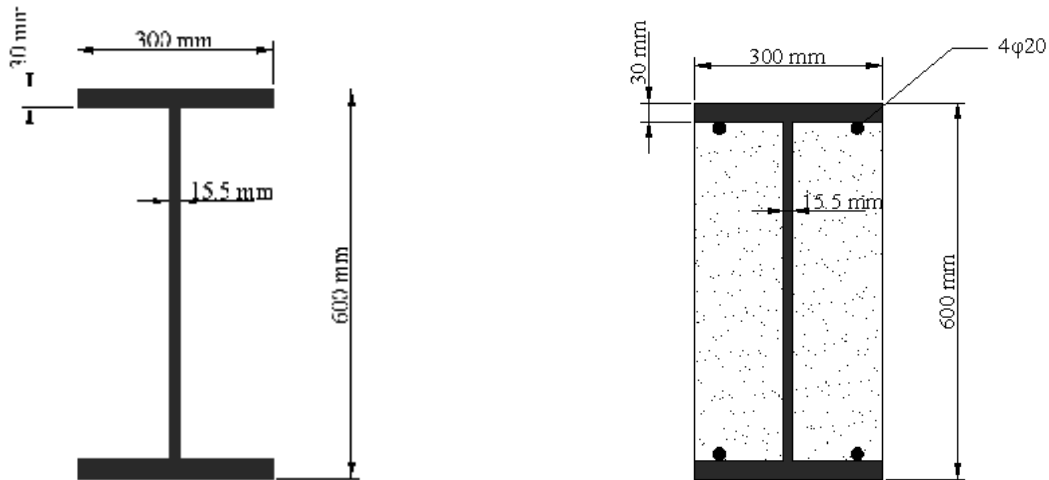


Figure 5.3 : Données physiques des sections

La discrétisation est basé sur un maillage quadrilatéral ; ce qui nous a permit d'obtenir pour la section en acier à 62 éléments composés de 118 nœuds .Pour la section en acier partiellement enrobé de béton ; elle se compose 1239 nœuds soit 1160 éléments. Pour la discrétisation de la section d'armature est simulée par une section carrée approximativement égale à la section circulaire des barres d'acier.

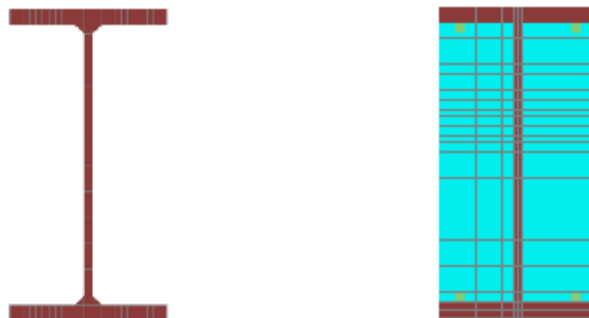


Figure 5.4 : discrétisation des deux sections

- Résultats de l'analyse thermique :
 - Profil HEB600 exposée sur trois faces :

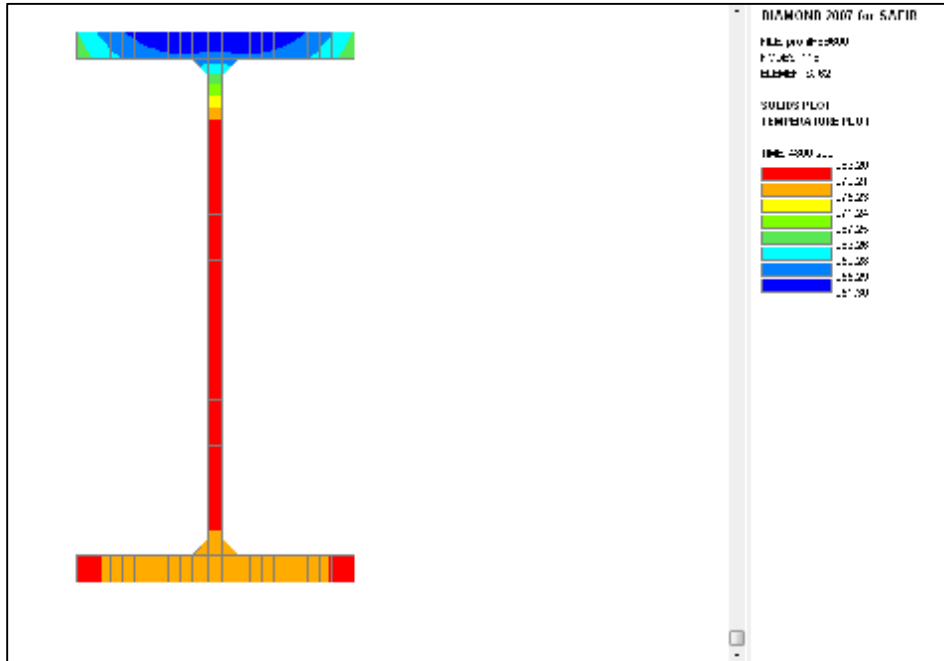


Figure 5.5 : températures obtenues après 4800 s

La figure 5.5 montre l'évolution de la température au sein de la section de la poutre sollicitée selon les trois faces (accessible). Cette répartition du flux montre une température décroissante vers le centre de la semelle supérieure. A cet effet trois points ont été ciblés et leurs courbes représentatives sont montrées sur la figure 5.6 :

Le choix de ces points est :

- Nœud 118 sur la face de sollicitation,
- Nœud 12 au niveau la face non sollicité,
- Nœud 60 au centre de la section

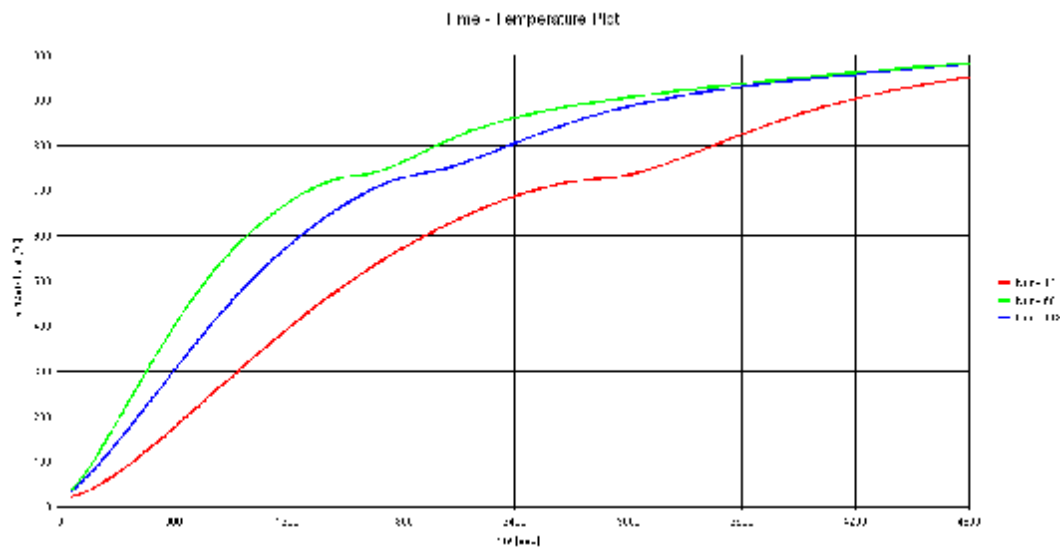


Figure 5.6 : variation des températures obtenues en fonction du temps pour les nœuds 13; 60;118.

Ces courbes montrent qu'après un temps de 4800s le centre de section atteint une température de 980° C alors que la face sollicitée a atteint une température de 984° C. Par contre pour le troisième point idéalisant la position du centre de la semelle supérieure a atteint une température de 950°C. Nous pouvons aussi remarque que pour le point le plus exposé que la température atteinte au bout de 2400s est de 860°C, après cela nous assistons à une élévation de la température assez monotone. Pour les trois nœuds élévation est assez lente au début jusqu'au temps de 1200s après cela l'évolution est concrétisé par une faible pente de l'évolution de la température fonction du temps.

- **Section rectangulaire en acier partiellement enrobé de béton exposée sur trois faces :**

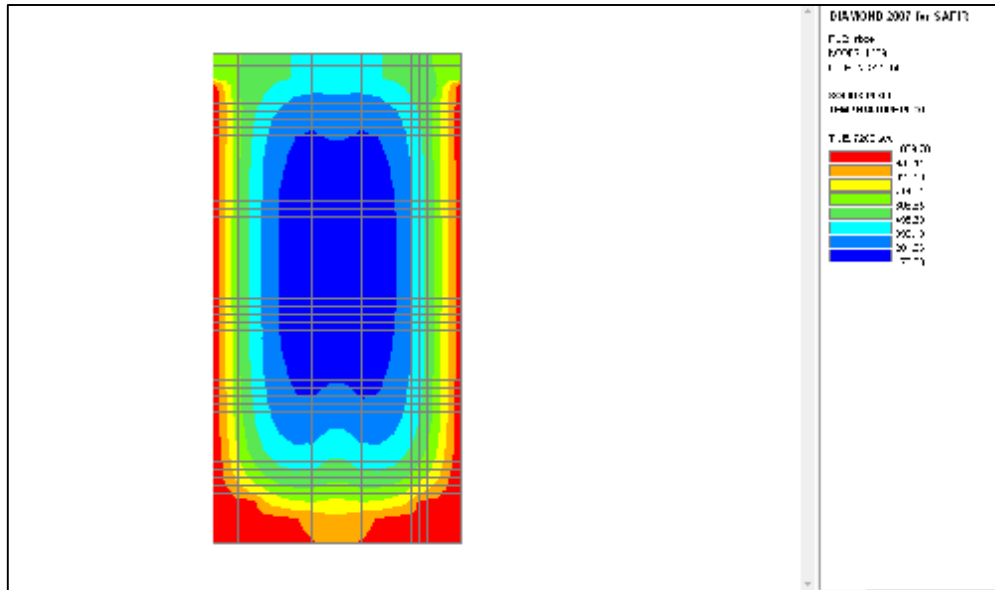


Figure 5.7 : températures obtenues après 7200 s

De manière similaire nous analysons la poutre de section rectangulaire en acier partiellement enrobé de béton exposée sur trois faces figure [5.7]. Le flux de chaleur montre la formation d'un noyau central formé de deux zones où la température est la moins élevée durant l'exposition au feu. Ces températures varient entre 261°C et 1739°C. Nous remarquons qu'à la base de la poutre (jonction entre l'âme et la semelle du profilée), la température n'a pas évolué de manière similaire que dans ce point de jonction (931°C) que dans la semelle de profilée (1039°C). Après cela une formation de zone concentrique similaire à la poutre en béton armé est constituée. Une autre zone est remarquable (haut de la poutre), la température n'a pas évolué de manière similaire que les trois faces sollicitées. La température au sein de la jonction haute du profilée (semelle – âme) est plus faible que dans la partie semelle. La diffusion de la température est dissymétrique ceci est essentiellement dû à la sollicitation sur les trois faces. A cet effet trois points ont été ciblés et leurs courbes représentatives sont montrées sur la figure 5.6. Le choix de ces points est :

- Nœud 3 sur la face de sollicitation,
- Nœud 681 au niveau des armatures,
- Nœud 1179 au centre de la section.

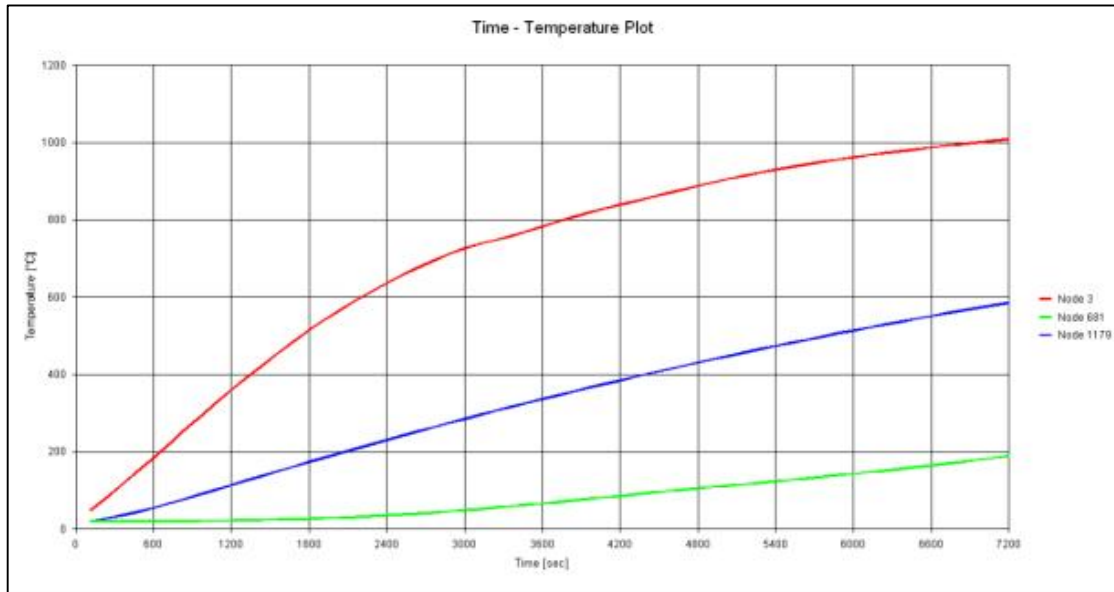


Figure 5.8 : variation des températures obtenues en fonction du temps pour les nœuds 3; 681;1179.

Ces courbes montrent qu'après un temps de 7200s le noyau du béton n'a atteint qu'une température de 188 C° alors que la face sollicitée a atteint une température 1008.5 C°. Par contre pour le troisième point idéalisant la position du centre de gravité des armatures (dimension de l'enrobage) a atteint une température de 586°C. Nous pouvons aussi remarque que pour le point le plus exposé que la température atteinte au bout de 3500S est de 850°C, après cela nous assistons à une élévation de la température assez monotone. Pour le nœud 681 l'évolution de la température est linéaire, par contre pour le noyau cette élévation est assez lente au début jusqu'au temps de 3000S (pratiquement variation en palier de 20° à 30°), après cela l'évolution est concrétisé par une faible pente de l'évolution de la température fonction du temps.

➤ **Analyse mécanique:**

Nous avons étudié une poutre simplement appuyée et une autre doublement encastrée de 6m de portée chargée uniformément par une charge de 300 K N. Nous avons discrétisé nos poutres en 21 nœuds et 10 éléments comme montre la figure 5.9 :

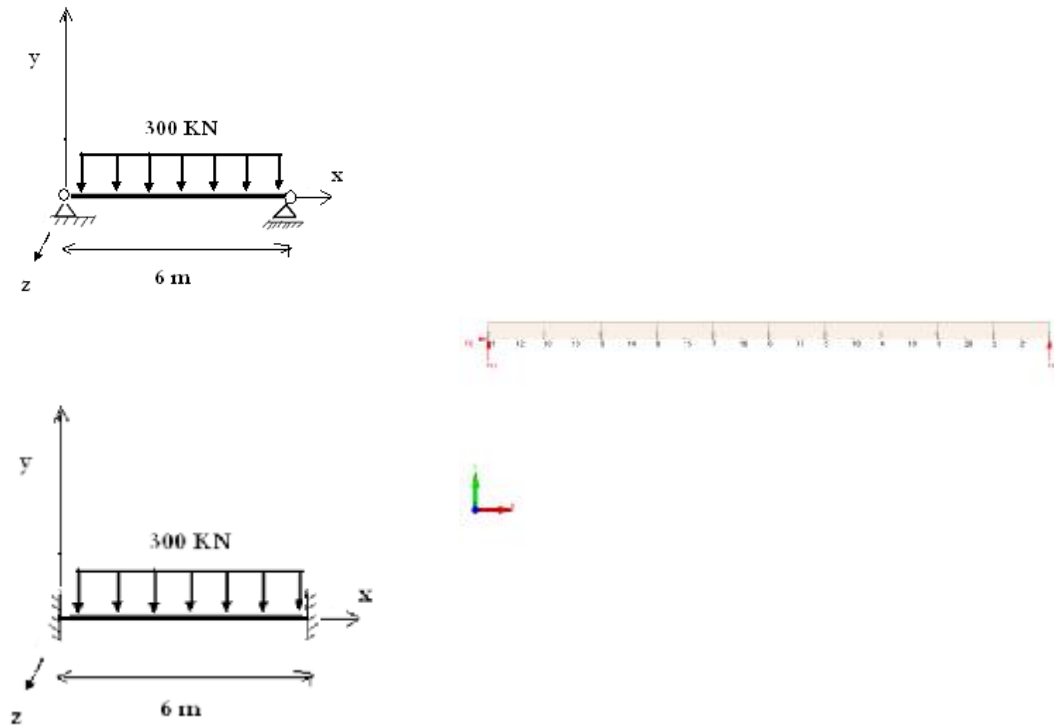


Figure 5.9 : Schématisation de la poutre considérée

➤ **Résultats obtenus:**

Nous avons fait évoluer certains paramètres afin d'analyser leurs influences sur le comportement au feu des poutres en aciers et mixtes.

• **Poutre en acier et mixte :**

✚ **Effet de la hauteur de la section :**

Les résultats de calcul sont regroupés dans le tableau [5.1].

Tableau 5.1 : résistance au feu des poutres en fonction de la hauteur de la section

| TYPE DE SECTION | | Résistance au feu (réf/s) | | |
|-------------------------|-----------------|---------------------------|----------|----------|
| | | H=500mm | H=600mm | H=700mm |
| simplement appuyée | mixte | 2634.38 | 3498.75 | 5673.75 |
| | profil en acier | 1050.00 | 1256.25 | 1440.00 |
| doublement encastrée | mixte | 9560.62 | 12180.00 | 12823.12 |
| | profil en acier | 1515 | 1689.38 | 1966.88 |

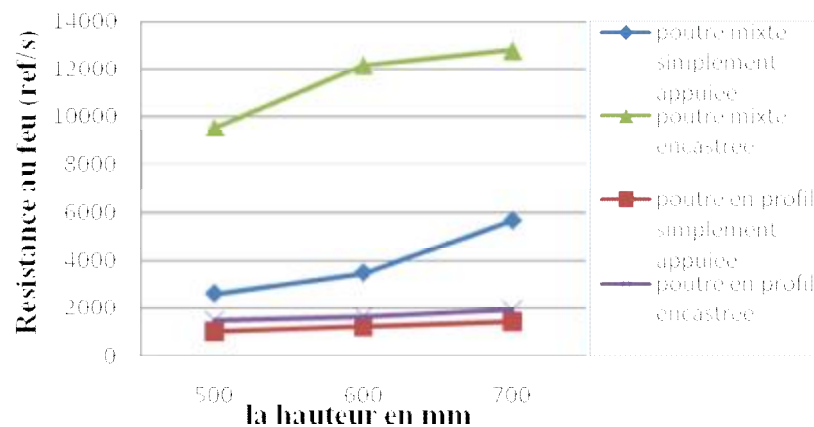


Figure 5.10 : Influence de la hauteur sur la résistance au feu

L'augmentation de la hauteur du section du profilé a une incidence positive sur la résistance au feu. Plus on augmente la hauteur du profilé la résistance au feu augmente dans la section mixte qui présente une fonction bilinéaire courbe bleu hors que le profilé simple présente une fonction linéaire avec une faible variation .ce contraste dans l'évolution des deux types de structure est du béton dont la température du noyau reste assez faible par rapport aux autres surfaces en contact avec la sollicitation au feu. Nous remarquons que l'influence des conditions aux limites pour le profilé simple est assez faible, par contre pour une structure mixte les conditions aux limites ont un rôle très important dans le comportement mécanique vis-à-vis du feu.

✚ Effet du chargement :

Concernant l'effet de la charge nous avons fait varier la charge linéairement avec les conditions aux limites simplement appuyée et encastree, les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau [5.2].

Tableau 5.2 : résistance au feu des poutres en fonction de la charge appliquée

| TYPE DE SECTION | | Résistance au feu (réf/s) | | |
|-------------------------|-----------------|---------------------------|------------|------------|
| | | N= 200KN/m | N= 300KN/m | N= 400KN/m |
| simplement appuyée | mixte | 6018.75 | 3498.75 | 2726.25 |
| | profil en acier | 1485 | 1256.25 | 1091.25 |
| doublement encastree | mixte | 14017.5 | 12180.00 | 7725.00 |
| | profil en acier | 2133.75 | 1689.38 | 1522.50 |

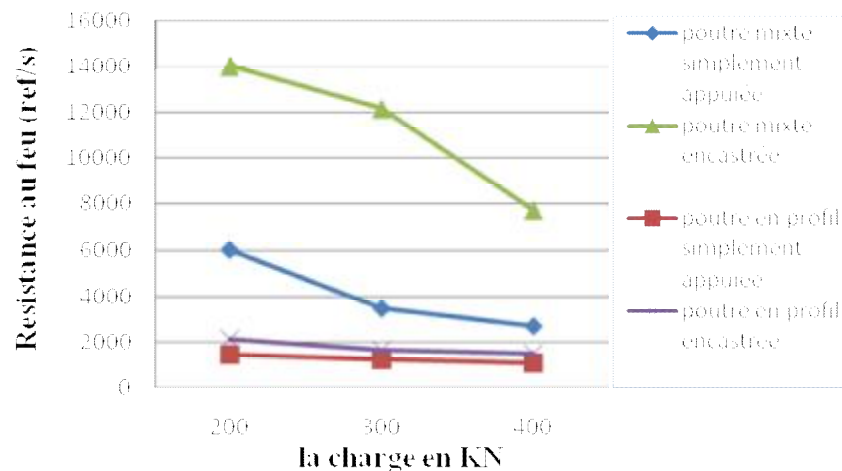


Figure 5.11 : Influence du chargement sur la résistance au feu

Nous remarquons que l'influence de la charge et les conditions au limite dans la section mixte est très appréciable et que la poutre encastree présente une meilleure attitude vis-à-vis du comportement au feu. La résistance de la poutre en acier fonction d'évolution de la charge est insignifiante.

✚ Effet de la portée :

De manière similaire, nous avons étudiés l'effet de la portée ; Les résultats sont présentés dans le tableau [5. 3].

Tableau 5.3 : résistance au feu des poutres en fonction de la portée

| TYPE DE SECTION | | Résistance au feu (réf/s) | | |
|-------------------------|-----------------|---------------------------|----------|---------|
| | | L= 6 m | L= 7 m | L= 8 m |
| simplement appuyée | mixte | 3498.75 | 2673.75 | 1234.38 |
| | profil en acier | 1256.25 | 1074.38 | 892.25 |
| doublement encastrée | mixte | 12180.00 | 11310.00 | 5790.00 |
| | profil en acier | 1689.38 | 1511.25 | 1361.25 |

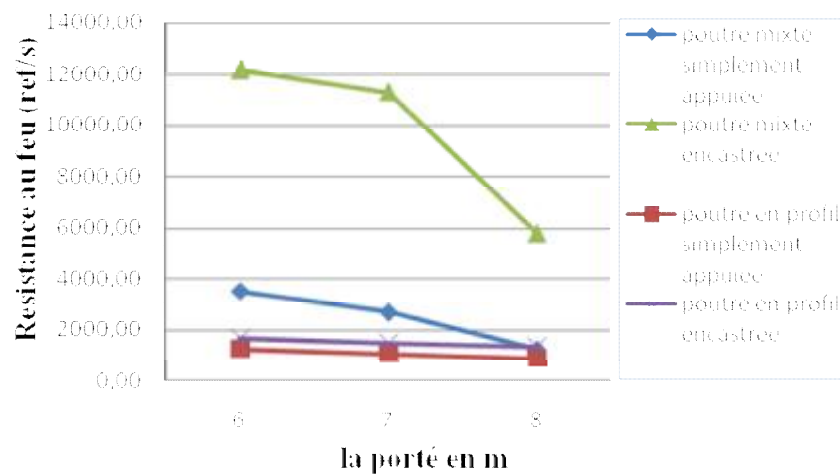


Figure 5.12 : Influence de la portée sur la résistance au feu*

L'effet de la portée pour la poutre mixte dont les conditions aux limites sont supposées encastrées induit une chute de la résistance au feu, pour la poutre simplement appuyée la variation est assez faible.

✚ Effet de la nuance d'acier:

Nous synthétisons l'influence de la nuance d'acier sur le comportement des poutres mixtes et profilé simple, fonction des deux conditions aux limites dans Le tableau [5.4].

Tableau 5.4 : résistance au feu des poutres en fonction de la nuance d'acier

| TYPE DE SECTION | | Résistance au feu (réf/s) | | |
|-------------------------|-----------------|---------------------------|---------|----------|
| | | Ys= 235 | Ys= 300 | Ys= 355 |
| simplement appuyée | mixte | 2508.75 | 3033.75 | 3498.75 |
| | profil en acier | 969.38 | 1166.25 | 1256.25 |
| doublement encastrée | mixte | 6185.62 | 9423.75 | 12180.00 |
| | profil en acier | 1466.25 | 1599.38 | 1689.38 |

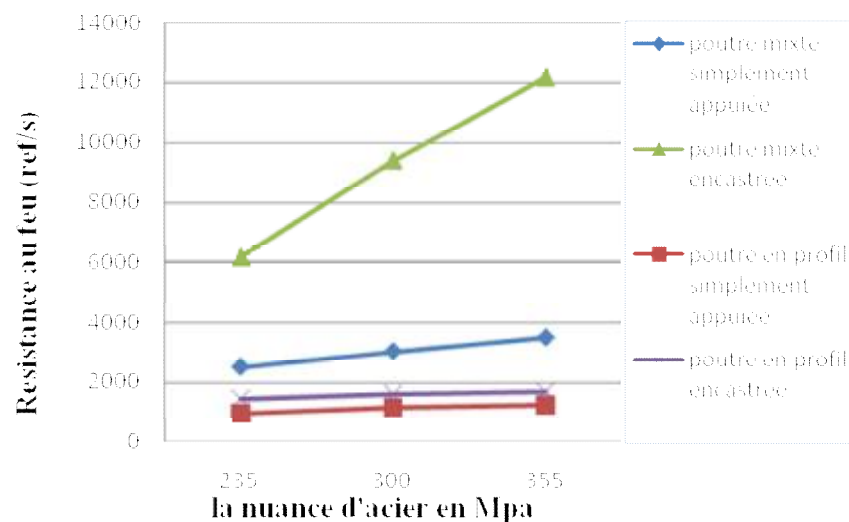


Figure 5.13 : Influence de la nuance des armatures sur la résistance au feu

La figure [5.13] permet de mettre en évidence que la nuance d'aciers influe considérablement lorsque la poutre est encastrée sur la résistance au feu. Les conditions aux limites favorise le comportement de la poutre encastrée par rapport à la poutre simplement appuyée, le profilé simplement appuyée présente une variation monotone faible pour les deux conditions aux limites et les trois types de nuance d'aciers.

- **Poutre en béton armé :**

- **Différentes sections analysées :**

Nous considérons une poutre de section rectangulaire de 300mm par 600mm en béton armé avec 4 ϕ 20.

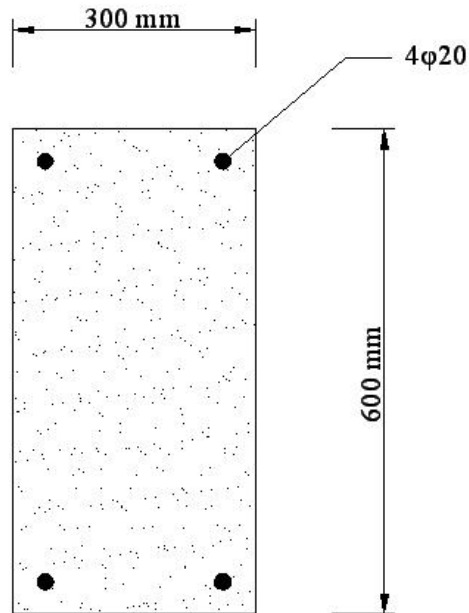


Figure 5.14 : Données physiques des sections

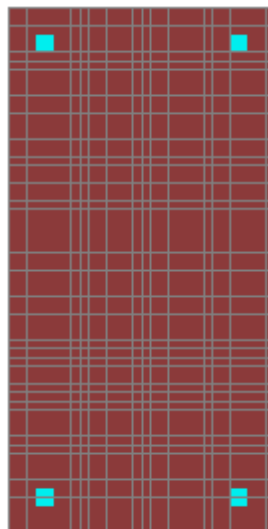


Figure 5.15: Discrétisation de la section

➤ Résultats de l'analyse thermique :

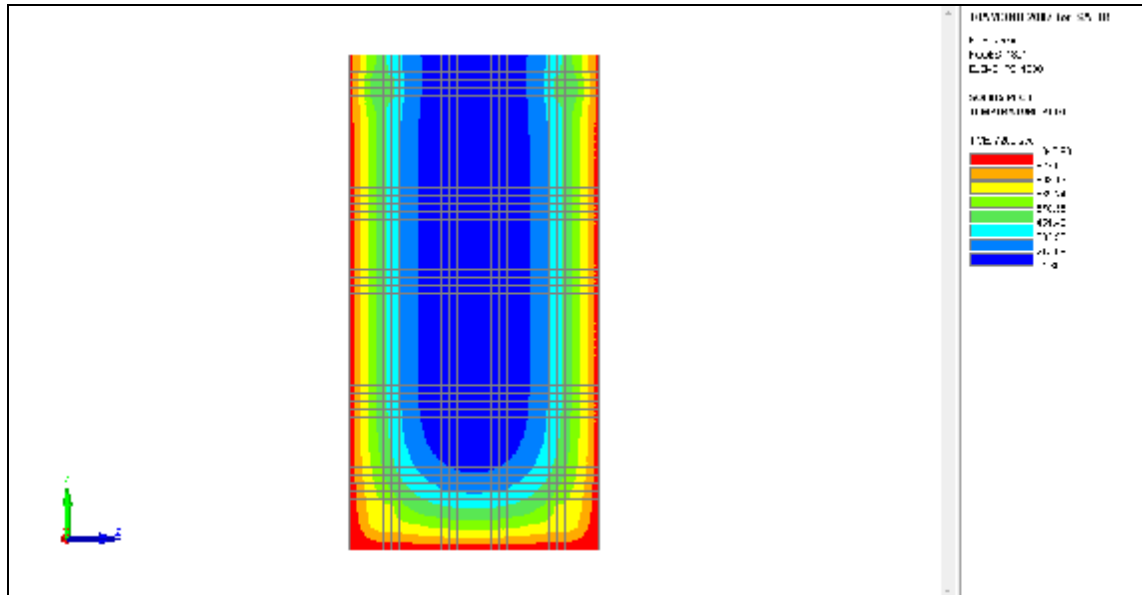


Figure 5.16 : températures obtenues après 7200 s

Nous analysons la poutre de section rectangulaire en béton armé exposée sur trois faces figure [5.16]. Le noyau central formé de deux zones où la température est la moins élevée durant l'exposition du feu. Une autre zone est remarquable (haut de la poutre), la température n'a pas évolué de manière similaire que les trois faces sollicitées. La température au sein de la jonction haute est plus faible. La diffusion de la température est dissymétrique ceci est essentiellement dus à la sollicitation sur les trois faces. A cet effet trois points ont été ciblés et leurs courbes représentatives sont montrées sur la figure 5.17. Le choix de ces points est :

- Nœud 1 sur la face de sollicitation,
- Nœud 364 au niveau des armatures,
- Nœud 1069 au centre de la section.

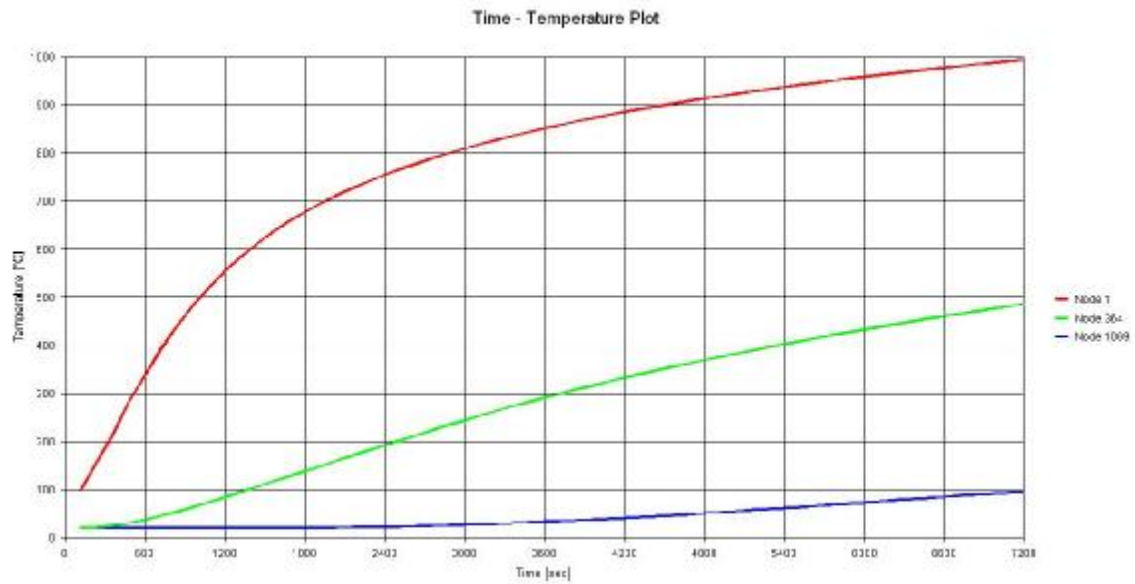


Figure 5.17 : variation des températures obtenues en fonction du temps pour les nœuds 1; 364;1069.

➤ Analyse mécanique:

Nous avons étudié une poutre simplement appuyées et une autre doublement encastree de 6m de porté chargé uniformément par une charge de 300 K N. nous avons discrétisé nos poutres en 21 nœuds et 10 éléments comme montre la figure 5.18 :

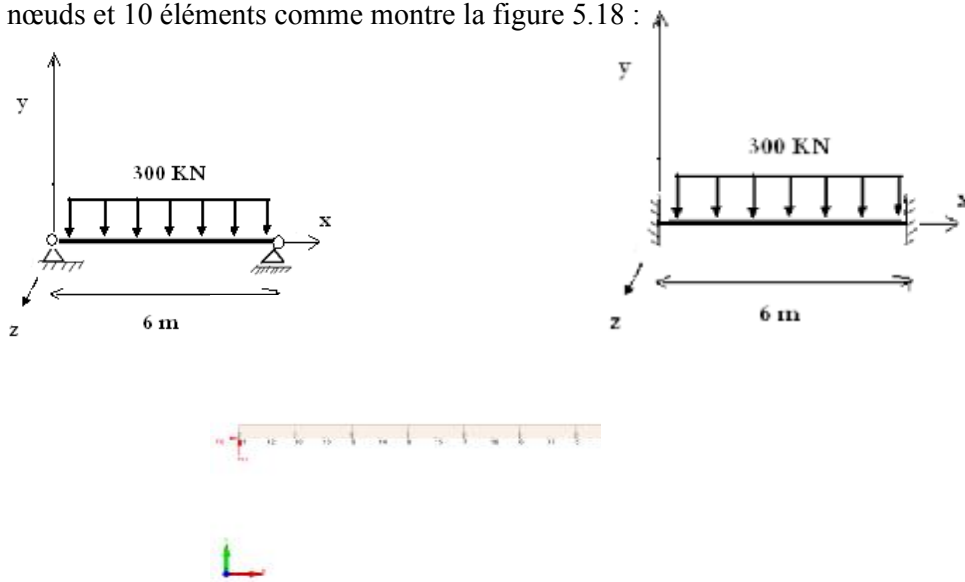


Figure 5.18 : Schématisation de la poutre considérée

➤ **Résultats obtenus:**

L'effet des conditions en limites sur la résistance au feu des poutres en béton armé est illustré dans la figure [5.19].

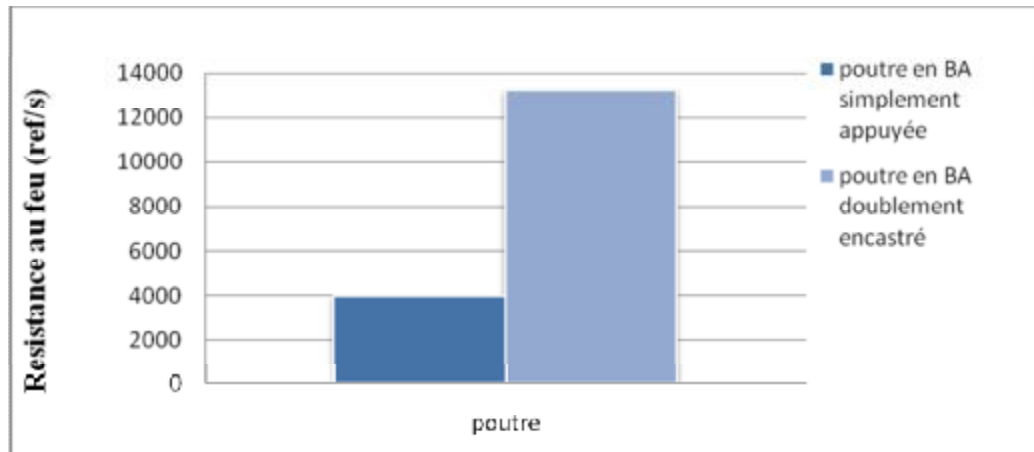


Figure 5.19 : effet des conditions aux limites sur la résistance au feu

Nous remarquons que la poutre en béton armé doublement encastré présente un meilleur comportement.

5.4.2 Analyse des éléments poteaux :

➤ **Différentes sections analysées :**

Nous considérons un poteau carré de 300mm de côté en béton armé avec 4 ϕ 20.

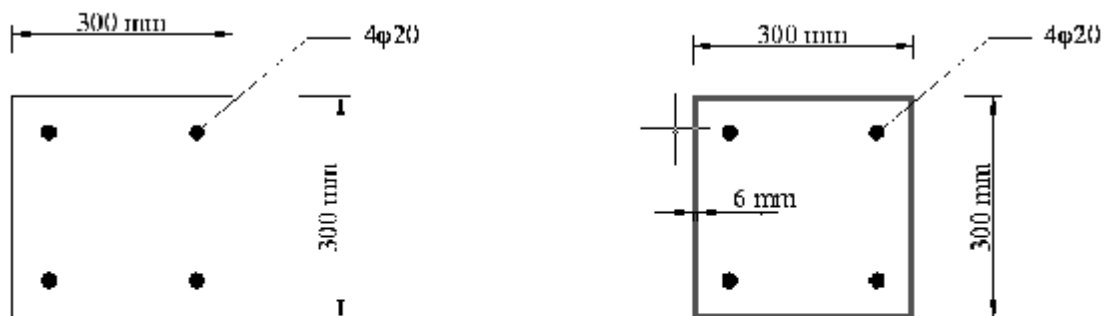


Figure 5.20 : données physiques des sections

La discrétisation des présentes sections a été réalisée avec un maillage quadrilatéral et nous avons modélisé notre section en béton armé en quart devisé à 144 nœuds et par la suite nous avons obtenus 121 éléments et de la même façon pour la section en profil creux rempli de béton on 169 nœuds soit 144 éléments. Pour la discrétisation de la section d'armature nous avons supposés la section circulaire est carrée.

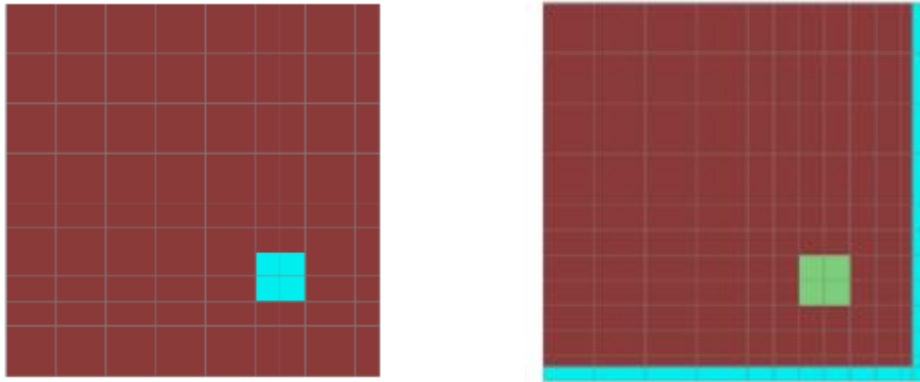


Figure 5.21 : discrétisation des deux sections de poteaux en quart de section

➤ Résultats de l'analyse thermique :

- Section en béton armé carré exposée sur quatre faces:

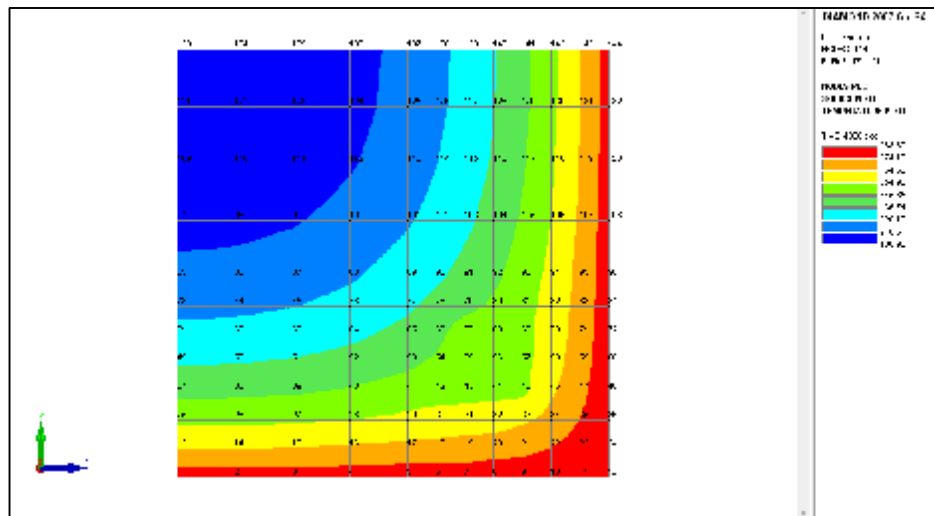


Figure 5.22 : températures obtenues après 4800 s

Dans le but d'illustrer la diffusion de la température au sein de la section en béton armé nous avons choisi trois points essentiels :

- Nœud 12 sur la face de sollicitation,
- Nœud 56 au niveau du centre de gravité des armatures,
- Nœud 133 au centre de la section.

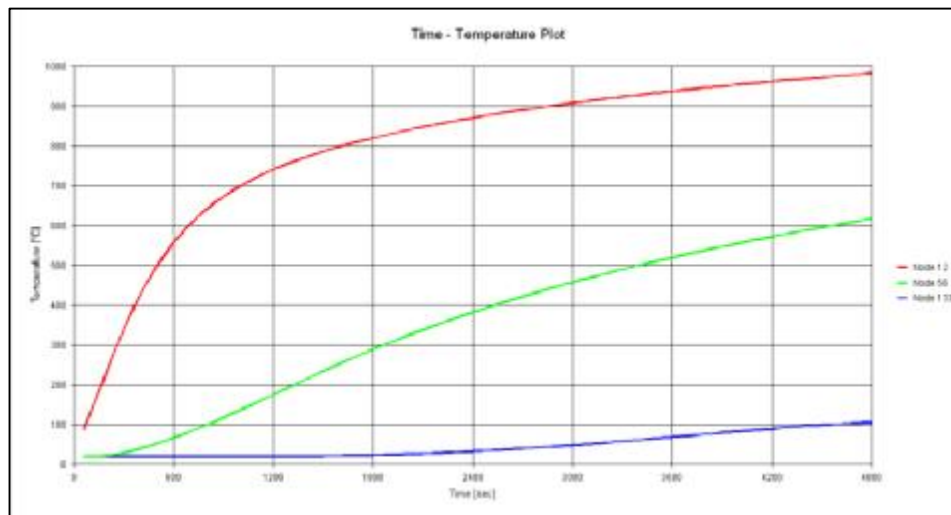


Figure 5.23 : variation des températures obtenues en fonction du temps pour les nœuds 12; 56;133.

Ces courbes montrent qu'après un temps de 4800s le centre de section n'atteint qu'une température de 106° C alors que la face sollicitée a atteint une température de 983° C. Par contre pour le troisième point idéalisant la position du centre de gravité des armatures a atteint une température de 618°C.

- Section en acier creux remplis de béton carré exposée sur quatre faces :

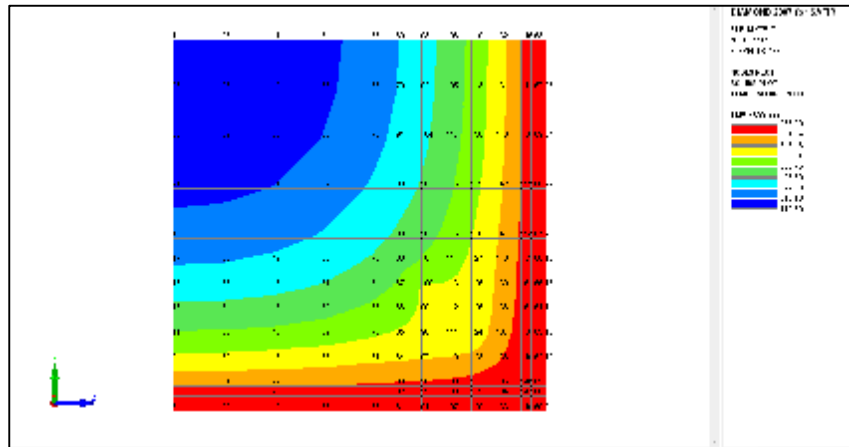


Figure 5.24 : températures obtenues après 4800 s

La section à profil creux rempli de béton est composée de trois différents matériaux et pour bien déterminer la température au niveau de chaque matériau nous avons choisi trois points essentiels et dans :

- Nœud 2 sur la paroi extérieure.
- Nœud 112 au niveau du centre de gravité des armatures.
- Nœud 1 au centre de la section.

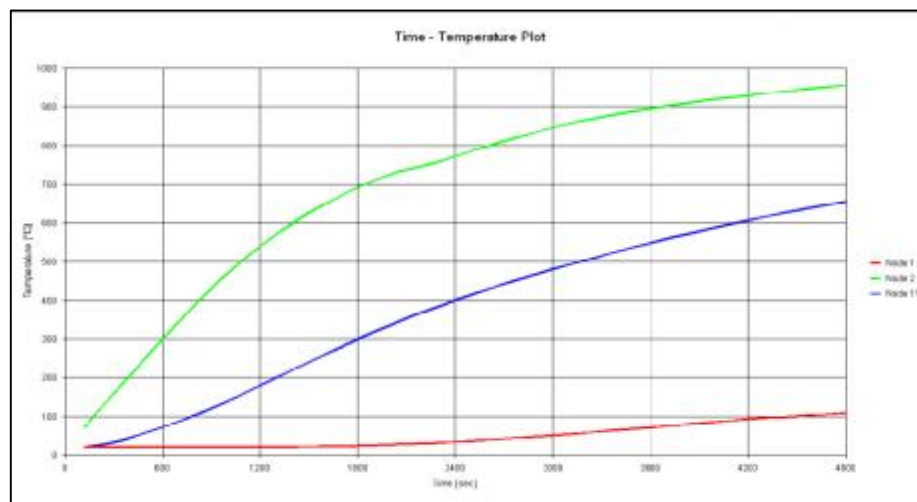


Figure 5.25 : variation des températures obtenues en fonction du temps pour les nœuds 1; 12;112.

La figure 5.25 montre qu'après un temps de 4800s le centre de section n'atteint qu'une température de 110.3°C alors que la paroi extérieure a atteint une température de 944°C . Par contre pour le troisième point idéalisant la position du centre de gravité des armatures a atteint une température de 655°C .

➤ **Analyse mécanique:**

Nous avons étudié deux types de poteaux les poteaux en béton armé et les poteaux à profil creux remplis de béton .avec appuie double en bas et appuie simple en haut d'une hauteur de 4m chargé avec un effort concentré de 800 KN .le poteaux est discrétisé en 10 éléments soit 21 nœuds considérés.

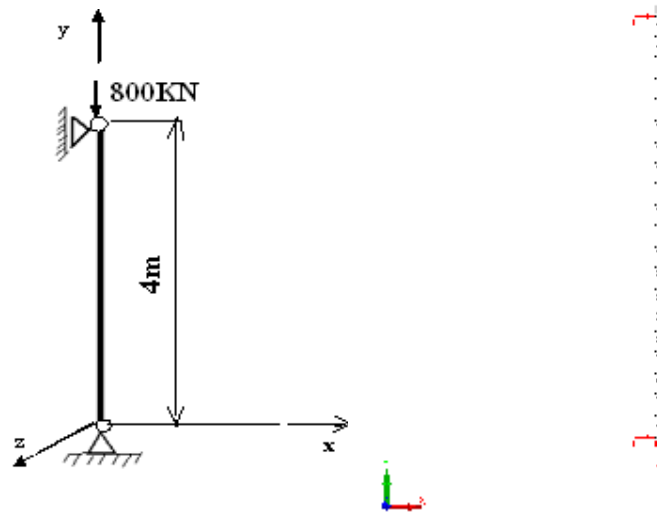


Figure 5.26 : Schématisation du poteau considéré

➤ **Résultats obtenus:**

Dans le but d'évaluer le comportement des poteaux sous feu on a réalisé une études paramétrique pour avoir l'incidence de l'excentricité et le chargement sur la résistance au feu des deux types de poteaux en béton armé et mixte et de les comparer avec les résultats obtenus avec la méthode simplifié de l'Eurocode 4 annexe G pour les poteaux creux remplis de béton.

✚ **Effet de l'excentricité :**

Le tableau [5.5] résume les résultats de calcul de l'effet de la variation de l'excentricité de la charge.

Tableau 5.5 : résistance au feu des poutres en fonction de l'excentrement

| Excentricité en cm | METHODE AVANCEE SAFIR | | METHODE SIMPLIFIE POTFIRE |
|--------------------|----------------------------|---|---|
| | poteau carré en béton armé | poteau en profil creux remplis de béton carré | poteau en profil creux remplis de béton carré |
| 0 | 3635 | 3541 | 5040 |
| 2 | 3086 | 2986 | 3360 |
| 4 | 2599 | 2386 | 3000 |

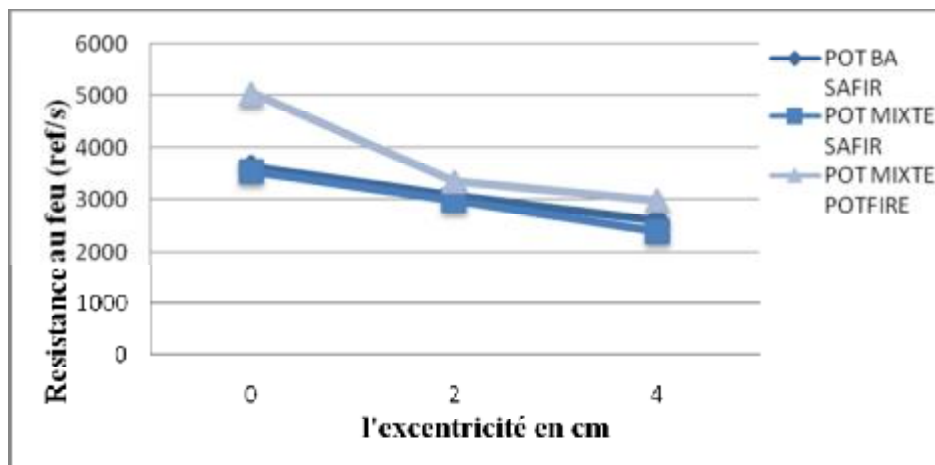


Figure 5.27 : Influence de l'excentricité de la charge sur la résistance au feu

Suite aux résultats obtenus par élément finis des deux types de section en béton et mixte avec une épaisseur de 6mm, nous remarquons que la section de béton offre une résistance plus importante qui augmente avec l'excentricité de la charge sollicitant le poteau.

Pour la méthode simplifiée les résultats obtenus sont assez élevés en matière de résistance donc elle donne uniquement un aperçu de celle-ci mais sur le plan sécuritaire il faut utiliser des coefficients de sécurité dans le calcul.

Effet de la charge:

Les résultats de calcul sont regroupés dans le tableau [5.6]

Tableau 5.6 : résistance au feu des poutres en fonction du chargement

| charge en KN | METHODE AVANCEE SAFIR | | METHODE SIMPLIFIE POTFIRE |
|--------------|----------------------------|---|---|
| | poteau carré en béton armé | poteau en profil creux remplis de béton carré | poteau en profil creux remplis de béton carré |
| 700 | 3971 | 3880 | 5460 |
| 800 | 3635 | 3541 | 5040 |
| 900 | 3345 | 3244 | 4680 |

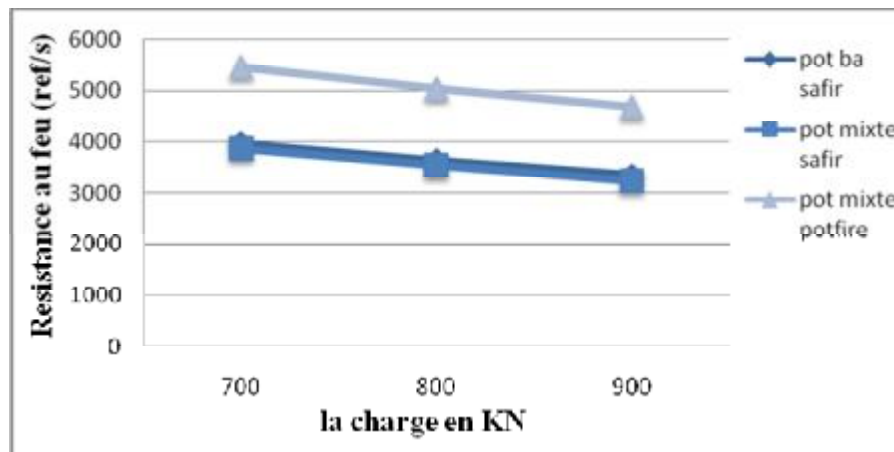


Figure 5.28 : Influence du chargement sur la résistance au feu

L'effet de la charge est insignifiant pour les deux types de section en béton armé et mixte évalués par élément fini, la courbe est décroissante fonction de la charge et présente un aspect monotone. La même remarque est valable pour les résultats obtenus à partir de la méthode simplifiée dans ce cas la charge est assez simple puisque il n'y a qu'une translation de la courbe pour optimiser les paramètres influents sur le comportement.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné les principes généraux de la méthode avancée évaluant le comportement des poutres en acier et en acier partiellement enrobé de béton ,et les poteaux en béton armé et en profil creux rempli de béton ; et plus précisément les méthodes numériques . Nous avons réalisé des études paramétriques sur la résistance des éléments de structure poutre et poteau sous feu à l'aide des logiciels SAFIR qui est basé sur la méthode des éléments finis. Les résultats obtenues à l'aide de ces logiciels ont permis de montrer l'incidence de certains paramètres sur la résistance au feu des poutres et poteaux.

Pour les poutres :

- L'augmentation de la hauteur dans les sections en acier et mixte auront un effet majeur sur la résistance au feu des deux types de poutres en fonction du temps de résistance. Donc l'augmentation de la section provoque plus de résistance aux poutres. L'impact des conditions aux limites est assez important. La poutre encadrée présente une résistance plus grande que la poutre simplement appuyée.
- Le chargement a une influence négative sur la résistance au feu par dans les deux types de poutres ; l'augmentation de la charge provoque une diminution de la durée de résistance et l'impact des conditions aux limites et toujours très important.
- la nuance des aciers influe considérablement lorsque la poutre est encadrée. Les conditions aux limites favorisent le comportement de la poutre encadrée par rapport à la poutre simplement appuyée.
- une dégradation de la résistance au feu fonction de l'augmentation du portée est constatée, la poutre encadrée mixte est toujours favorable par rapport à la poutre simplement appuyée.

La considération des conditions en limites montre que l'analyse d'un élément est complètement différente de la considération de l'analyse d'une structure.

Pour les poteaux :

- L'excentricité de la charge dans les poteaux en béton armé et profil creux remplis de béton provoque une petite diminution de la résistance au feu. Les résultats obtenus par la méthode simplifiée nécessite plus de sécurité par rapport au ceux obtenus par la méthode des éléments finis.

- L'augmentation de la charge provoque une diminution de la résistance des poteaux en béton armé et à profil creux rempli de béton. Les résultats obtenus par la méthode simplifiée restent toujours loin de ceux obtenus numériquement.

Ces deux dernières remarques nous précisent qu'il faut réellement des méthodes avancées pour pouvoir estimer convenablement la résistance au feu.

Les méthodes simplifiées nous donnent des indications sur la résistance au feu.

✓ **Conclusion Générale :**

Dans ce mémoire nous avons tout d'abord défini les différents paramètres intervenants dans le déroulement d'un incendie (combustible, carburant, source d'inflammation) ainsi que les phases qui caractérisent le développement d'un incendie (une phase constante, une phase croissante et la généralisation du feu). L'incendie en tant que sollicitation sur une structure ou un élément de structure est définie par l'Eurocode à savoir un feu ISO834, feu paramétré et feu naturel.

Donc dans notre analyse nous avons que nos éléments de structure sont sollicités par le feu normalisé ISO834. La façon la plus simple de représenter cette sollicitation thermique est d'utiliser la relation préconisée par l'Eurocode permettant d'évaluer la température fonction de l'évolution du temps.

Concernant l'action mécanique nous avons considéré les orientations spécifiées par 'Eurocode 1. Bases du calcul et actions sur les structures Partie 2-2 : Actions sur les structures'. Pour notre étude les modèles de comportement des différents matériaux composants les éléments de structure en béton ou mixte sous influence du feu existant au sein de l'Eurocode ont été pris en considération à savoir : (résistance Béton ordinaire et de l'acier, déformation du béton et de l'acier, dilatation thermique du béton et de l'acier, Conductivité thermique du béton et de l'acier.....).

Ceci nous a permis d'identifier l'action thermique sur les éléments de structure ainsi que les modèles de comportement des matériaux utilisés dans ces derniers.

L'analyse bibliographique nous a permis de nous situer notre étude vis-à-vis des différentes recherches réalisées. Et que Des modèles de calcul couplés entre le comportement thermique et le comportement mécanique sont inexistantes.

Nous avons considéré le comportement mécanique des structures sous feu qui s'articule selon trois approches différentes :

- Analyse par éléments séparés la liaison avec les autres éléments sera remplacée par les conditions aux limites appropriées.
- Analyse de parties de la structure, une partie de la structure sera directement prise en compte. Des conditions aux limites appropriées pour représenter sa liaison avec le reste de la structure seront considérées
- Analyse de structure globale, dans laquelle la structure totale sera utilisée dans le calcul

Ceci nous a permis d'orienter notre travail sur les éléments de structure à savoir les poteaux en béton et les poteaux mixte ainsi que les poutres en béton et les poutres mixte selon différentes conditions aux limites. Nous avons utilisé dans notre approche pour l'évaluation de la résistance au feu des éléments de structures la méthode simplifiée dans un premier temps, dans un deuxième palier une autre méthode basée sur l'Eurocode 2 annexe B en terme de comportement mécanique et un modèle thermique basé sur les différences finies, pour conclure nous avons utilisé les méthodes de calcul avancée basée sur les éléments finis.

Une analyse utilisant deux logiciels CIMFEU et POTFIRE nous a permis de mettre en évidence l'influence des paramètres suivant sur la résistance d'un élément de structure sous l'influence d'un feu.

- L'augmentation du côté de la section carrée ou du diamètre d'une section circulaire a un effet positif sur la résistance du poteau en béton ou mixte sous l'influence du feu normalisé.
- La section carrée a un meilleur comportement que la section circulaire.
- Durant les 30 premières minutes l'augmentation de l'enrobage a un effet négatif sur la résistance pour les deux types de poteaux. Mais après cette durée d'exposition les deux sections réagissent favorablement, la résistance augmente vis-à-vis du feu.
- La résistance du béton influe positivement dans la résistance au feu.
- La limite élastique intervient considérablement sur la résistance au feu des poteaux en béton armé et insignifiante dans le poteau de section mixte.
- L'augmentation de la section d'armature augmenta la résistance au feu
- L'augmentation de l'épaisseur des parois en aciers dans les sections creuse remplis de béton a une influence uniquement durant les 30 premières minutes après la dégradation de la résistance est très appréciable.
- La teneur en eau n'a pas d'incidence palpable sur la résistance.
- La longueur de flambement n'a aucune incidence sur la résistance au feu des deux types de poteau considéré.

Nous avons considéré une analyse par une méthode avancée basée sur la méthode des éléments finis pour des éléments de structures poteau (béton armé et creux remplis de béton) et poutres en béton et structure mixte, et ceci nous a permis d'émettre les conclusions suivantes :

- L'augmentation des sections d'acier dans les deux types de poteaux a une incidence positive sur la résistance des poteaux sous l'influence du feu.
- L'augmentation de la charge sollicitant les deux poteaux influe d'une manière négative la résistance au feu.
- L'augmentation de la charge provoque une diminution de la résistance.
- L'effet d'excentricité de la charge pour les poteaux provoque une petite diminution de la résistance.
- Les conditions aux limites ont un effet considérable sur la résistance au feu
- La poutre mixte a un meilleur comportement que la poutre en béton
- L'effet de la portée a une incidence négative sur le comportement de la structure.

La comparaison des résultats donnés par le Logiciel POTFIRE par rapport aux résultats donnés par un modèle basé sur les éléments finis montre que ce Logiciel donne des résultats très éloignés de ceux obtenus par éléments finis. Donc ces résultats ne sont pas fiables et ne sont pas préventif.

✓ **Perspectives :**

Après notre analyse par élément de structure sous influence du feu nous pouvons émettre les perspectives suivantes dans l'optique de la continuité et d'approfondissement de ce travail :

- Analyse par parties des structures sous feu
- Analyse globale des structures sous feu
- Analyse de l'évolution de la température après feu.

Référence

- [1] L. SCHOONBAERT. Fire safety engineering une solution pour le futur.
- [2] Cours de protection contre l'incendie destiné aux préventionnistes incendie, <http://www.aresu.be/>, Helid Aresu de Seui.
- [3] Sobane. Fiche 1 d'observation le triangle du feu et les principes d'extinction 2004.
- [4] thèse SEKKIOU SOUMAYA. Etude de comportement des poteaux mixte (acier-béton) compte tenu d'une exigence au feu.
- [5] L.G. Cajot, M. Haller & M. Pierre Projet DIFISEK Partie 1: Actions thermiques et mécaniques PROFILARBED S.A, Esch/Alzette, Grand Duché du Luxembourg
- [6] Loïc Thomas Guy Archambault .sécurité incendie Collection Mémentos acier .Nouvelle édition 2005.
- [7] Eurocode 1. Bases du calcul.et actions sur les structures Partie 2-2 : Actions sur les structures —Actions sur les structures exposées au feu. Décembre 1997.
- [8] B. ZHAO. Projet DIFISEK Partie 3: Comportement mécanique au feu. CTICM – Centre Technique de la Construction Métallique, France
- [9] Ir Jean-François Denoël. Sécurité incendie et constructions en béton Choix du béton, FEBELCEM Fédération de l'industrie cimentière belge.
- [10] Eurocode 2. Calcul des structures en béton et Document d'Application Nationale Partie 1-2 : Règles générales, Calcul du comportement au feu Février 2001
- [11] Eurocode 3. Calcul des structures en acier et document d'application nationale Partie 1-2 : Règles générales - Calcul du comportement au feu.
- [12] Timothy Mark Jennings .UT Fire a Preprocessor for SAFIR2007, for Analysis of Heat Transfer for Structural Members Exposed to Fire. The University of Texas at Austin December 2009
- [13] D. Dhima, 'calcul simplifié de a température critique selon la norme XP ENV 1993-1-2', revue de construction métallique, n°3-1999.
- [14] Daniel Joyeux 'Détermination de la température des structures métalliques en situation d'incendie selon l'EUROCODE 3', revue de construction métallique, n°3-1999.
- [15] Daniel Joyeux, Marion Fontana, Louis-Guy Cajot 'Evaluation des comportements des structures sous incendies naturels' revue de construction métallique, n°3-1999.

- [16] Jean Marie Aribert 'Alternative françaises à l'EUROCODE pour un calcul simplifié à l'incendie des poteaux mixte à profils creux remplis de béton', Colloque international de Timisoara, "L'acier dans les constructions modernes", 13-15 Octobre 2005
- [17] J.Krippa, L.Twilt, J.B.Schleich 'Vers une conception des ouvrages par l'ingénierie incendie' revue de construction métallique, n°3-1999.
- [18] Ch. Renaud, D. Joyeux, 'stabilité au feu d'élément de structure métallique tendu ou en flexion simple sans protection' revue de construction métallique, n°1-2002.
- [19] Wahid Nechnech, Thèse de Doctorat, 'Contribution à l'étude numérique du comportement du béton et des structures en béton armé soumises à des sollicitations thermique et mécanique couplées : une approche thermo-élasto-plastique endommageable' Déc. 2000 INSA Lyon
- [20] Bo Wu, Yu- ye Xu, 'Behavior of axially-and-rotationally restrained concrete columns with '+'-shaped cross section and subjected to fire' Fire Safety Journal vol, 44 pp, 212–218, (2009)
- [21] B. Wu, J.Z. Lu, 'a numerical study of the behaviour of restrained RC beams at elevated temperatures' Fire Safety Journal vol 44 issue n°4, pp, 522-531,(2009)
- [22] J. M. Franssen, J. C. Dotreppe, 'Fire test and calculation method for circular concrete method' Fire technologie, 39,pp 89-97,2003.
- [23] FRANSSEN, J.M. "*Etude du comportement au feu des structures mixtes acier-béton*", Thèse de Doctorat, université de Liège, 1987.
- [24] HAN, L.H. "Fire Resistance of Concrete Filled Steel Tubular Beam-Columns", Internal Report of Chinese Nation Natural Science Foundation, Beijing, 1996.
- [25] LIE, T.T. et CHABOT, M "A method to predict the Fire Resistance of Circular Concrete Filled Hollow Steel Columns", *Journal of fire protection Engineering*, 2 (4), 1990.
- [26] LIE, T.T., et STRINGER, D.C. "Calculation of fire resistance of steel hollow structural steel columns with plain concrete", *Can. J. Civ. Engrg.*, 21(3), p.382-385, 1994.
- [27] O'MEAGHER, A.J., BENNETTS, I.D. et STEVEN, L.K. "*Modeling of concrete -filled tubular columns in fire* », BHPR/ENG/R/91/031/PS69,1991.
- [28] QUAST U., HASS R. et RUDOPH K. "A computer program for the determination of load bearing and deformation behaviour of uniaxial structural elements under fire action", Technical University Braunschweig, 1986.
- [29] SCHLEICH, J.B. "Computer assisted analysis of the fire resistance of steel and composite concrete steelstructures", CEC Research Report EUR 10828, EN, Luxembourg, 1987.

- [30] GRIMAULT, J.P. « *Stabilité au feu des poteaux mixtes avec profils creux remplis de béton – Proposition de prise en compte de l'influence des petites excentricités ou des faibles moments* », Document CIDECT n°15B-81/4, 1981.301
- [31] GRIMAULT, J.P.« *Calcul à l'incendie des profils creux remplis de béton* », Notice 1092 de la chambre syndicale des fabricants de tubes d'acier, Manuel pratique, 1982.
- [32] TWILT, L. et HAAR, P.W. « *Analysis of the Discrepancy between the French and German Calculation Methods for the Fire Resistance of concrete Filled Steel columns* », IBBC-TNO-report n° B-84-480, september 1984.
- [33] TWILT, L. et HAAR, P.W. « *The effect of the Mechanical Properties and the thermal Induced stresses on the Discrepancy between the French and German Calculation Methods for the Fire Resistance of concrete Filled Steel columns* », IBBC-TNO-report n° B-85-93, March1985
- [34] DTU FEU POTEAUX MIXTES « *Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des poteaux mixtes (acier + béton)* », Règles FPM 88, Revue Construction Métallique n°3, 1988.
- [35] Fascicule d'utilisation du logiciel CIM'Feu EC2 prévision par le calcul de la résistance au feu des structures en béton. Septembre 2009.
- [36] J .P ROGER modélisation numérique HORNEC 2001.
- [37] manuel d'utilisation du logiciel Potfire calcul des poteaux creux remplis de béton.
- [38] EN1994 1-2, EUROCODE 4. 2005 Calcul des structures mixtes acier-béton :Règles générales, Calcul du comportement au feu, Partie 1-2.
- [39] RENAUD CHRISTOPHE thèse modélisation numériques, expérimentation et dimensionnement pratique des poteaux mixtes avec profil creux exposés à l'incendie juillet 2003.
- [40] J.M. FRANSSSEN user's manual for safir 2007 a computer program for analysis of structures subjected to fire april 2007.

ANNEXE A « LES FICHIERS DONNEES THERMALS »

POUTRE EN BETON ARME :

inputfile safir_thermal_2d_analysis

```
nnode 21
ndim 2
nddlmax 3
every_node 3
  from 12 to 12 step 1 nddl 1
  from 13 to 13 step 1 nddl 1
  from 14 to 14 step 1 nddl 1
  from 15 to 15 step 1 nddl 1
  from 16 to 16 step 1 nddl 1
  from 17 to 17 step 1 nddl 1
  from 18 to 18 step 1 nddl 1
  from 19 to 19 step 1 nddl 1
  from 20 to 20 step 1 nddl 1
  from 21 to 21 step 1 nddl 1
end_nddl
static pure_nr
nload 1
oblique 0
comeback 1.0
renumgeo 1
nmat 2
elements
  beam 10 1
  ng 2
  nfiber 1800
end_elem
nodes
  node 1 6.0000 0.0000
  node 2 5.4000 0.0000
  node 3 4.8000 0.0000
  node 4 4.2000 0.0000
  node 5 3.6000 0.0000
  node 6 3.0000 0.0000
  node 7 2.4000 0.0000
  node 8 1.8000 0.0000
```

```

node 9 1.2000 0.0000
node 10 0.6000 0.0000
node 11 0.0000 0.0000
node 12 0.3000 0.0000
node 13 0.9000 0.0000
node 14 1.5000 0.0000
node 15 2.1000 0.0000
node 16 2.7000 0.0000
node 17 3.3000 0.0000
node 18 3.9000 0.0000
node 19 4.5000 0.0000
node 20 5.1000 0.0000
node 21 5.7000 0.0000
fixations
block 1 no f0 no
block 11 f0 f0 no
end_fix
nodofbeam
section.tem
translate 1 1
translate 2 2
end_trans
elem 1 11 12 10 1
elem 2 10 13 9 1
elem 3 9 14 8 1
elem 4 8 15 7 1
elem 5 7 16 6 1
elem 6 6 17 5 1
elem 7 5 18 4 1
elem 8 4 19 3 1
elem 9 3 20 2 1
elem 10 2 21 1 1
precision 1.0e-3
loads
function fl
distrbeam 1 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 2 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 3 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 4 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 5 0.00e+00 -4.00e+04 0.0

```

```

distrbeam 6 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 7 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 8 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 9 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 10 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
end_load
materials
calconcec2
    3.00e-01 3.00e+07 0.00e+00 0.0
steelec2
    2.10e+11 3.00e-01 5.00e+08 1200. 0.
time
    60.0 7200.0
endtime
epsth
impression
timeprint
    60.0 7200.0
end_timepr
printreact
printmn

```

POUTRE EN ACIER :

```

inputfile safir_thermal_2d_analysis

nnode 21
ndim 2
nddlmax 3
every_node 3
    from 12 to 12 step 1 nddl 1
    from 13 to 13 step 1 nddl 1
    from 14 to 14 step 1 nddl 1
    from 15 to 15 step 1 nddl 1
    from 16 to 16 step 1 nddl 1
    from 17 to 17 step 1 nddl 1
    from 18 to 18 step 1 nddl 1
    from 19 to 19 step 1 nddl 1
    from 20 to 20 step 1 nddl 1
    from 21 to 21 step 1 nddl 1
end_nddl
static pure_nr

```

```

nload 1
oblique 0
comeback 1.0
renumgeo 1
  nmat 1
elements
  beam 10 1
  ng 2
  nfiber 1160
end_elem
nodes
node 1 6.0000 0.0000
node 2 5.4000 0.0000
node 3 4.8000 0.0000
node 4 4.2000 0.0000
node 5 3.6000 0.0000
node 6 3.0000 0.0000
node 7 2.4000 0.0000
node 8 1.8000 0.0000
node 9 1.2000 0.0000
node 10 0.6000 0.0000
node 11 0.0000 0.0000
node 12 0.3000 0.0000
node 13 0.9000 0.0000
node 14 1.5000 0.0000
node 15 2.1000 0.0000
node 16 2.7000 0.0000
node 17 3.3000 0.0000
node 18 3.9000 0.0000
node 19 4.5000 0.0000
node 20 5.1000 0.0000
node 21 5.7000 0.0000
fixations
  block 1 no f0 no
  block 11 f0 f0 no
end_fix
nodofbeam
profilheb600.tem
translate 1 1
end_trans

```



```

elem 1 11 12 10 1
elem 2 10 13 9 1
elem 3 9 14 8 1
elem 4 8 15 7 1
elem 5 7 16 6 1
elem 6 6 17 5 1
elem 7 5 18 4 1
elem 8 4 19 3 1
elem 9 3 20 2 1
elem 10 2 21 1 1
precision 1.0e-3
loads
function f1
distrbeam 1 0.00e+00 -30.00e+04 0.0
distrbeam 2 0.00e+00 -30.00e+04 0.0
distrbeam 3 0.00e+00 -30.00e+04 0.0
distrbeam 4 0.00e+00 -30.00e+04 0.0
distrbeam 5 0.00e+00 -30.00e+04 0.0
distrbeam 6 0.00e+00 -30.00e+04 0.0
distrbeam 7 0.00e+00 -30.00e+04 0.0
distrbeam 8 0.00e+00 -30.00e+04 0.0
distrbeam 9 0.00e+00 -30.00e+04 0.0
distrbeam 10 0.00e+00 -30.00e+04 0.0
end_load
materials
steelec3
210.e9 0.3 355.0e6 1200. 0.
time
1.0 4800
endtime
epsth
impression
timeprint
1.0 4800
end_timepr
printreact
printmn

```

POUTRE MIXTE :

section: mixte

file generated by ut fire for use by safir

use at your own risk

```
nnode 1239
ndim 2
ndofmax 1
  from 1 to 1239 step 1 ndof 1
end_ndof
temperat
  teta 0.9
tinitial 20
make.tem
norenum
mixte.tem
  nmat 3
elements
  solid 1160
  ng 2
```

POTEAU EN BETON ARME :

section: carre

file generated by safir

```
nnode 529
ndim 2
ndofmax 1
  from 1 to 529 step 1 ndof 1
end_ndof
temperat
  teta 0.9
tinitial 20
make.tem
norenum
carre.tem
  nmat 2
elements
  solid 484
  ng 2
nvoid 0
end_elem
nodes
  node 1 0.15 -0.15
```

node 2 -0.15 0.15
node 3 -0.150001 -0.15
node 4 0.150001 0.15
node 5 -0.14 -0.15
node 6 -0.14 0.15
node 7 -0.13 -0.15
node 8 -0.13 0.15
node 9 -0.12 -0.15
node 10 -0.12 0.15
node 11 -0.11 -0.15
node 12 -0.11 0.15
node 13 -0.1 -0.15
node 14 -0.1 0.15
node 15 -0.09 -0.15
node 16 -0.09 0.15
node 17 -0.08 -0.15
node 18 -0.08 0.15
node 19 -0.06 -0.15
node 20 -0.06 0.15
node 21 -0.04 -0.15
node 22 -0.04 0.15
node 23 -0.02 -0.15
node 24 -0.02 0.15
node 25 0 -0.15
node 26 0 0.15
node 27 0.02 -0.15
node 28 0.02 0.15
node 29 0.04 -0.15
node 30 0.04 0.15
node 31 0.06 -0.15
node 32 0.06 0.15
node 33 0.08 -0.15
node 34 0.08 0.15
node 35 0.09 -0.15
node 36 0.09 0.15
node 37 0.1 -0.15
node 38 0.1 0.15
node 39 0.11 -0.15
node 40 0.11 0.15
node 41 0.12 -0.15

node 42 0.12 0.15
node 43 0.13 -0.15
node 44 0.13 0.15
node 45 0.14 -0.15
node 46 0.14 0.15
node 47 0.14 -0.14
node 48 0.15 -0.14
node 49 -0.15 -0.14
node 50 -0.14 -0.14
node 51 -0.13 -0.14
node 52 -0.12 -0.14
node 53 -0.11 -0.14
node 54 -0.1 -0.14
node 55 -0.09 -0.14
node 56 -0.08 -0.14
node 57 -0.06 -0.14
node 58 -0.04 -0.14
node 59 -0.02 -0.14
node 60 0 -0.14
node 61 0.02 -0.14
node 62 0.04 -0.14
node 63 0.06 -0.14
node 64 0.08 -0.14
node 65 0.09 -0.14
node 66 0.1 -0.14
node 67 0.11 -0.14
node 68 0.12 -0.14
node 69 0.13 -0.14
node 70 0.14 -0.13
node 71 0.15 -0.13
node 72 -0.15 -0.13
node 73 -0.14 -0.13
node 74 -0.13 -0.13
node 75 -0.12 -0.13
node 76 -0.11 -0.13
node 77 -0.1 -0.13
node 78 -0.09 -0.13
node 79 -0.08 -0.13
node 80 -0.06 -0.13
node 81 -0.04 -0.13

node 82 -0.02 -0.13
node 83 0 -0.13
node 84 0.02 -0.13
node 85 0.04 -0.13
node 86 0.06 -0.13
node 87 0.08 -0.13
node 88 0.09 -0.13
node 89 0.1 -0.13
node 90 0.11 -0.13
node 91 0.12 -0.13
node 92 0.13 -0.13
node 93 0.14 -0.12
node 94 0.15 -0.12
node 95 -0.15 -0.12
node 96 -0.14 -0.12
node 97 -0.13 -0.12
node 98 -0.12 -0.12
node 99 -0.11 -0.12
node 100 -0.1 -0.12
node 101 -0.09 -0.12
node 102 -0.08 -0.12
node 103 -0.06 -0.12
node 104 -0.04 -0.12
node 105 -0.02 -0.12
node 106 0 -0.12
node 107 0.02 -0.12
node 108 0.04 -0.12
node 109 0.06 -0.12
node 110 0.08 -0.12
node 111 0.09 -0.12
node 112 0.1 -0.12
node 113 0.11 -0.12
node 114 0.12 -0.12
node 115 0.13 -0.12
node 116 0.14 -0.11
node 117 0.15 -0.11
node 118 -0.15 -0.11
node 119 -0.14 -0.11
node 120 -0.13 -0.11
node 121 -0.12 -0.11

node 122 -0.11 -0.11
node 123 -0.1 -0.11
node 124 -0.09 -0.11
node 125 -0.08 -0.11
node 126 -0.06 -0.11
node 127 -0.04 -0.11
node 128 -0.02 -0.11
node 129 0 -0.11
node 130 0.02 -0.11
node 131 0.04 -0.11
node 132 0.06 -0.11
node 133 0.08 -0.11
node 134 0.09 -0.11
node 135 0.1 -0.11
node 136 0.11 -0.11
node 137 0.12 -0.11
node 138 0.13 -0.11
node 139 0.14 -0.1
node 140 0.15 -0.1
node 141 -0.15 -0.1
node 142 -0.14 -0.1
node 143 -0.13 -0.1
node 144 -0.12 -0.1
node 145 -0.11 -0.1
node 146 -0.1 -0.1
node 147 -0.09 -0.1
node 148 -0.08 -0.1
node 149 -0.06 -0.1
node 150 -0.04 -0.1
node 151 -0.02 -0.1
node 152 0 -0.1
node 153 0.02 -0.1
node 154 0.04 -0.1
node 155 0.06 -0.1
node 156 0.08 -0.1
node 157 0.09 -0.1
node 158 0.1 -0.1
node 159 0.11 -0.1
node 160 0.12 -0.1
node 161 0.13 -0.1

node 162 0.14 -0.09
node 163 0.15 -0.09
node 164 -0.15 -0.09
node 165 -0.14 -0.09
node 166 -0.13 -0.09
node 167 -0.12 -0.09
node 168 -0.11 -0.09
node 169 -0.1 -0.09
node 170 -0.09 -0.09
node 171 -0.08 -0.09
node 172 -0.06 -0.09
node 173 -0.04 -0.09
node 174 -0.02 -0.09
node 175 0 -0.09
node 176 0.02 -0.09
node 177 0.04 -0.09
node 178 0.06 -0.09
node 179 0.08 -0.09
node 180 0.09 -0.09
node 181 0.1 -0.09
node 182 0.11 -0.09
node 183 0.12 -0.09
node 184 0.13 -0.09
node 185 0.14 -0.08
node 186 0.15 -0.08
node 187 -0.15 -0.08
node 188 -0.14 -0.08
node 189 -0.13 -0.08
node 190 -0.12 -0.08
node 191 -0.11 -0.08
node 192 -0.1 -0.08
node 193 -0.09 -0.08
node 194 -0.08 -0.08
node 195 -0.06 -0.08
node 196 -0.04 -0.08
node 197 -0.02 -0.08
node 198 0 -0.08
node 199 0.02 -0.08
node 200 0.04 -0.08
node 201 0.06 -0.08

node 202 0.08 -0.08
node 203 0.09 -0.08
node 204 0.1 -0.08
node 205 0.11 -0.08
node 206 0.12 -0.08
node 207 0.13 -0.08
node 208 0.14 -0.06
node 209 0.15 -0.06
node 210 -0.15 -0.06
node 211 -0.14 -0.06
node 212 -0.13 -0.06
node 213 -0.12 -0.06
node 214 -0.11 -0.06
node 215 -0.1 -0.06
node 216 -0.09 -0.06
node 217 -0.08 -0.06
node 218 -0.06 -0.06
node 219 -0.04 -0.06
node 220 -0.02 -0.06
node 221 0 -0.06
node 222 0.02 -0.06
node 223 0.04 -0.06
node 224 0.06 -0.06
node 225 0.08 -0.06
node 226 0.09 -0.06
node 227 0.1 -0.06
node 228 0.11 -0.06
node 229 0.12 -0.06
node 230 0.13 -0.06
node 231 0.14 -0.04
node 232 0.15 -0.04
node 233 -0.15 -0.04
node 234 -0.14 -0.04
node 235 -0.13 -0.04
node 236 -0.12 -0.04
node 237 -0.11 -0.04
node 238 -0.1 -0.04
node 239 -0.09 -0.04
node 240 -0.08 -0.04
node 241 -0.06 -0.04


```
f 470 no fiso no no
f 471 no fiso no no
f 472 no fiso no no
f 473 no fiso no no
f 474 no fiso no no
f 475 no fiso no no
f 476 no fiso no no
f 477 no fiso no no
f 478 no fiso no no
f 479 no fiso no no
f 480 no fiso no no
f 481 no fiso no no
f 482 no fiso no no
f 483 no fiso no no
f 484 no fiso no no
end_front
symmetry
end_sym
precision 1.e-3
materials
silconcec2
    46. 25. 9. .56
steelec2
    25. 9. .50
time
    60 4800
end_time
impression
timeprint
    120 4800
end_timepr
```

ANNEXE B « LES FICHIERS DONNEES STRUCTURELS »

POUTRE :

a perfectly straight column loaded with an excentricity of 1 cm on both supports (uniform moment on the length))

see nodeline file sect_axial

see nodeload in this file

input file for safir2007

```
nnode 21
ndim 2
ndofmax 3
  from 1 to 21 step 2 nddl 3
  from 2 to 20 step 2 nddl 1
end_ndof
static pure_nr
nload 1
oblique 0
comeback 1.
norenum
nmat 2
elements
  beam 10 1
  ng 2
  nfiber 484
end_elem
nodes
  node 1 0.00000 0.00000
  gnode 21 0.00000 4.00000 1
fixations
  block 1 f0 f0 no
  block 21 f0 no no
end_fix
nodofbeam
carreut.tem
translate 1 1
translate 2 2
end_trans
elem 1 1 2 3 1
gelem 10 19 20 21 1 2
```

```

precision 1.e-4
loads
function fload
nodeload 21 0. -800000. 9000.
end_load
materials
silconcec2
0.2 25.e6 0. 0.
steelec3
210.e9 0.3 500.0e6 1200. 0.
time
5. 20.
12. 32.
16. 4800.
endtime
epsth
output
timeprint
1. 4800.
end_timepr
printmn
prneibeam
printreact
prnepmbm 5 2
prnsigabm 5 2
printet 5 2

```

POTEAU :

inputfile created with safir_2007

safir_structuel_2d_analysis

```

nnode 21
ndim 2
nddlmax 3
every_node 3
from 12 to 12 step 1 nddl 1
from 13 to 13 step 1 nddl 1
from 14 to 14 step 1 nddl 1
from 15 to 15 step 1 nddl 1
from 16 to 16 step 1 nddl 1
from 17 to 17 step 1 nddl 1

```

```

    from 18 to 18 step 1 nddl 1
    from 19 to 19 step 1 nddl 1
    from 20 to 20 step 1 nddl 1
    from 21 to 21 step 1 nddl 1
end_nddl
static pure_nr
  nload 1
  oblique 0
  comeback 1.0
renumgeo 1
  nmat 2
elements
  beam 10 1
  ng 2
  nfiber 1800
end_elem
nodes
  node 1 6.0000 0.0000
  node 2 5.4000 0.0000
  node 3 4.8000 0.0000
  node 4 4.2000 0.0000
  node 5 3.6000 0.0000
  node 6 3.0000 0.0000
  node 7 2.4000 0.0000
  node 8 1.8000 0.0000
  node 9 1.2000 0.0000
  node 10 0.6000 0.0000
  node 11 0.0000 0.0000
  node 12 0.3000 0.0000
  node 13 0.9000 0.0000
  node 14 1.5000 0.0000
  node 15 2.1000 0.0000
  node 16 2.7000 0.0000
  node 17 3.3000 0.0000
  node 18 3.9000 0.0000
  node 19 4.5000 0.0000
  node 20 5.1000 0.0000
  node 21 5.7000 0.0000
fixations
  block 1 f0 f0 f0

```

```

    block 11 f0 f0 f0
end_fix
nodofbeam
section.tem
translate 1 1
translate 2 2
end_trans
    elem 1 11 12 10 1
    elem 2 10 13 9 1
    elem 3 9 14 8 1
    elem 4 8 15 7 1
    elem 5 7 16 6 1
    elem 6 6 17 5 1
    elem 7 5 18 4 1
    elem 8 4 19 3 1
    elem 9 3 20 2 1
    elem 10 2 21 1 1
precision 1.0e-3
loads
function f1
distrbeam 1 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 2 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 3 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 4 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 5 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 6 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 7 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 8 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 9 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
distrbeam 10 0.00e+00 -4.00e+04 0.0
end_load
materials
calconcec2
    3.00e-01 3.00e+07 0.00e+00 0.0
steelec2
    2.10e+11 3.00e-01 5.00e+08 1200. 0.
time
120.0 18000.0
endtime
epsth

```

```
impression
timeprint
  120.0 18000.0
end_timepr
printreact
  printmn
```