

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة حسيبة بن بوعلي - الشلف
Université Hassiba Benbouali – Chlef
كلية الهندسة المدنية و المعمارية
Faculté de Génie Civil et d'Architecture
قسم الهندسة المدنية
Département de Génie-civil



Mémoire de Master
Filière : Génie civil
Spécialité : Structures

Présenté par

-TEGguer WISSAL

-BENIZZA SARRA

Thème

**ETUDE DU COMPORTEMENT AU FEU DE STRUCTURE
EN ALUMINIUM AVEC POTEaux MIXTES**

Soutenue le 29/06/2025, devant le jury composé de :

SETTI Bakhti	Maitre-Assistant (A)	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Président
KADA Abdelhak	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Examineur
LAMRI Belkacem	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Encadrant

Promotion : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, nous adressons notre profonde reconnaissance à Dieu le Tout-Puissant, pour nous avoir guidés, accordé la patience, la force et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

*Nous souhaitons exprimer notre plus sincère gratitude à notre encadreur, Monsieur le Professeur **LAMRI Belkacem**, pour son accompagnement, sa disponibilité et ses conseils précieux tout au long de ce travail. Son engagement et son soutien ont grandement contribué à l'avancement et à la qualité de notre mémoire. Nous lui témoignons tout notre respect et notre reconnaissance pour avoir accepté de suivre et d'évaluer notre projet. Nous remercions aussi Professeur **KADA Abdelhak** qui nous a introduits dans le domaine de l'Ingénierie Incendie par le biais de son cours de M1.*

Nous tenons aussi à remercier le Président et les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre travail et pour l'attention qu'ils y porteront.

*Nous remercions également tous les chercheurs du laboratoire Ingénierie de la Sécurité Incendie des Constructions et Protection de leur Environnement Urbain et Périurbain (**LISICPE**) et en particulier le doctorant Musab S., pour son aide précieuse et son soutien qui ont été déterminant dans la réalisation de ce mémoire.*

Enfin, nous exprimons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire, par leur aide, leur soutien moral ou leurs encouragements.

DEDICACES

Avant tout, je rends grâce à Dieu, Le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et le courage nécessaires pour franchir toutes les étapes de mon parcours.

Je dédie ce modeste travail avec une immense gratitude :

- À mes parents bien-aimés, les êtres les plus précieux à mon cœur. Leur amour inconditionnel, leurs sacrifices constants et leur soutien indéfectible ont été ma plus grande source de motivation.*
- À mes frères et sœurs adorés — Abderrahmane, Madjid, Amine, et Liliane — dont l'affection, la présence et les encouragements m'ont accompagné à chaque étape. Leur soutien m'a donné la force de persévérer.*
- À l'ensemble de mes enseignants, depuis les premiers bancs de l'école jusqu'aux amphithéâtres universitaires. Je leur témoigne tout mon respect et ma reconnaissance pour les savoirs transmis et la qualité de leur encadrement.*

Ce travail est l'aboutissement d'un long chemin, et je le partage avec tous ceux qui ont cru en moi.

TEGGUER WISSAL

DEDICACES

Je dédie ce mémoire avec une profonde gratitude à mes parents, pour leur amour inestimable, leur soutien constant et leurs sacrifices qui ont été le pilier de mon parcours. À mes sœurs et mon frère, dont la tendresse, l'encouragement et la présence bienveillante m'ont portée dans les moments difficiles. À mes amis, pour leur fidélité, leur écoute et leurs mots réconfortants tout au long de cette aventure. Et en particulier, je rends un hommage sincère et émouvant à ma chère cousine disparue, dont le souvenir reste gravé dans mon cœur. Que Dieu lui accorde Sa miséricorde et l'accueille en Son vaste paradis.

BENIZZA SARRA

RESUME

Les structures en aluminium trouvent une application croissante dans le domaine du bâtiment et de l'ingénierie civile, grâce à leur légèreté et leur résistance mécanique. Cependant, sous l'effet du feu, les propriétés thermomécaniques de l'aluminium évoluent rapidement, ce qui peut compromettre la stabilité des structures. Pour pallier à ces limites, l'utilisation de protections combinant aluminium et béton, permet d'améliorer la performance au feu des structures.

Ce travail consiste à étudier analytiquement et numériquement le comportement au feu des structures en portiques en aluminium avec des poteaux mixtes en prenant le matériau béton comme protection. L'objectif est d'analyser la réponse thermique et mécanique de portiques en aluminium soumis soit à un feu standard ou un feu paramétrique, ainsi que l'influence de la protection des éléments structuraux sur le comportement thermique. Il est utile aussi de mentionner que l'étude qui a été menée pour la détermination de la charge critique de la structure en fonction de la température. La modélisation numérique est réalisée, via le logiciel ANSYS en tenant compte des non-linéarités matérielles et géométriques.

Les résultats de cette étude ont mené à une bonne compréhension du comportement thermique et structural des structures en aluminium type portique en termes d'évolution de la température et de déplacements en fonction du temps. Elles ont contribué à mieux comprendre la tenue au feu des structures en aluminium soit à éléments structuraux protégés ou non et optimiser leur conception pour garantir la sécurité incendie.

Mots clés : Comportement, Structure en aluminium, Poteaux protégés, Incendie, Calcul analytique, MEF, Eurocode 9

ABSTRACT

Aluminium structures are finding increasing use in building and civil engineering, due to their lightweight and mechanical strength. However, under the effect of fire, the thermo-mechanical properties of aluminium change rapidly, which can compromise the stability of structures. To overcome these limitations, the use of protections combining aluminium and concrete makes it possible to improve the fire performance of structures.

This work consists of an analytical and numerical study of the fire behaviour of portal frame structures of aluminium with mixed columns, using concrete as protection. The aim is to analyse the thermal and mechanical response of aluminium portal frames subjected to either a standard fire or a parametric fire, as well as the influence of the protection of the structural elements on the thermal behaviour. It is also worth mentioning a study that was carried out to determine the critical load of the structure as a function of temperature. Numerical modelling was carried out using ANSYS software, taking account of material and geometric nonlinearities.

The results of this study have led to a good understanding of the thermal and structural behaviour of portal frame-type aluminium structures in terms of changes in temperature and displacements as a function of time. They have contributed to a better understanding of the fire resistance of aluminium structures, whether with protected or unprotected structural elements, and to optimising their design to guarantee fire safety.

Keywords: Behaviour, Aluminium structure, Protected columns, Fire, Analytical calculation, FEM, Eurocode 9

ملخص

يتزايد استخدام هياكل الألومنيوم في البناء والهندسة المدنية نظراً لخفة وزنها وقوتها الميكانيكية. لكن، تحت تأثير الحريق، تتغير الخصائص الميكانيكية الحرارية للألمنيوم بسرعة، مما قد يؤثر على استقرار الهياكل. للتغلب على هذه القيود، يتيح استخدام وسائل الحماية التي تجمع بين الألومنيوم والخرسانة إمكانية تحسين أداء الهياكل في حالة الحرائق.

يتألف هذا العمل من دراسة تحليلية ورقمية لسلوك الحرائق في هياكل الهياكل ذات الإطارات البابية المصنوعة من الألومنيوم مع أعمدة مختلطة باستخدام الخرسانة كحماية. الهدف هو تحليل الاستجابة الحرارية والميكانيكية لإطارات بوابات الألومنيوم التي تتعرض لحريق قياسي أو حريق بارامترية، وكذلك تأثير حماية العناصر الإنشائية على السلوك الحراري. تجدر الإشارة أيضاً إلى دراسة أجريت لتحديد الحمل الحرج للهيكلة كدالة لدرجة الحرارة. أُجريت النمذجة العددية باستخدام برنامج ANSYS، مع الأخذ بعين الاعتبار المواد واللامخيطيات الهندسية.

وقد أدت نتائج هذه الدراسة إلى فهم جيد للسلوك الحراري والهيكلي لهياكل الألومنيوم من نوع الإطار البابي من حيث التغيرات في درجة الحرارة والإزاحات كدالة للزمن. وقد ساهمت في فهم أفضل لمقاومة هياكل الألومنيوم للحريق، سواءً كانت ذات عناصر هيكلية محمية أو غير محمية، وتحسين تصميمها لضمان السلامة من الحرائق.

الكلمات المفتاحية: السلوك، هيكل من الألومنيوم، أعمدة محمية، حريق، حساب تحليلي، طريقة العناصر المحدودة، الكود الأوروبي 9

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	ii
DEDICACES	iii
DEDICACES	iv
RESUME	v
ABSTRACT	vi
ملخص	vii
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES TABLEAUX	xii
INTRODUCTION GENERALE	1
A. Problématique.....	2
B. Objectifs visés	2
C. Organisation du mémoire.....	2
CHAPITRE 1 RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE ET ETAT DE L'ART	4
1.1 Introduction	5
1.2 Généralités sur le Feu.....	5
1.2.1. Terminologie feu et incendie	5
1.2.2. Définition et Triangle du Feu.....	5
1.2.3. Le développement d'un incendie et mode de propagation.....	7
1.2.4. Types et modélisation d'incendies	8
1.3 Action thermique	11
1.4 Généralités sur l'aluminium	13
1.4.1. Historique de l'Aluminium	13
1.4.2. L'aluminium et ses applications	14
1.4.3. Domaines d'application de l'aluminium et de ses alliages.....	18
1.4.4. Avantages des structures en aluminium	19
1.4.5. Inconvénients généraux de l'aluminium.....	20
1.4.6. Conception des structures en alliages d'aluminium	20
1.5 Comportement des structures ou éléments structuraux à températures élevées....	23
1.5.1. Comportement des éléments de structures sous l'effet du feu.....	23
1.5.2. Comportement des structures en alliage d'aluminium sous incendie.....	28
1.5.3. Comparaison entre aluminium et autres matériaux.....	34
1.6 Cas de structures type portique avec poteaux protégés (mixtes).....	35
1.6.1. Types de Poteaux Mixtes.....	35
1.6.2. Avantages des Poteaux Mixtes	36
1.7 Conclusion.....	37
CHAPITRE 2 PROPRIETES THERMIQUES ET MECANQUES DE L'ALUMINIUM ET CAS D'ETUDE	38
2.1 Introduction	39
2.2 Propriétés thermiques et mécaniques de l'aluminium sous haute température	39
2.2.1. Propriétés thermiques	39
2.2.2. Propriétés mécaniques	44
2.3 Cas d'étude	52
2.3.1. Propriétés géométriques	52
2.3.2. Caractéristiques des feux appliqués sur la structure.....	54
2.4 Conclusion.....	55

CHAPITRE 3	COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE	56
3.1.	Introduction	57
3.2.	Modélisation numérique et conditions aux limites	57
3.2.1.	Utilisation d'ANSYS pour l'Analyse Thermique	57
3.2.2.	Modèle élément fini et maillage	59
3.2.3.	Définition des Conditions aux Limites	63
3.3.	Etude thermique par la méthode analytique	65
3.4.	Analyse numérique	68
3.4.1.	Application du feu sur le portique	69
3.4.2.	Analyse thermique du poteau et de la poutre en aluminium sous le feu standard ISO834	69
3.4.3.	Analyse thermique du poteau et de la poutre sous le feu paramétrique	74
3.4.4.	Comparaison entre les résultats du comportement issus de l'application du Feu ISO 834 et du Feu Paramétrique	79
3.5.	Analyse thermique du portique à poteaux protégés	80
3.5.1.	Etude numérique	83
3.5.2.	Etude analytique	85
3.5.3.	Par étude analytique	Erreur ! Signet non défini.
3.6.	Conclusion	86
CHAPITRE 4	ANALYSE THERMOMECHANIQUE DE PORTIQUE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET DE HAUTES TEMPERATURES	87
4.1.	Introduction	88
4.1.1.	Contexte et Importance	88
4.1.2.	Objectif de l'analyse et propriétés du matériau	88
4.2.	Modélisation et conditions aux limites	89
4.2.1.	Géométrie du portique en aluminium étudié	89
4.2.2.	Élément fini pour l'Analyse mécanique	89
4.2.3.	Conditions aux limites	90
4.3.	Détermination de la charge critique	91
4.3.1.	Résultat de l'analyse	91
4.3.2.	Analyse générale et interprétations	92
4.4.	Analyse du Comportement Mécanique	94
4.4.1.	Sous le Feu ISO 834	94
4.4.2.	Sous le feu Paramétrique	98
4.5.	Comparaison entre le comportement à feu ISO 834 et celui à feu paramétrique	103
4.6.	Conclusion	103
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		104
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		106

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Schémas de la combustion d'un incendie.	6
Figure 1-2: Triangle du feu.	6
Figure 1-3: Phase de développement d'un incendie.	8
Figure 1-4: Incendie conventionnel ISO834.....	9
Figure 1-5 : Courbes d'incendies nominaux.....	11
Figure 1-6 : Cathédrale de San Gioacchino, Rome.....	15
Figure 1-7 : L'empire State Building, New York.....	15
Figure 1-8 : Pont de Richmond-San Rafael, San Francisco.	16
Figure 1-9 : Burj Khalifa, Dubai.	16
Figure 1-10 : Tour de Tokyo (Skytree), Tokyo.	17
Figure 1-11 : L'O2 Arena (salle), Londres.	17
Figure 1-12: Coupe transversale du bâtiment avec colonnes en aluminium et contreventements en acier.....	21
Figure 1-14 : Exemples types de sections transversales de poteaux mixtes	35
Figure 2-1 : Variation de la chaleur spécifique de l'aluminium en fonction de la température.	41
Figure 2-2 : Élongation thermique de l'aluminium en fonction de la température.....	42
Figure 2-3 : Variation de la conductivité thermique de l'aluminium en fonction de la température pour différents alliages.....	43
Figure 2-4 : Évolution du facteur de réduction $K_{0, \theta}$ en fonction de la température pour l'alliage EN-AW 6061 T6.....	45
Figure 2-5 : Evolution de module de Young en fonction de la température.	45
Figure 2-6 : Évolution du module d'élasticité réduit de différents alliages d'aluminium en fonction de la température (selon l'Eurocode 9).....	47
Figure 2-7 : Diminution du module d'élasticité relatif de différents alliages d'aluminium de la série 5xxx en fonction de la température (selon l'Eurocode 9)....	47
Figure 2-8 : Evolution de Coefficients réducteurs en fonction de la température.	48
Figure 2-9 : Lois constitutives typiques des alliages d'aluminium.	49
Figure 2-10 : Modèles bilinéaires.	51
Figure 2-11 : Modèles tri-linéaires.	52
Figure 2-12 : Courbe de contrainte-déformation de l'aluminium T6061 T6 en fonction de la température	52
Tableau 2-13 : Dimension des sections des éléments du portique.....	53
Figure 2-14 : Profil type IPE.....	53
Figure 2-15: Profil type HEA.	54
Figure 3-1 : Présentation de la face de travail du logiciel ANSYS.....	59
Figure 3-2 : Mode transitoire de l'analyse thermique.....	59
Figure 3-3 : Portique simple représenté par des surfaces et réalisé par ANSYS.....	60
Figure 3-4 : Jonction poutre-poteau du portique réalisé par ANSYS.	60
Figure 3-5 : Portique simple représenté par des lignes et réalisé par ANSYS.	61
Figure 3-6 : Géométrie de l'élément SHELL131	62
Figure 3-7 : Géométrie de l'élément SOLID70.	62
Figure 3-8 : Maillage du portique à ossature en aluminium avec raffinement localisé au niveau des connexions (élément SHELL131 – ANSYS).	63

Figure 3-9 : Modélisation thermique d'un portique soumis à la convection et au rayonnement.....	65
Figure 3-10 : Evolution de la température en fonction du temps par la méthode analytique pour un élément de structure.....	68
Figure 3-11 : Distribution de la température au portique après une exposition au feu de 3600s.....	69
Figure 3-12 : Evolution de la température en fonction du temps dans différents nœuds du poteau sous ISO834.....	70
Figure 3-13: Evolution de la température en fonction du temps dans différents nœuds de la poutre sous ISO834.....	72
Figure 3-14 : Evolution de la température dans différents nœuds du poteau soumis à un feu paramétrique.....	74
Figure 3-15 : Evolution de la température dans différents noeuds de la poutre soumise à un feu paramétrique.....	77
Figure 3-16 : Distribution Thermique des Poteaux Protégés par le Béton à 3600s....	81
Figure 3-17 : Application de la convection sur les Poteaux mixtes.....	81
Figure 3-18 : Distribution Thermique et Convection sur un Portique.....	82
Figure 3-19 : Application de la radiation sur les poteaux mixtes.....	82
Figure 3-20 : Distribution de la Radiation à l'Intérieur des Poteaux.....	83
Figure 3-21 : Evolution de la température en fonction du temps pour plusieurs parties de la structure avec poteaux protégés.....	84
Figure 3-22 : Evolution de la température en fonction du temps selon EN 1999 1-2.	85
Figure 4-1 : Portique réalisé par ANSYS.....	89
Figure 4-2 : Géométrie de l'élément SHELL181.....	90
Figure 4-3 : Conditions aux limites du portique.....	90
Figure 4-4 : Schéma du portique sous la charge critique.....	91
Figure 4-5 : Evolution de la charge en fonction du déplacement à mi- travée de la poutre du portique	92
Figure 4-6 : Evolution de la charge critique du portique en aluminium en fonction de la température.....	92
Figure 4-7 : Déplacement Vertical à mi-travée de la poutre en fonction du Temps...	94
Figure 4-8 : Déplacement vertical du Portique sous l'Effet du Feu ISO 834 – Simulation ANSYS à 544,57 s.....	95
Figure 4-9 : Déplacement Horizontal en fonction du Temps du portique.....	96
Figure 4-10 : Déplacement Horizontal du Portique sous l'Effet du Feu ISO 834 au temps t= 911 s.....	97
Figure 4-11 : Déplacement Vertical en fonction du Temps	99
Figure 4-12 : Déplacement Vertical du Portique sous Feu Paramétrique au temps t=699,57 s.....	99
Figure 4-13 : Déplacement Horizontal en fonction du Temps	100
Figure 4-14 : Déplacement horizontal du Portique sous Feu Paramétrique au temps t=649,57 s.....	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Propriétés physiques des alliages d'aluminium et de l'acier représentatives.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2-2 : Facteurs de Réduction des Propriétés Mécaniques des Alliages d'Aluminium selon l'Eurocode 9 - Annexe E.....	46
Tableau 3-1 : Comparaison entre les comportements thermiques dus au Feu ISO 834 et au Feu Paramétrique.	79
Tableau 4-1 : Comparaison entre les résultats issus du feu ISO 834 et du feu paramétrique.	103

INTRODUCTION GENERALE

A. Problématique

Le problème étudié concerne l'étude numérique du comportement thermique et mécanique des structures en aluminium avec poteaux protégés ou non par le matériau béton lorsqu'elles sont exposées à des températures élevées en cas d'incendie, soit par un feu standard ISO834 ou un feu paramétrique. Les charges critiques des structures en aluminium sont un élément essentiel pour leur stabilité vis-à-vis des hautes températures.

B. Objectifs visés

Ce mémoire a pour objectif principal d'étudier le comportement au feu d'une structure type portique en aluminium associant ou non des poteaux protégés par le matériau béton (mixtes). Il vise à analyser les effets thermiques et mécaniques induits par une exposition à un feu normalisé ISO 834 ainsi qu'à un feu paramétrique, en mettant en évidence les limites de l'aluminium face aux hautes températures. L'étude permet aussi d'évaluer l'apport du béton dans les poteaux mixtes en tant que protection thermique, à travers une modélisation numérique de la réponse thermique et une analyse des déplacements et déformations. Elle a également pour but de comparer les performances des éléments structuraux poteau-poutre en termes de stabilité, de rigidité et de résistance au feu, tout en explorant des solutions de conception conformes aux exigences des Eurocodes pour améliorer la sécurité incendie des structures légères.

C. Organisation du mémoire

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres principaux, permettant d'aborder de manière progressive et structurée l'étude du comportement au feu d'une structure type portique en aluminium en prenant en compte la protection ou non des poteaux.

Après une introduction générale englobant la problématique et les objectifs visés, vient le premier chapitre consacré à une recherche bibliographique approfondie sur le comportement au feu des structures métalliques, et plus spécifiquement des structures en aluminium. Ce chapitre permet également d'introduire les principaux textes réglementaires et normatifs relatifs à la sécurité incendie, notamment les Eurocodes, et met en lumière les limites actuelles de la recherche dans ce domaine, ce qui justifie la pertinence du présent travail.

Le deuxième chapitre traite des propriétés thermiques et mécaniques de l'aluminium, en s'appuyant notamment sur les formulations proposées par l'Eurocode 9. Il explore en détail la manière dont l'aluminium réagit face à la température, en décrivant l'évolution de sa conductivité thermique, de sa chaleur spécifique, de son module d'élasticité, de sa limite élastique. Ce chapitre constitue ainsi une base théorique indispensable pour les analyses thermiques et mécaniques menées par la suite. Les différents cas d'étude sont mentionnés à la fin de ce chapitre.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse thermique d'un portique à ossature en aluminium, en étudiant analytiquement et numériquement sa réponse sous l'effet de deux scénarios de feu : un feu standard ISO834 et un feu paramétrique. À travers des simulations numériques, ce chapitre examine la propagation de la chaleur au sein des éléments de la structure, l'évolution des températures dans les poteaux et les poutres.

Le quatrième chapitre traite une analyse thermomécanique complète, du même portique, en intégrant à la fois l'effet de la température et celui des charges mécaniques appliquées. Il a été aussi mentionné la détermination des charges critiques en fonction de différentes températures. Cette étude vise à évaluer la stabilité globale de la structure en situation d'incendie, à quantifier les déplacements horizontaux et verticaux, à détecter les pertes de rigidité.

Le mémoire se termine par une conclusion générale des principaux résultats obtenus, suivie de perspectives de recherche.

**CHAPITRE 1 RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE ET ETAT
DE L'ART**

1.1. Introduction

L'aluminium, grâce à ses propriétés physiques remarquables telles que sa légèreté, sa résistance à la corrosion et sa facilité de mise en œuvre, connaît une utilisation croissante dans le secteur du bâtiment, notamment pour les structures porteuses légères ou les façades architecturales. Toutefois, ce matériau présente une sensibilité marquée aux hautes températures, avec une perte rapide de ses capacités mécaniques au-delà de 200 °C et une température de fusion avoisinant 550°C. Ces caractéristiques limitent sa performance en cas d'incendie si aucune mesure de protection n'est prévue [1].

L'intégration de poteaux protégés – combinant l'aluminium à des matériaux plus protecteurs au feu comme le béton – permet de compenser partiellement ces limitations, en apportant une meilleure stabilité sous sollicitation thermique. Ces combinaisons de matériaux ouvrent la voie à des conceptions structurelles plus performantes, tout en répondant aux exigences de sécurité incendie [2].

1.2. Généralités sur le Feu

Le feu est une réaction chimique exothermique appelée combustion, qui se produit lorsque trois éléments essentiels sont réunis : un combustible, un comburant (généralement l'oxygène) et une source de chaleur. Ce phénomène est souvent représenté par le triangle du feu, qui illustre les conditions nécessaires à l'initiation et à la propagation du feu [3].

1.2.1. Terminologie feu et incendie

Distingue le feu et l'incendie par la nature de la combustion. Un feu désigne une combustion contrôlée, comme celle observée dans des équipements tels que les fours ou les chaudières. En revanche, lorsqu'il s'agit d'un incendie, la combustion devient incontrôlée, prenant des proportions telles qu'elle peut causer des dégâts importants et déclencher un véritable sinistre [4].

1.2.2. Définition et Triangle du Feu

Un incendie nécessite trois éléments pour se déclencher, souvent représentés par le triangle du feu [3]:

1. **Combustible** : Toute matière capable de brûler, comme : les Solides (Bois, papier, plastique), les Liquides : Essence, alcool, solvants et les Gaz : Propane, butane, méthane.
2. **Comburant** : Il s'agit de l'élément chimique qui alimente la combustion : Généralement, l'oxygène présent dans l'air est le principal comburant. Certains produits chimiques, comme le chlore ou le fluor, peuvent également jouer ce rôle.
3. **Source d'Énergie (Chaleur)** : Une énergie d'activation est nécessaire pour initier la réaction : Une flamme ou une étincelle : Souvent issue de sources électriques ou mécaniques, Frottement ou compression : Comme dans le cas d'un feu provoqué par une friction intense ou Température élevée : Lorsqu'un matériau atteint son point d'inflammation.

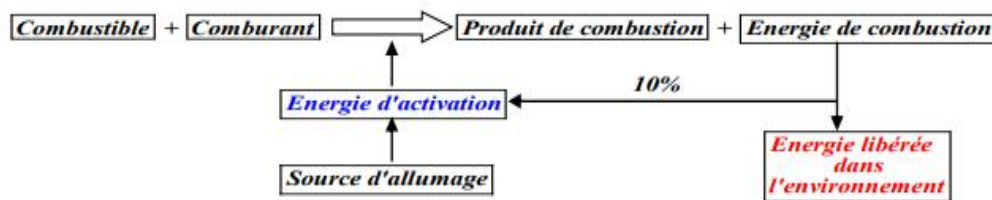


Figure 1-1 : Schéma de la combustion d'un incendie.

Ces trois composantes sont souvent représentées graphiquement sous forme d'un triangle appelé triangle du feu [4].



Figure 1-2: Triangle du feu [5].

1.2.3. Le développement d'un incendie et mode de propagation

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

Un incendie réel passe par quatre phases, traverse d'abord une phase de progression, caractérisée par une augmentation graduelle de l'intensité et de la température, suivie d'une phase de diminution où la température et l'ampleur du feu décroissent. La rapidité du développement de l'incendie varie en fonction du type de combustible utilisé et des conditions dans lesquelles l'inflammation se produit [7].

Démarrage du feu (1^{ère} phase)

La vitesse à laquelle un incendie démarre dépend du type de combustible, de sa forme, de la ventilation du lieu et de la source d'allumage utilisée. Pendant la phase de feu couvant, la température reste concentrée au point d'ignition, tandis que les premiers gaz et la fumée commencent à se dégager [7, 8].

Déclenchement de l'incendie (2^{ème} phase)

Au cours de la deuxième phase, où le foyer est vif mais encore localisé, le rayonnement ou le contact des flammes, atteint les matières proches, les gaz chauds se dégagent et emplissent le volume, annonçant la troisième phase [7, 8].

Embrassement généralisé (3^{ème} phase)

Durant cette phase, les gaz chauds accumulés élèvent la température des combustibles jusqu'à leur point d'inflammation, provoquant un embrassement soudain de tout l'espace (phénomène de flash-over). L'incendie atteint alors son intensité maximale. La présence de gaz inflammables peut aussi entraîner des explosions d'une violence variable [7, 8]

Retombée du feu (4^{ème} phase)

Le feu commence à diminuer jusqu'à ce que tous les matériaux combustibles aient complètement brûlé [7].

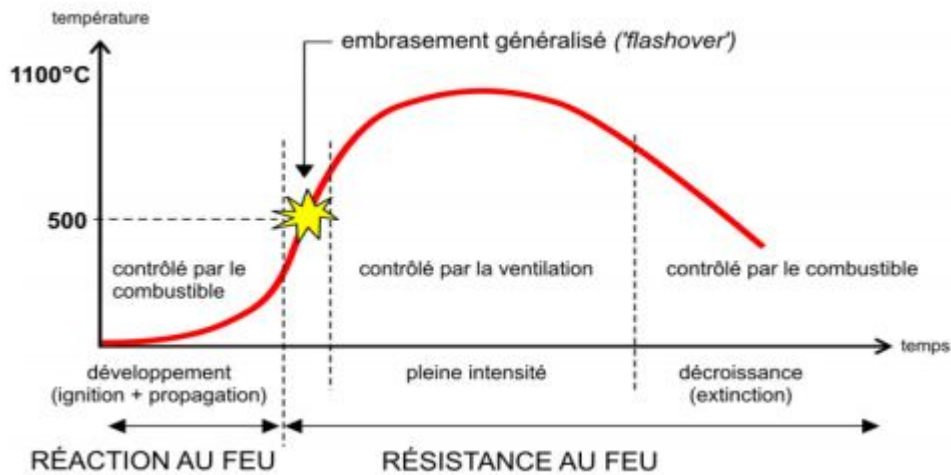


Figure 1-3: Phase de développement d'un incendie [9].

1.2.4. Types et modélisation d'incendies

La représentation la plus simple d'un incendie repose sur l'utilisation de courbes nominales, qui établissent une relation entre l'évolution de la température des gaz et le temps [8]:

1.2.4.1. Feu normalisé ISO834

Le feu conventionnel se caractérise par une élévation progressive et continue de la température ambiante au fil du temps, selon un taux de croissance défini. En laboratoire, ce type de feu est modélisé à l'aide d'une courbe logarithmique standard. Toutefois, la durée de résistance au feu obtenue lors des essais ne correspond pas à la durée réelle pendant laquelle un élément résiste en situation d'incendie dans un bâtiment. Elle sert plutôt de référence comparative permettant d'évaluer la sévérité d'un incendie que la composante est capable de supporter [10].

En laboratoire, une courbe logarithmique est utilisée pour modéliser ce type de feu. Cependant, la durée de résistance au feu indiquée par cette courbe ne correspond pas à la durée réelle pendant laquelle une composante peut résister dans un incendie de bâtiment. Elle sert plutôt de base de comparaison pour évaluer la sévérité de l'incendie et déterminer la capacité de la composante à résister [8].

Dans le cadre de l'analyse thermique et mécanique des structures en aluminium avec poteaux mixtes :

La courbe ISO834 est appliquée pour déterminer l'évolution des températures dans les éléments structurels, prenant en compte la montée progressive de la température selon les caractéristiques définies.

Elle permet d'étudier les performances thermiques et mécaniques des matériaux, en mettant en lumière les variations de leurs propriétés sous des conditions de feu intense.

Le feu standard ISO 834 est donné selon la formule suivante [11, 12]:

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

θ_g = température des gaz dans le compartiment en °C

t = temps en minutes.

La courbe ISO 834 est donnée par la figure 1-4.

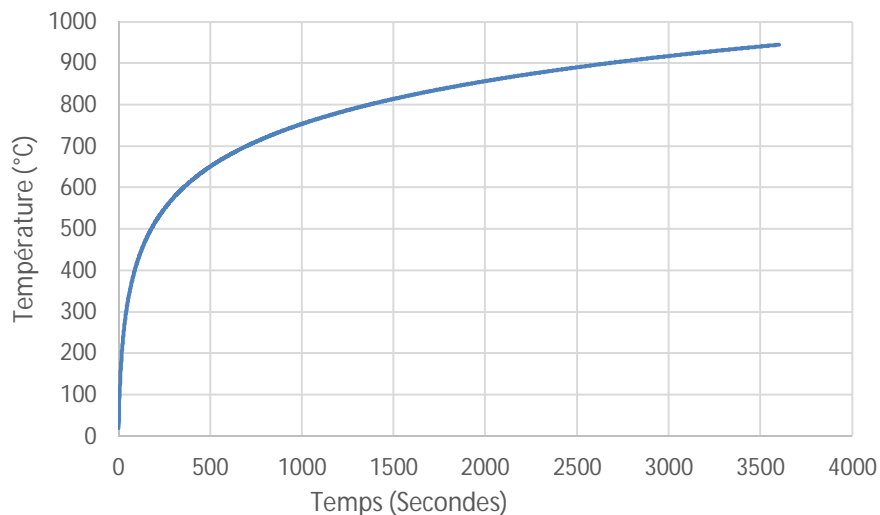


Figure 1-4: Incendie conventionnel ISO834.

Cette courbe a l'avantage de ne dépendre que d'un seul paramètre : le débit de combustible, ce qui rend les essais plus faciles à reproduire et à comparer [13].

1.2.4.1. Feu hydrocarbure

Le feu hydrocarbure, développé dans les années 1970 par la compagnie pétrolière Mobil, se caractérise par une montée en température extrêmement rapide. En effet, la température atteint environ 900 °C dans les cinq premières minutes et se stabilise à un plateau de 1100 °C. Cette recherche avait pour objectif de créer une procédure de test permettant d'évaluer les matériaux de protection contre le feu, particulièrement pour les plateformes de forage en mer et les complexes pétroliers, où les conditions de sécurité face à des incendies potentiels sont

primordiales. Cette méthode a ouvert la voie à des avancées significatives dans la conception de matériaux adaptés à ces environnements extrêmes [8].

La formule selon EN 1991-1-2:2002 [14] :

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

1.2.4.2. Feu extérieur

Le feu extérieur est analysé en examinant la résistance au feu d'une structure exposée à l'extérieur. Dans ce cas, les températures des matériaux du bâtiment sont plus proches des températures d'incendie correspondantes, ce qui permet d'utiliser une courbe spécifique appelée « courbe d'incendie extérieure ». Cette courbe est plafonnée à une élévation maximale de température égale à $20 + 660$ °C, ce qui représente une valeur nettement inférieure à celle de la courbe standard. Elle s'applique directement aux surfaces extérieures exposées à un compartiment en feu, ou à un compartiment situé en dessous ou à côté de la face concernée par la sollicitation thermique [8].

A partir de EN 1991-1-2:2002 [14] la formule de feu extérieur :

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

1.2.4.3. Feu paramétrique

Le feu paramétrique constitue une approche plus réaliste pour représenter l'évolution thermique d'un incendie dans un compartiment clos. Contrairement aux courbes normalisées (comme la norme ISO 834), le feu paramétrique prend en compte des paramètres physiques spécifiques tels que la charge combustible, les dimensions du local, le taux de ventilation et les caractéristiques thermiques des parois. Ces éléments permettent de générer une courbe température/temps représentative de la réalité, incluant à la fois une phase de montée en température et une phase de refroidissement, correspondant à l'incendie post-embrassement généralisé [13].

Ce type de modélisation ne couvre pas la phase d'ignition initiale, mais permet de simuler de manière suffisamment précise l'évolution thermique d'un feu mature, jusqu'à la température maximale atteinte, et au-delà, jusqu'à son extinction. Ainsi, le feu paramétrique est particulièrement adapté à l'étude du comportement au feu des structures dans des conditions proches de l'usage réel des bâtiments [13].

Formule de la phase chaude (montée de température) [15]

$$\theta_g(t) = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,2t} - 0,204 \cdot e^{-1,7t} - 0,472 \cdot e^{-19t}) \quad (1-4)$$

Formule de la phase de refroidissement (partie froide) [15]

$$\theta_g(t) = \theta_{g,\max} - 625 \cdot \log_{10}(1 + 0,2 \cdot (t - t_{\max})) \quad (1-5)$$

Où :

- $\theta_g(t)$: Température des gaz en °C à l'instant t (en minutes),
- t: Temps en minutes.

Ces quatre courbes d'incendies sont illustrées à la figure 1-5.

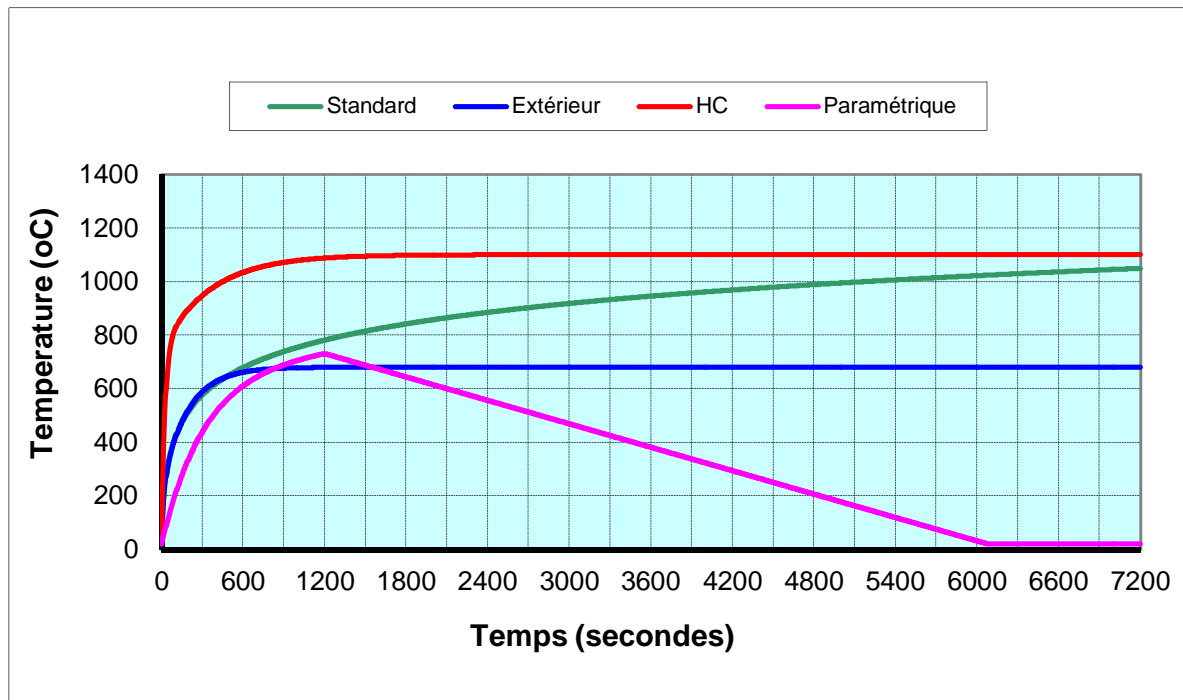


Figure 1-5 : Courbes d'incendies nominaux [11].

1.3. Action thermique

Lors d'un incendie dans un bâtiment, la chaleur se propage d'un espace à un autre à travers trois mécanismes fondamentaux de transfert thermique : la **convection**, qui implique le déplacement de l'air chaud, le **rayonnement**, qui transmet l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques, et la **conduction**, qui correspond à la diffusion directe de la chaleur à

travers les matériaux. Ces phénomènes influencent l'élévation de température dans le compartiment et la propagation du feu [9].

1.3.1.1. La convection

La convection représente un mode de transfert thermique où la chaleur est transmise à un solide par les mouvements du gaz environnant. Au début d'un incendie, ce phénomène joue un rôle prédominant dans l'échange thermique entre l'environnement et les éléments de construction [9]. D'après la norme EN-1991-1-2 [15], le flux de chaleur, défini par l'équation (1), se mesure en watts et quantifie l'énergie échangée entre le gaz à une certaine température et une surface de 1 [m²] présentant une température différente.

$$\dot{h}_{net.c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad (1-6)$$

Où : α_c est le coefficient d'échange par convection, pris égale à 25 W/m²°C pour la face exposée, et 4 [W/m²°C] pour la face non-exposée.

1.3.1.2. Le rayonnement

Le rayonnement est un mode de transfert thermique où l'énergie se propage sous forme d'ondes électromagnétiques, sans nécessiter de milieu intermédiaire entre la source de chaleur et la surface réceptrice. Ce phénomène devient dominant lors de la propagation de l'incendie, notamment lorsque le feu atteint son intensité maximale [9]. Selon la norme EN-1991-1-2 [15] l'équation (2) exprime le flux de chaleur en watts, quantifiant l'énergie échangée entre le gaz à une certaine température et une surface de 1 m² exposée à une température différente 1.

$$\dot{h}_{net.r} = \phi \cdot \epsilon_m \cdot \epsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (1-7)$$

Où : ϕ est le facteur de forme du profil de l'élément.

1.3.1.3. La conduction

La conduction est le mécanisme de transfert thermique propre aux matériaux solides. Elle dépend de la conductivité thermique, qui mesure la capacité d'un matériau, comme l'acier, à diffuser la chaleur [9]. Dans les éléments de charpente, ce phénomène régit la transmission de Fourier (Equation 1-8), qui quantifie la propagation de la chaleur en fonction des propriétés du matériau 2.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda a \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + Q = \rho a c a \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1-8)$$

1.4. Généralités sur l'aluminium

L'aluminium sous forme d'alliage est un métal ductile résistant qui présente de nombreuses similitudes avec l'acier de construction. En raison des variations de température, la dilatation et la contraction de l'aluminium sont deux fois plus importantes que celles de l'acier. Cependant, en raison de son module d'élasticité plus faible, les contraintes thermiques dans un élément contraint ne représentent que les deux tiers de celles enregistrées dans l'acier. Afin de prendre en compte la pleine capacité de l'aluminium et sa grande vulnérabilité au feu, des modèles plus affinés de son comportement mécanique sont nécessaires [16].

Ce métal est à la fois léger, malléable et résistant à l'oxydation, des qualités qui le rendent incontournable dans des secteurs comme l'aéronautique et les transports. L'ajout de métaux créant des solutions solides avec l'aluminium améliore sa résistance mécanique, atteignant des performances comparables à celles des aciers trempés, tout en conservant une densité trois fois inférieure à celle de l'acier [17].

1.4.1. Historique de l'Aluminium

L'aluminium, bien que le métal le plus abondant dans l'écorce terrestre, est parmi les derniers à avoir été découvert. Il n'a été utilisé industriellement qu'à partir de la fin du XIX^e siècle [18].

À l'époque de la Rome antique, des écrits témoignent de l'usage de l'alun (sulfate d'aluminium et de potassium) comme fixateur pour les couleurs.

En 1722, Hoffmann identifie l'alun et le nomme « alumine ». Ce n'est qu'en 1825 que Hans Christian Ørsted réussit à obtenir de l'aluminium sous forme d'une poudre grise, encore très impure. En 1827, Friedrich Wöhler améliore cette méthode et produit une poudre contenant moins d'impuretés. Plus tard, en 1854, le chimiste français Henri Sainte-Claire Deville présente le premier lingot d'aluminium fondu, exploitant les travaux de Wöhler. La légèreté et l'éclat de ce métal, similaire à l'argent, séduisent Napoléon III qui soutient financièrement Sainte-Claire Deville pour développer un atelier à Javel et Amfreville [19].

En 1859, Paul Morin, associé de Sainte-Claire Deville, industrialise le procédé dans l'usine de Salindres (Gard), berceau de la société Pechiney. Ce processus complexe rendait l'aluminium coûteux et réservé aux objets de luxe et à l'orfèvrerie.

Le tournant décisif survient en 1886 lorsque Paul Héroult en France et Charles Hall aux États-Unis déposent, indépendamment, leurs brevets pour la production d'aluminium par électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolithe fondue. L'invention de la dynamo par Gramme et l'utilisation des chutes hydrauliques (« houille blanche ») rendent cette méthode économiquement viable[20].

En 1887, Héroult construit sa première usine en Suisse, près du Rhin. Par la suite, il ouvre des sites à Froges (Isère) et à La Praz (Savoie), intégrant l'hydroélectricité française. Pendant ce temps, Hall établit en 1888 une usine pour la Pittsburgh Reduction Company, devenue en 1907 l'Aluminium Company of America.

Grâce à une production industrielle accélérée au XX^e siècle, l'aluminium devient le premier métal non ferreux utilisé au monde et le deuxième derrière le fer en termes de volume. Employé pour sa légèreté et sa résistance à la corrosion, il gagne en performances grâce à des avancées comme le durcissement thermique mis au point par Conrad Claessen en 1905 et la création du « duralumin » par Alfred Wilm, un alliage durcissant par trempe. Enfin, en 1920, Aladar Pacz développe l'alliage aluminium-silicium appelé « alpax », élargissant encore les applications de ce matériau [19].

1.4.2. L'aluminium et ses applications

L'aluminium, naturellement présent dans la croûte terrestre, n'existe pas sous forme métallique. Il est extrait par réduction de l'alumine, principal composant de la bauxite qui contient également de l'oxyde de fer et de la silice. La réduction de l'alumine, en raison de sa grande stabilité, est un processus complexe. La découverte de l'aluminium est attribuée à Humphrey Davy, qui, en 1809, l'a obtenu pour la première fois par électrolyse de sels fondus. En 1827, Wöhler parvint à produire un aluminium suffisamment pur pour analyser ses propriétés [20].

Ce métal présente de nombreux avantages qui en font un matériau polyvalent. Il se distingue par sa légèreté, sa conductivité thermique et électrique, sa résistance à la corrosion, sa capacité à subir divers traitements de surface et sa facilité de mise en œuvre. De plus, les alliages d'aluminium et les traitements thermiques permettent d'adapter ses propriétés aux besoins spécifiques des différents secteurs d'application, comme la construction, le transport, l'électronique et l'emballage. En 2011, la production mondiale d'aluminium a atteint 43,5

millions de tonnes, faisant de ce métal le deuxième alliage métallique le plus utilisé au monde, après l'acier [21].

Les applications des alliages d'aluminium dans la construction remontent à environ 130 ans, notamment le dôme de l'église San Gioacchino (figure 1-6) à Rome, en Italie.



Figure 1-6 : Cathédrale de San Gioacchino, Rome [22].

Les panneaux extérieurs de l'Empire State Building à New York, aux États-Unis sont montrés dans la figure 1-7.



Figure 1-7 : L'Empire State Building, New York [22].

Le pont Richmond-San Rafael est un pont en aluminium à deux étages qui enjambe la baie de San Francisco aux États-Unis.



Figure 1-8 : Pont de Richmond-San Rafael, San Francisco [22].

Le tablier en aluminium a été choisi pour sa légèreté et sa durabilité, ainsi que pour sa capacité à résister aux effets corrosifs de l'eau salée. Les alliages d'aluminium sont utilisés dans la construction du système de revêtement et de la flèche du Burj Khalifa le plus haut bâtiment du monde.



Figure 1-9 : Burj Khalifa, Dubai [22].

La Tokyo Skytree (Tour) est construite en combinant des alliages d'acier et d'aluminium. Son revêtement extérieur est constitué de panneaux d'aluminium conçus pour résister aux vents violents et à l'activité sismique.



Figure 1-10 : Tour de Tokyo (Skytree), Tokyo [22].

L'O2 Arena à Londres se distingue par son toit en forme de dôme blanc en alliages d'aluminium, qui s'étend sur plus de 365 m et est soutenu par une charpente métallique complexe.

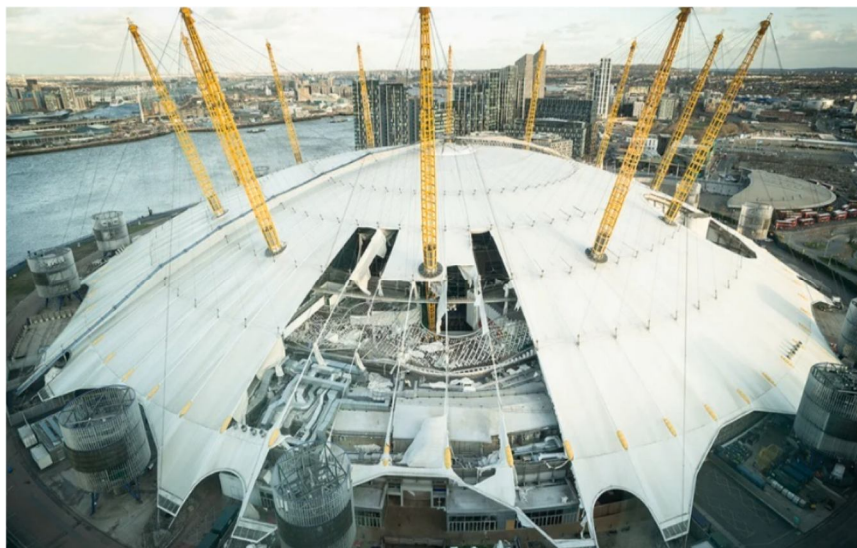


Figure 1-11 : L'O2 Arena (salle), Londres [22].

Compte tenu des nombreux travaux de recherche sur les structures en alliage d'aluminium et de leurs applications croissantes dans le secteur de la construction, un résumé complet peut

s'avérer nécessaire pour compiler et organiser les connaissances provenant de diverses sources, offrant ainsi une compréhension claire de l'état actuel du domaine. Dans l'article de Yao [23], les propriétés matérielles des alliages d'aluminium sont d'abord décrites, puis la résistance à la corrosion et la recyclabilité des alliages d'aluminium sont examinées. Les recherches antérieures sur les performances structurelles des éléments de structure et des assemblages en alliage d'aluminium ont examiné les possibilités d'application des méthodes de construction et de renforcement aux structures en alliage d'aluminium [22].

1.4.3. Domaines d'application de l'aluminium et de ses alliages

Les propriétés physiques et chimiques remarquables de l'aluminium expliquent son succès industriel et commercial. Grâce à sa légèreté (près de trois fois plus léger que l'acier), sa résistance mécanique, sa capacité d'amélioration par traitement thermique ou à froid, sa résistance à la corrosion et sa facilité de mise en œuvre, l'aluminium est largement utilisé dans des secteurs tels que la construction, l'aménagement territorial et la construction navale. La diversité des alliages d'aluminium, en termes de familles et de compositions, a élargi ses champs d'application. En raison de sa conductivité électrique (environ les deux tiers de celle du cuivre), l'aluminium est souvent préféré au cuivre comme conducteur électrique, permettant une économie de poids d'environ 50 %. De plus, sa conductivité thermique, proche de 60 % de celle du cuivre, le rend idéal pour des applications telles que les ustensiles de cuisine, les capteurs solaires, les systèmes de réfrigération ou encore les disques de frein [17].

L'aluminium est également très utilisé dans les domaines nécessitant des échanges thermiques, comme l'électronique et le dessalement de l'eau de mer. Il se distingue aussi par son excellente capacité à réfléchir la chaleur, la lumière et les ondes électromagnétiques. Dans les alliages aluminium-fer, les propriétés magnétiques du fer sont considérablement réduites, ce qui élargit encore les possibilités d'utilisation. L'aluminium se façonne facilement selon de nombreuses méthodes (filage, laminage, etc.), ce qui permet la production de profilés, de bandes et de feuilles. Il peut être soudé ou collé, et son aptitude aux traitements de surface offre des solutions esthétiques et fonctionnelles variées. Avec environ 80 alliages couramment utilisés, l'aluminium propose un large choix de demi-produits adaptés à divers besoins.

L'aluminium réside dans sa recyclabilité. Sa réintroduction dans le cycle de production ne requiert que 5 % de l'énergie nécessaire pour produire de l'aluminium primaire. Les chutes de production en usine sont recyclées à 100 %, et les taux de recyclage en fin de vie atteignent 85

% dans le bâtiment, 80 % dans le transport, 70 % dans les équipements mécaniques et électriques, et 65 % dans l'électroménager.

Ces qualités font de l'aluminium le deuxième métal le plus utilisé après le fer. Sa présence est significative dans le transport, notamment dans l'aéronautique et l'aérospatiale. Par exemple, l'utilisation de l'aluminium et de ses alliages a permis de réduire de moitié le poids des structures d'avion, qui représentent encore aujourd'hui près de 80 % de la masse des avions civils modernes. Dans l'industrie automobile, l'aluminium est utilisé pour les moteurs, les châssis, les carrosseries et divers équipements, contribuant à alléger les véhicules et à réduire la consommation de carburant [21].

1.4.4. Avantages des structures en aluminium

Les structures en aluminium offrent plusieurs avantages qui les rendent particulièrement adaptées à la construction et à l'ingénierie [24] :

1. Rapport résistance/poids élevé
Permet de réduire le poids total des structures sans compromettre la résistance mécanique.
2. Facilité de fabrication et mise en œuvre
Extrusion simple de formes complexes, adaptées à des géométries qu'on ne peut pas obtenir facilement avec le béton ou l'acier.
3. Excellente résistance à la corrosion
Idéal pour des environnements marins ou humides, souvent sans besoin de protection supplémentaire.
4. Bonne conductivité thermique et électrique
5. Apparence esthétique naturelle
Finitions anodisées ou brutes appréciées en architecture.
6. Durabilité élevée
Capacité à maintenir ses propriétés dans des plages de températures étendues.
7. Recyclabilité à 100 %
Réduction de l'empreinte carbone. L'aluminium est souvent qualifié de métal vert.
8. Économie d'énergie dans la production moderne
Réduction de plus de 75 % de l'énergie nécessaire à sa fabrication depuis 1995.

Ces caractéristiques font de l'aluminium un choix privilégié pour les bâtiments industriels, les façades modernes et les infrastructures durables.

1.4.5. Inconvénients de l'aluminium

1. Faible résistance mécanique à chaud

L'aluminium perd jusqu'à 80 % de sa résistance dès 300–400 °C.

À 550 °C, il fond, ce qui le rend très vulnérable au feu comparé à l'acier.

2. Faible module d'élasticité

Environ 70 GPa contre 210 GPa pour l'acier, donc plus flexible et moins rigide.

3. Coût plus élevé

Le prix de l'aluminium est généralement plus élevé que celui de l'acier ou du béton.

4. Difficulté de soudage

Le soudage de l'aluminium est plus complexe et nécessite des techniques spécifiques.

Les assemblages peuvent donc être plus coûteux et délicats.

5. Dilations thermiques importantes

Son coefficient de dilatation thermique est élevé (2 fois celui de l'acier), ce qui peut poser problème pour des assemblages exposés à des variations thermiques.

1.4.6. Conception des structures en alliages d'aluminium

Les recherches sur le comportement structurel et la conception des structures en alliages d'aluminium ont connu des avancées notables récemment :

Spyrakos et Ermopoulos [25] ont conçu le premier bâtiment résidentiel en Europe utilisant des colonnes en alliages d'aluminium, des contreventements en acier et des poutres de plancher horizontales. Leur étude a mis en lumière les défis liés à l'intégration de ces matériaux, notamment la compatibilité entre l'aluminium et l'acier. Parmi les principaux défis, ils ont identifié :

Compatibilité thermique : L'aluminium et l'acier ont des coefficients de dilatation thermique différents, ce qui peut entraîner des contraintes internes sous des variations de température.

Corrosion galvanique : En présence d'humidité, le contact direct entre l'aluminium et l'acier peut provoquer une corrosion galvanique, nécessitant des traitements de surface ou des barrières isolantes.

Rigidité structurelle : L'aluminium, bien que léger, est moins rigide que l'acier, ce qui a nécessité une optimisation des contreventements pour garantir la stabilité globale.

Ils ont proposé des solutions pour optimiser la stabilité et la durabilité de la structure, en tenant compte des propriétés mécaniques et thermiques des matériaux utilisés , Et ils ont proposé aussi des solutions telles que l'utilisation de revêtements protecteurs, des techniques d'assemblage adaptées et des simulations numériques pour anticiper les contraintes Ce projet a marqué une étape importante dans l'utilisation de l'aluminium comme matériau structurel dans l'architecture résidentielle, ouvrant la voie à des conceptions plus légères et durables.

La figure 1-12 illustre le bâtiment résidentiel conçu par Spyrakos et Ermopoulos [26], intégrant des colonnes en alliage d'aluminium, des contreventements en acier et des poutres horizontales :

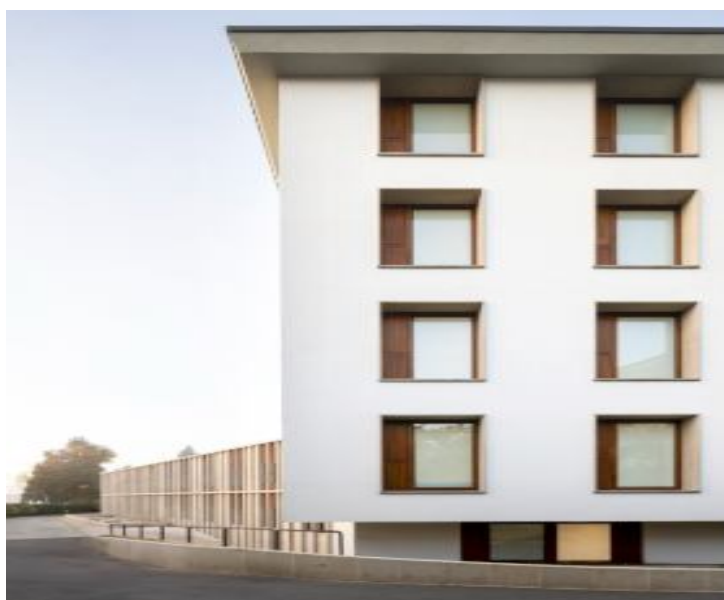


Figure 1-12: Coupe transversale du bâtiment avec colonnes en aluminium et contreventements en acier [26].

Nikolaou et al. [27] ont appliqué des techniques de programmation mathématique à l'analyse limite des cadres en aluminium avec des sections creuses. Leur étude a révélé que le coefficient d'expansion thermique élevé de l'aluminium, environ deux fois celui de l'acier, entraîne des déformations et des contraintes thermiques importantes. Ces résultats soulignent la nécessité de concevoir des cadres en aluminium avec des tolérances adaptées pour minimiser les effets des variations de température. Ces travaux ont contribué à une meilleure compréhension des performances des cadres en aluminium dans des environnements soumis à des contraintes thermiques.

Liu et al. [25] ont étudié les déformations thermiques et les contraintes des dômes en aluminium exposés au rayonnement solaire. Ils ont développé une méthode d'analyse thermique pour les plaques en aluminium prenant en compte les effets de dilatation importantes sous l'effet de la chaleur et les variations de température. Ils ont proposé des solutions pour réduire les contraintes thermiques et améliorer la durabilité des dômes. Cette étude a permis de mieux comprendre les performances des dômes en aluminium dans des environnements soumis à des conditions climatiques extrêmes. **Wang et al.** Ont proposé une nouvelle conception de coques en aluminium renforcées par des câbles. Ils ont utilisé une procédure d'optimisation basée sur l'énergie de déformation pour cette approche permet d'améliorer les performances de flambement et la résistance globale des structures, Conception innovante les câbles renforcent la rigidité des coques, offrant une meilleure résistance aux charges et aux contraintes thermiques. Cette approche innovante ouvre la voie à des applications plus robustes et durables des coques en aluminium. **Xiong et al.** [28], Ont réalisé des études expérimentales et numériques sur des coques réticulées à une seule couche avec des joints en aluminium. Ils ont examiné les modes de rupture Les coques réticulées présentent des points faibles au niveau des joints, nécessitant des améliorations pour renforcer leur rigidité, le flambement, la répartition des forces internes et la rigidité des joints et les structures en aluminium sont sensibles au flambement sous des charges élevées. Des tests en conditions d'incendie ont également été effectués pour évaluer la résistance de ces structures. Les résultats ont montré que les coques réticulées en aluminium offrent une bonne résistance mécanique, mais nécessitent des améliorations pour mieux résister aux contraintes thermiques. Leurs travaux ont ouvert la voie à des conceptions plus robustes et résistantes pour les coques réticulées en aluminium. **Liu et al.** [29] ont investigué la stabilité statique des coques sphériques en aluminium. Ils ont dérivé des coefficients de sécurité structurelle Ces coefficients permettent d'évaluer la capacité de charge des coques sous différentes conditions. et proposé des formules approximatives pour estimer la capacité de charge de ces structures et la résistance des coques sphériques, facilitant leur conception et leur optimisation. . Leur étude a mis en évidence les avantages des coques sphériques en aluminium pour des applications nécessitant une grande résistance et une légèreté. **Wang et al.** [30] ont évalué le comportement sismique des cadres en aluminium avec des joints poutres-colonnes. Ils ont réalisé des tests à grande échelle sous charges cycliques et validé leurs résultats à l'aide de modèles numériques ces tests ont permis de valider les performances des cadres en aluminium. Ces travaux ont permis de mieux comprendre la capacité des

structures en aluminium à résister aux séismes, en mettant en évidence les avantages de leur légèreté et de leur flexibilité.

1.5. Comportement des structures ou éléments structuraux à températures élevées

1.5.1. Comportement des éléments de structures sous l'effet du feu

D. Dhima [31] propose une méthode simplifiée permettant de vérifier la résistance d'un élément structurel en condition d'incendie. Selon cette approche, la résistance au feu, définie par une température uniforme, est garantie si la température de l'élément, après une durée d'exposition au feu, reste inférieure à sa température critique. Une procédure est décrite pour déterminer cette température critique, conformément à la norme XP ENV 1993-1-2. Cette procédure prend en compte différentes sollicitations des éléments, notamment les éléments simplement fléchis sans risque de déversement, les éléments comprimés ou fléchis avec un risque de déversement, ainsi que les éléments comprimés-fléchis. La méthode permet de vérifier à la fois les éléments nus et protégés. Lorsqu'un élément est protégé, elle offre également une évaluation de l'épaisseur nécessaire de la couche de protection pour garantir la sécurité structurelle face à l'incendie.

Selon **Daniel Joyeux** [32], l'incendie est considéré comme une action accidentelle qui n'intervient pas directement comme une charge supplémentaire dans les combinaisons de charge. Cependant, il agit de manière indirecte en modifiant les caractéristiques mécaniques des matériaux, lesquelles dépendent de la température. L'auteur précise ainsi que l'action due à un incendie n'est pas de nature mécanique, mais plutôt thermique. La courbe température-temps, dite courbe conventionnelle, est obtenue à partir d'essais. Il s'agit d'une courbe monotone et croissante, sans limite définie, et utilisée pour évaluer la stabilité des éléments de structure sur des durées variant généralement entre 15 minutes et 6 heures, selon les réglementations. L'auteur examine également le flux de chaleur dans les éléments métalliques non protégés, tel que défini par l'EUROCODE 1. En supposant que la masse volumique de l'acier reste indépendante de la température, il explore les variations des propriétés thermiques de l'acier, notamment la chaleur spécifique et la conductivité thermique, en fonction de la température. De plus, le facteur de massivité est analysé en tenant compte de la protection ou non des éléments, ainsi que de leur niveau d'exposition au feu. Enfin, l'auteur

met en évidence l'importance cruciale de la protection des éléments en acier, qui permet de décaler le seuil de température critique au-delà duquel la stabilité structurelle est compromise.

Jean Marie Aribert [33], s'est fixé pour objectif d'optimiser le dimensionnement des poteaux mixtes, notamment en ajustant le pourcentage d'armature longitudinale, afin de garantir une résistance au feu donnée sans recourir à des protections extérieures comme les peintures intumescentes ou les produits projetés. L'annexe H de l'EN1994-1-2 recommande une méthode pour calculer la charge de flambement en condition d'incendie, intégrant potentiellement un certain excentrement. Avant cela, un calcul préliminaire du champ des températures doit être effectué pour la durée de résistance au feu visée. Cependant, cette méthode présente certaines limites, puisqu'elle ne prend pas en compte les imperfections structurelles des poteaux, comme les défauts de rectitude ou les contraintes résiduelles, ni les effets du second ordre. Ces insuffisances peuvent entraîner des résultats in sécuritaires pour les poteaux ayant un élancement important. Cette approche a été validée par des essais expérimentaux incluant différentes conditions aux limites. Les résultats obtenus, tels que les déplacements en tête des poteaux et les déformées transversales à mi-hauteur, se sont avérés très concluants. **Krippa et al.** [34] mettent en lumière les inconvénients des règlements descriptifs en matière de sécurité incendie, souvent adoptés par plusieurs nations. Ils préconisent une approche basée sur des tests expérimentaux, tels que l'analyse comparative du comportement d'un portique avec celui d'une poutre sur appuis continus, tout en soulignant que la durée du feu dépend principalement de la quantité et de la nature du combustible. Les auteurs précisent que le modèle de feu repose sur des paramètres physiques. À partir de ces constatations, ils proposent une démarche d'ingénierie incendie structurée en deux étapes principales : La première étape est une revue qualitative du projet, qui consiste à estimer les valeurs des paramètres liés au projet, en réalisant différents scénarios d'incendie. La seconde étape est une analyse quantitative du projet, où les méthodes appropriées sont employées pour évaluer les différentes propositions d'études retenues lors de la phase précédente, en utilisant le temps comme variable indépendante. Enfin, les résultats de l'analyse sont évalués par rapport aux critères d'appréciation. L'utilisation de l'ingénierie incendie pour concevoir des ouvrages permet ainsi une meilleure adéquation des mesures de sécurité aux risques réels. **Renaud et Joyeux** [35], en s'appuyant sur les hypothèses simplifiées des Eurocodes, ont proposé une méthodologie destinée aux éléments tendus et fléchis, permettant d'évaluer le degré de stabilité au feu des éléments exposés sur leurs quatre faces, à partir d'un taux de chargement défini dans des conditions normales d'utilisation. Ils

ont établi des valeurs tabulées pour vérifier la stabilité des profils métalliques en H, U ou I. Cette étude vise à protéger les structures métalliques en utilisant une protection caractérisée au préalable. Cependant, les auteurs précisent que le dimensionnement de ces structures peut être optimisé en appliquant les méthodes de calcul décrites dans l'Eurocode 3, partie 1-2.

Tableau 1-1 : Méthode de calcul à froid des poteaux métalliques.

Poteau de section rectangulaire	Poteau de section circulaire
$N_{Rd} = k_h \cdot k_s \cdot \alpha \cdot [b \cdot h \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{yd}]$	$N_{Rd} = k_h \cdot k_s \cdot \alpha \cdot [\frac{\pi D^2}{4} \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{yd}]$
$\alpha = \frac{0,86}{1 + \left(\frac{\lambda}{62}\right)^2} \quad \text{si } \lambda \leq 60$ $\alpha = \left(\frac{32}{\lambda}\right)^{1,3} \quad \text{si } 60 < \lambda \leq 120$	$\alpha = \frac{0,84}{1 + \left(\frac{\lambda}{52}\right)^2} \quad \text{si } \lambda \leq 60$ $\alpha = \left(\frac{27}{\lambda}\right)^{1,24} \quad \text{si } 60 < \lambda \leq 120$
$k_h = (0,75 + 0,5 h) \cdot (1 - 6 \rho \cdot \delta)$ pour $h < 0,50$ sinon $k_h = 1$	$k_h = (0,7 + 0,5 D) \cdot (1 - 8 \rho \cdot \delta)$ pour $D < 0,60$ sinon $k_h = 1$
$k_s = 1,6 - 0,6 \frac{f_{yk}}{500}$ pour $f_{yk} > 500$ et $\lambda > 40$ sinon $k_s = 1$	$k_s = 1,6 - 0,65 \frac{f_{yk}}{500}$ pour $f_{yk} > 500$ et $\lambda > 30$ sinon $k_s = 1$

Nechnech [36], a développé un modèle couplé endommagement-plasticité afin de décrire le comportement non linéaire du béton sous des chargements thermomécaniques. Ce modèle prend en compte les variations irréversibles des propriétés thermiques et mécaniques du matériau, ainsi que les interactions entre déformations thermomécaniques et la fermeture des fissures lors de cycles de chargement. En utilisant le principe de la contrainte effective, il parvient à découpler la réponse thermo-élasto-plastique de la réponse endommagée. Le modèle offre ainsi une analyse complète du béton soumis à des charges mécaniques et thermiques, tant en compression qu'en traction. Les paramètres utilisés dans le modèle sont déterminés expérimentalement à travers des essais simples. Toutefois, le modèle présente une limitation, notamment le choix d'une variable d'endommagement isotrope qui ne permet pas de représenter l'anisotropie liée à la fissuration. **Wu et Xu** [37], ont analysé le comportement structural des poteaux dont les sections sont soumises à l'influence du feu, en tenant compte de différentes conditions aux limites sous sollicitations axiales et excentrées. Leur étude, réalisée par la méthode des éléments finis, examine le développement des contraintes internes ainsi que les déformations au milieu des poteaux. Ils ont mis en évidence un accroissement

notable des forces axiales supplémentaires dans des colonnes de béton armé exposées à des sollicitations de feu. Cet accroissement peut atteindre environ 65 à 70 % des forces axiales constatées dans des colonnes à température ambiante. Par ailleurs, ils ont observé que l'augmentation de la déformation à mi-hauteur des poteaux est plus lente lorsqu'il n'y a pas de contrainte rotative, tandis qu'elle devient plus significative en présence de contraintes en rotation. **Wu et Lu** [38] ont utilisé le principe de travail virtuel pour établir un modèle analytique représentant le comportement des poutres en béton armé sous l'influence de températures élevées. Ce modèle a été confronté à des essais expérimentaux réalisés sur un portique renforcé par des contraintes axiales et rotatives élastiques, permettant une analyse paramétrique incluant le facteur temps. Ils ont constaté que la contrainte axiale induit une force de compression, augmentant la déflexion à mi-travée de la poutre lorsque la température s'élève. Plus la contrainte axiale est élevée, plus la déflexion augmente. **Franssen et Dotrepe** [39], ont mené une étude expérimentale pour analyser l'influence de la forme circulaire sur le comportement des poteaux en béton armé sous des conditions de feu. Dans leur recherche, ils décrivent en détail la procédure de test mise en œuvre, les observations effectuées et les valeurs obtenues concernant la résistance au feu. Des méthodes théoriques ont été développées pour concevoir de manière rapide, sûre et efficace des colonnes en béton armé adaptées aux conditions de feu, et ces méthodes ont été appliquées avec succès aux colonnes circulaires. Les auteurs ont également étudié différents cas de charges, ce qui leur a permis de déterminer la résistance au feu pour les quatre types de poteaux analysés.

Haouach et al. (2022) [40] ont étudié le comportement post-sismique de structures en béton armé exposées à un incendie. Leur démarche, consistant à simuler d'abord les effets d'un séisme puis d'un incendie standard ISO 834, constitue une base méthodologique intéressante pour l'évaluation de la stabilité résiduelle des éléments structurels. Cette approche pourrait également être transposée à des structures métalliques mixtes, notamment en aluminium, dans un objectif de résilience face à des événements extrêmes combinés. **Hassoune et al.** (2023) [41] ont analysé le comportement au feu de montants en acier formé à froid, isolés ou assemblés, soumis à une exposition sur deux faces. Cette étude met en évidence l'influence de la géométrie, du type de montage et de l'environnement d'exposition sur la résistance au feu. Leur approche comparative entre éléments simples et composés est particulièrement pertinente pour des structures mixtes en aluminium, où le confinement et la conduction thermique rapide posent des enjeux similaires. Les méthodes utilisées dans cet article servent de référence pour modéliser la montée en température, les modes de ruine, et les critères

d'acceptabilité thermique dans une structure métallique composite. **Benyettou Oribi et al.** (2023)[42] ont étudié le comportement thermique et mécanique des poutres en acier alvéolaires, soumises à des températures élevées. Leur analyse montre que les ouvertures influencent fortement la propagation de la chaleur ainsi que la résistance mécanique. Bien que leur étude porte sur l'acier, les résultats sont transposables aux structures mixtes en aluminium, où les zones creuses ou composites présentent des comportements thermiques similaires. Cette étude constitue une base méthodologique pour la modélisation des transferts thermiques et des pertes de rigidité dans des éléments structurels en situation d'incendie. **Merouani et al.** (2023) [43] ont analysé la réponse mécanique d'un cadre en acier soumis à un incendie post-sismique. Leur approche met en évidence l'importance d'intégrer les effets combinés d'un affaiblissement structurel initial avec une exposition thermique prolongée. Cette double sollicitation entraîne une réduction marquée de la résistance et de la stabilité. Une telle méthodologie peut être transposée à l'étude de poteaux mixtes en aluminium, particulièrement vulnérables à la chaleur, afin d'évaluer leur performance dans des conditions extrêmes réalistes. L'étude fournit également un cadre pertinent pour des modélisations numériques progressives dans ANSYS.

Dans une étude approfondie, **Merouani et al.** (2024) [32] ont évalué la performance de structures en acier soumises à un incendie survenant après un séisme. À travers une analyse par éléments finis, ils démontrent que la combinaison séisme + feu entraîne une perte importante de stabilité et une augmentation des déformations plastiques. Bien que leur étude cible l'acier, leur méthodologie est transposable aux poteaux mixtes en aluminium, qui présentent une sensibilité thermique plus élevée. Cette référence constitue une base solide pour la modélisation progressive de la dégradation thermique et mécanique d'une structure mixte soumise à des sollicitations extrêmes. Dans leur étude, **Benyettou Oribi et al.** (2024) [33] ont analysé l'effet des contraintes résiduelles sur le comportement au feu de poutres cellulaires en acier non contreventées. L'intégration de ces contraintes dans la simulation par éléments finis a révélé une dégradation anticipée de la stabilité thermique. Ce constat est transposable aux poteaux mixtes en aluminium, dans lesquels les contraintes internes ou les défauts de liaison peuvent jouer un rôle déterminant dans la résistance au feu. Cette étude met en lumière l'importance d'une modélisation précise des effets résiduels dans les simulations thermomécaniques. **Kada et Lamri** (2023) [44] ont analysé le comportement thermique de poutres longues non-retenues en acier soumises à un incendie standard. L'utilisation de la méthode des éléments finis a permis d'identifier une forte instabilité thermique, accentuée par

l'élanement et l'absence de contreventement. Ces observations sont pertinentes dans le cadre de l'analyse de poteaux mixtes en aluminium, notamment pour les sections élancées ou non stabilisées latéralement, qui présentent également une grande sensibilité au flambement sous effet thermique. **Kada et al.** (2023) [45] ont présenté une analyse numérique d'éléments en acier affaiblis par des ouvertures dans l'âme, soumis à une sollicitation thermique selon la courbe ISO 834. Les résultats montrent une chute significative de la résistance mécanique dans les zones localement affaiblies. Ce comportement peut être transposé à l'étude de poteaux mixtes aluminium-acier, notamment au niveau des interfaces et des sections non protégées. Cette approche confirme l'importance d'une modélisation thermique précise sous normes ISO ainsi que d'une évaluation détaillée des sections critiques par éléments finis

1.5.2. Comportement des structures en alliage d'aluminium sous incendie

Chen et al. [46] ont réalisé une analyse numérique détaillée du comportement d'alliages d'aluminium sous feu ISO 834. Leur étude a montré que la dégradation du module d'élasticité est non linéaire et s'accélère après 300 °C. Ils ont également démontré que la géométrie des sections influe fortement sur la capacité résiduelle, en particulier pour les profilés minces couramment utilisés dans les structures légères. **Gao et Zhang** [47] ont simulé le comportement thermique de poutres en aluminium protégées par des revêtements intumescents. Les résultats ont révélé une amélioration significative de la tenue au feu, retardant la température critique de plus de 20 minutes. Cette étude confirme l'intérêt de combiner des solutions de protection passive avec des matériaux légers dans les bâtiments publics ou industriels. **Kodur et Dwaikat** [48] ont proposé une approche basée sur la performance (performance-based design) pour la conception de structures en aluminium exposées au feu. Ils ont intégré des courbes de dégradation thermique dans leurs modèles numériques et ont montré que les structures en aluminium peuvent conserver une stabilité relative jusqu'à 500 °C si elles sont correctement dimensionnées et protégées. Leur méthodologie est aujourd'hui une référence dans les normes de sécurité incendie. **Portnov et Korolchenko** (2023) [49] ont examiné le comportement des structures en aluminium, notamment les colonnes en profilés creux et les ponts orthotropes, sous des conditions d'incendie. Ils ont découvert que l'utilisation de profils creux perméables à l'air et de revêtements de refroidissement augmentait la résistance au feu des structures en aluminium. Ces mesures permettent une meilleure dissipation de la chaleur, améliorant ainsi la performance des structures en cas d'incendie. **Wang et al.** (2022) [30] ont étudié le

comportement structurel des alliages d'aluminium en conditions d'incendie. Leur travail met en évidence la réduction significative des propriétés mécaniques des alliages d'aluminium à des températures élevées et souligne l'importance de développer des mesures de protection contre le feu adaptées pour ces matériaux. **Zhu et al.** (2023) [50] ont réalisé une analyse numérique des coques réticulées en alliage d'aluminium équipées de joints à gousset lorsqu'elles sont soumises à des conditions d'incendie. L'étude a révélé que l'élévation de la température affecte significativement la stabilité et la capacité portante de ces structures. Les résultats suggèrent que des mesures de conception spécifiques sont nécessaires pour améliorer la résistance au feu de ces coques. **Maljaars et Soetens** [51] ont mené les premiers essais sur des structures complètes en alliages d'aluminium sous l'effet du feu. Ces tests ont permis de valider les données expérimentales et de vérifier les modèles structurels existants. Ils ont confirmé que l'aluminium, bien qu'incombustible, perd rapidement sa résistance mécanique à haute température. Ils ont développé un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis (FE) pour simuler les performances des structures en conditions d'incendie prenant en compte la perte de rigidité et les déformations thermiques. Les résultats ont montré que l'aluminium, bien qu'incombustible, perd rapidement sa résistance mécanique à haute température, ce qui nécessite des mesures de protection supplémentaires pour garantir la sécurité des structures et ils ont recommandé l'utilisation de revêtements ignifuges et de matériaux isolants pour améliorer et garantir la sécurité des structures en aluminium. **Huang et Young** [52] ont mené des essais à haute température sur des colonnes en aluminium formées à froid. Ils ont constaté que les sections fines sont particulièrement sensibles au flambement local sous l'effet de la chaleur, et ont proposé une nouvelle formulation de réduction de résistance, à intégrer dans les calculs selon l'Eurocode 9. **Razaqpur et al.** [53] ont utilisé le logiciel SAFIR pour étudier la réponse thermique et structurale d'un bâtiment en aluminium à plusieurs étages. Leurs résultats indiquent que les planchers mixtes (aluminium-béton) permettent de contenir plus efficacement la chaleur dans les éléments porteurs, limitant ainsi les déformations excessives dans les poteaux et poutres en aluminium. **Chen et al.** [46] ont réalisé une analyse numérique détaillée du comportement d'alliages d'aluminium sous feu ISO 834. Leur étude a montré que la dégradation du module d'élasticité est non linéaire et s'accélère après 300 °C. Ils ont également démontré que la géométrie des sections influence fortement sur la capacité résiduelle, en particulier pour les profilés minces couramment utilisés dans les structures légères.

Gao et Zhang [47] ont simulé le comportement thermique de poutres en aluminium protégées par des revêtements intumescents. Les résultats ont révélé une amélioration significative de la tenue au feu, retardant la température critique de plus de 20 minutes. Cette étude confirme l'intérêt de combiner des solutions de protection passive avec des matériaux légers dans les bâtiments publics ou industriels. **Buchanan et Abu [54]** ont étudié l'impact du feu sur les jonctions boulonnées en aluminium. Ils ont constaté une perte prématurée de résistance due à l'expansion différentielle entre les composants métalliques. Leurs recommandations portent sur l'utilisation de boulonnerie adaptée à haute température ou sur le renforcement des zones d'assemblage critiques dans les systèmes en aluminium. **Liu et Tang [55]** ont développé un modèle thermomécanique pour analyser la réponse post-incendie de cadres en aluminium. Leur approche prend en compte non seulement l'effet de la température sur la résistance, mais aussi les déformations permanentes accumulées après refroidissement. Le modèle a été validé expérimentalement et peut être intégré dans des logiciels de calcul structurel. **Kodur et Dwaikat [48]** ont proposé une approche basée sur la performance (performance-based design) pour la conception de structures en aluminium exposées au feu. Ils ont intégré des courbes de dégradation thermique dans leurs modèles numériques et ont montré que les structures en aluminium peuvent conserver une stabilité relative jusqu'à 500 °C si elles sont correctement dimensionnées et protégées. Leur méthodologie est aujourd'hui une référence dans les normes de sécurité incendie.

Tessier et Lefrançois [56] ont exploré la réaction au feu de différents alliages d'aluminium (séries 6000 et 7000) à travers des essais thermogravimétriques. Ils ont observé que certains alliages traités thermiquement conservent mieux leur stabilité dimensionnelle, ce qui les rend plus adaptés aux applications dans les façades ou les structures exposées au feu. **Zhou et al. (2022) [57]** ont réalisé une revue approfondie des recherches sur le comportement au feu des structures en alliage d'aluminium. Leur analyse couvre les propriétés thermiques et mécaniques des alliages d'aluminium pendant et après un incendie, ainsi que le comportement des éléments structuraux, des joints et des systèmes complets. Ils discutent également des mesures de protection passive et active contre le feu et proposent des recommandations pour les recherches futures afin d'améliorer la résistance au feu des structures en aluminium. **Portnov et Korolchenko (2023) [49]** ont examiné le comportement des structures en aluminium, notamment les colonnes en profilés creux et les ponts orthotropes, sous des conditions d'incendie. Ils ont découvert que l'utilisation de profils creux perméables à l'air et de revêtements de refroidissement augmentait la résistance au feu des structures en aluminium

.Ces mesures permettent une meilleure dissipation de la chaleur, améliorant ainsi la performance des structures en cas d'incendie. **Li et al.** (2024) [58] ont mené des essais de traction standard pour analyser le comportement mécanique de l'alliage d'aluminium 6013-T6 à différentes températures, ainsi que son comportement résiduel après incendie. Leur étude fournit des données précieuses sur la performance de cet alliage sous des conditions thermiques élevées, contribuant à une meilleure. **Wang et al.** (2022) [30] ont étudié le comportement structurel des alliages d'aluminium en conditions d'incendie. Leur travail met en évidence la réduction significative des propriétés mécaniques des alliages d'aluminium à des températures élevées et souligne l'importance de développer des mesures de protection contre le feu adaptées pour ces matériaux. **Maljaars et al** (2009).ont étudié le flambement local des sections extrudées en aluminium soumises à des températures élevées. Leurs analyses, basées sur des modèles éléments finis validés, ont montré que les modèles de conception existants à température ambiante ne sont pas adaptés pour les conditions d'incendie. Ils ont proposé un nouveau modèle de conception pour prédire le flambement local sous des conditions de feu.

Cheng et al. [59] (2024).ont mené une investigation expérimentale sur l'alliage d'aluminium 7075-T6 à des températures allant de 20 °C à 550 °C. Ils ont constaté que les facteurs de rétention de résistance spécifiés dans les codes de conception européens, américains et chinois sont très imprécis pour ces alliages à haute résistance. L'étude propose de nouveaux modèles prédictifs pour estimer plus précisément les résistances résiduelles des alliages d'aluminium en cas d'incendie. **Sun et al.** [60] (2025) ont évalué les capacités résiduelles post-incendie des sections en angle inégales en alliage d'aluminium. Leurs recherches ont montré que, bien que la résistance diminue après un incendie, certaines sections conservent une capacité portante significative, ce qui est crucial pour l'évaluation post-incendie des structures

Chen et al. [61] (2024) ont étudié le comportement en flexion des joints à gousset en alliage d'aluminium après exposition à des températures élevées. L'analyse expérimentale et numérique a révélé une diminution significative de la rigidité et de la résistance des joints après un incendie. Les résultats soulignent l'importance de considérer les effets post-incendie dans la conception des structures en aluminium. **Nazrun et al** [62] (2024) ont comparé le comportement au feu de feuilles d'aluminium solides avec et sans revêtements intumescents. Les tests ont montré que certains revêtements intumescents peuvent améliorer la résistance au feu en retardant la montée en température et en réduisant la déformation. Cependant, tous les

revêtements ne sont pas également efficaces, soulignant la nécessité de sélectionner des matériaux de protection appropriés. **Goreta et al. [63] (2022)** ont étudié le comportement des colonnes en aluminium EN AW 6082 T6 soumises à un chauffage transitoire simulant des conditions d'incendie. Les résultats expérimentaux et numériques ont montré que la résistance des colonnes diminue avec l'augmentation de la température, mais que certaines configurations peuvent maintenir une capacité portante suffisante pendant une période critique. **Zhu et al. [50] (2023)** ont réalisé une analyse numérique des coques réticulées en alliage d'aluminium équipées de joints à gousset lorsqu'elles sont soumises à des conditions d'incendie. L'étude a révélé que l'élévation de la température affecte significativement la stabilité et la capacité portante de ces structures. Les résultats suggèrent que des mesures de conception spécifiques sont nécessaires pour améliorer la résistance au feu de ces coques.

Le tableau ci-dessous résume les principales études récentes portant sur le comportement des structures en aluminium en situation d'incendie. Il met en évidence les types d'analyses menées ainsi que les résultats majeurs obtenus par chaque équipe de recherche.

Tableau 1-2 : Tableau synthétique des recherches traitant du comportement au feu de l'aluminium.

Auteur(s)	Type d'étude	Résultats principaux
Chen et al.	Analyse numérique sous feu ISO 834	Dégradation non linéaire du module d'élasticité dès 300 °C
Gao & Zhang	Simulation thermique avec revêtement intumescent	Amélioration de la tenue au feu de +20 min
Kodur & Dwaikat	Conception basée sur la performance	Stabilité possible jusqu'à 500 °C avec protection
Portnov & Korolchenko	Colonnes creuses sous incendie	Refroidissement actif améliore la résistance au feu
Wang et al.	Étude thermique des alliages	Réduction importante des propriétés mécaniques à chaud
Zhu et al.	Analyse de coques réticulées	Perte de stabilité à haute température
Maljaars & Soetens	Essais sur structures complètes	Validation de modèles FE, nécessité de protection
Huang & Young	Colonnes formées à froid	Proposition de formule de réduction pour Eurocode 9
Razaqpur et al.	Simulation SAFIR d'un bâtiment	Planchers mixtes améliorent la tenue thermique
Buchanan & Abu	Jonctions boulonnées	Perte de résistance par dilatation différentielle
Liu & Tang	Réponse post-incendie	Déformations permanentes modélisées avec précision

Tessier & Lefrançois	Essais thermogravimétriques	Meilleure stabilité des alliages 6000/7000
Zhou et al.	Revue de littérature	Synthèse sur le comportement thermique et structurel
Li et al.	Essais sur l'alliage 6013-T6	Données sur résistance résiduelle post-incendie
Maljaars et al.	Flambement local à chaud	Modèle FE amélioré pour conditions d'incendie
Cheng et al.	Essais sur 7075-T6	Nouveaux modèles pour prédire la résistance à chaud
Sun et al.	Sections inégales post-incendie	Certaines sections conservent une capacité importante
Chen et al.	Joints à gousset après incendie	Diminution de rigidité et résistance
Nazrun et al.	Revêtements intumescents	Effet variable des revêtements sur la tenue au feu
Goreta et al.	Colonnes EN AW 6082 T6	Certaines configurations gardent une portance critique

L'aluminium, bien qu'incombustible, présente des caractéristiques spécifiques en matière de résistance au feu qui influencent son utilisation dans les structures :

- **Incombustibilité** : L'aluminium ne brûle pas et ne s'enflamme pas dans des conditions normales. Il fond à une température d'environ 600 °C, mais ne contribue pas à la propagation des flammes [64].
- **Conductivité thermique élevée** : Cette propriété permet à l'aluminium de dissiper rapidement la chaleur, réduisant les risques de points chauds susceptibles d'enflammer les matériaux environnants [65].
- **Réflectivité thermique** : L'aluminium peut réfléchir jusqu'à 80-90 % du rayonnement thermique, ralentissant ainsi l'augmentation de température dans les structures [64].

Du point de vue de la sécurité structurelle, l'analyse des structures dans des conditions d'incendie nécessite des méthodes de calcul appropriées pour évaluer avec précision leur résistance mécanique. Les principaux effets du feu sont les suivants la dégradation de la résistance et de la rigidité des matériaux, entraînant une réduction de la capacité de charge et une augmentation des déformations, et les déformations induites par la chaleur, qui peuvent amplifier les effets de second ordre et les contraintes internes. Ces facteurs doivent être soigneusement évalués pour garantir l'intégrité de la structure pendant l'exposition au feu [66].

Pour modéliser les incendies, une approche courante consiste à utiliser des scénarios standardisés, tels que la courbe ISO 834, qui servent de référence simplifiée par rapport aux

incendies réels. Ces modèles peuvent être reliés à des situations concrètes grâce à des critères d'équivalence. L'objectif principal de la conception des structures sous l'effet du feu est d'assurer leur stabilité pendant une durée déterminée, en cohérence avec la classe de résistance au feu définie par les normes. Cependant, l'analyse du comportement des structures complexes en situation d'incendie nécessite de prendre en compte des paramètres souvent ignorés par les méthodes simplifiées : non-linéarités géométriques et mécaniques, fluage, contraintes résiduelles, dilatations thermiques et évolution des propriétés des matériaux sous haute température. Une telle analyse requiert impérativement le recours à des logiciels de calcul par éléments finis pour une modélisation précise [67].

Au niveau européen, les Eurocodes constituent la référence principale en matière de codification. Ces normes offrent des dispositions exhaustives et fiables pour les matériaux courants, tels que l'acier et le béton armé. En revanche, elles s'avèrent moins précises pour les structures en alliages d'aluminium, notamment en raison des difficultés liées à la modélisation fiable du comportement de ces matériaux. Une analyse plus approfondie serait donc pertinente pour évaluer l'opportunité d'améliorer la schématisation de leur comportement mécanique. Une telle approche permettrait d'optimiser l'exploitation de leur capacité de résistance, tout en tenant compte de leur vulnérabilité accrue au feu [68].

1.5.3. Comparaison entre aluminium et autres matériaux

Le tableau ci-dessous présente une comparaison des principales propriétés thermiques et mécaniques de l'aluminium, de l'acier et du béton.

Tableau 1-3 : Comparaison entre aluminium et autres matériaux.

Matériau	Propriétés thermiques	Propriétés mécaniques
Aluminium	<ul style="list-style-type: none">• Conductivité thermique élevée : dissipe rapidement la chaleur.• Température de fusion relativement basse (550 °C) → limite son usage à très haute température [68].	<ul style="list-style-type: none">• Perte importante de résistance dès ~250 °C.• À 550 °C, capacité portante presque nulle [68].
Acier	<ul style="list-style-type: none">• Bonne résistance mécanique à haute température comparé à l'aluminium.• Sujet à des déformations importantes sous l'effet de la chaleur [16].	<ul style="list-style-type: none">• Commence à perdre sa résistance dès 400 °C.• Reste fonctionnel jusqu'à 600 °C.
Béton	<ul style="list-style-type: none">• Barrière thermique efficace : retarde la montée en température des éléments structurels.	<ul style="list-style-type: none">• Bonne résistance mécanique sous haute température.• Peut subir des fissurations dues à la dilatation thermique.

1.6. Cas de structures type portique avec poteaux protégés (mixtes)

Les poteaux mixtes sont des éléments structuraux qui combinent deux matériaux principaux, généralement l'acier et le béton, afin d'améliorer la résistance thermique et/ou mécanique des structures. Cette combinaison permet de tirer parti des propriétés complémentaires de chaque matériau pour optimiser la performance des bâtiments et infrastructures. On distingue deux types de poteaux mixtes :

- Les poteaux enrobés de béton, où le profilé métallique est entièrement ou partiellement recouvert de béton (figure 1-14) [69].
- Les poteaux remplis de béton, dans lesquels le profilé métallique est creux et son intérieur est rempli de béton (figure 1-14) [69].

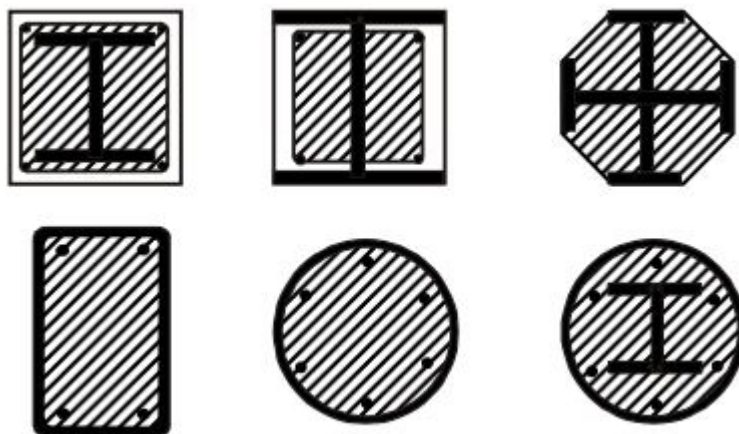


Figure 1-13 : Exemples types de sections transversales de poteaux mixtes [69].

1.6.1. Types de Poteaux Mixtes

1.6.1.1. Poteaux Aluminium-Béton

Composés d'un profilé en aluminium (souvent tubulaire ou en H) rempli de béton.

Objectif : compenser la faible résistance thermique de l'aluminium grâce à la masse thermique du béton.

Utilisés dans des structures légères à forte exigence esthétique (façades, portiques légers).

Bonne résistance à la corrosion et comportement au feu amélioré [70].

Dans le contexte de la résistance au feu, l'association de l'aluminium à un matériau plus stable thermiquement, comme le béton, constitue une solution pertinente pour améliorer le

comportement global de la structure [71]. L'aluminium, bien qu'avantageux pour sa légèreté, sa résistance à la corrosion et sa facilité de mise en œuvre, présente une faible résistance mécanique à haute température. En effet, sa résistance chute rapidement au-delà de 200 °C, ce qui limite son usage dans des structures exposées au feu sans protection adéquate. L'intégration du béton dans des poteaux composites aluminium-béton permet de retarder la montée en température du cœur du poteau, de réduire les déformations et d'accroître la stabilité mécanique sous sollicitation thermique [72].

Des études menées par Frangi & Fontana [71] (2003) et Davaine & Cajot [72] (2007) ont montré que ces poteaux mixtes peuvent satisfaire aux exigences de stabilité incendie sans recourir à des protections passives supplémentaires, à condition d'un dimensionnement adapté. Ces configurations mixtes offrent donc une solution efficace et légère pour les bâtiments où les critères de sécurité incendie, d'esthétique et de masse sont simultanément exigés. Le développement de cette technologie ouvre la voie à des conceptions novatrices dans les bâtiments à ossature métallique légère, en permettant l'intégration de l'aluminium dans des zones à risque thermique élevé [70], tout en respectant les exigences réglementaires en matière de sécurité incendie.

1.6.1.2. Poteaux Acier-Béton

Très répandus dans les bâtiments à plusieurs étages.

Le profilé acier central est combiné à un remplissage ou un enrobage en béton armé.

Allient résistance à la compression, ductilité et résistance au feu.

Peuvent prendre plusieurs formes : acier rempli, acier enrobé, poteau tubulaire rempli de béton armé [48].

1.6.1.3. Poteaux Bois-Béton

Le bois agit comme coffrage structurel ou âme centrale, coulé avec du béton.

Utilisés dans la construction écologique ou mixte (bâtiments durables).

Performances au feu variables selon le type de bois, sa section, et la qualité du béton.

1.6.2. Avantages des Poteaux Mixtes

Les poteaux mixtes (ou poteaux composites), généralement composés d'aluminium et de béton ou d'un autre matériau comme l'acier, combinent les propriétés de plusieurs matériaux pour améliorer les performances globales de la structure [73].

Voici les principaux avantages de ces poteaux mixtes, notamment dans le contexte du comportement au feu :

Amélioration de la résistance au feu

L'aluminium, seul, perd rapidement sa résistance mécanique au-delà de 200 °C.

Le remplissage en béton agit comme une barrière thermique, ralentissant la montée en température du noyau et maintenant la portance plus longtemps.

La masse thermique du béton permet de retarder l'effondrement sous l'effet d'un incendie [74].

Optimisation des performances thermiques

Le béton améliore l'inertie thermique, utile dans la régulation de la température intérieure du bâtiment.

Moins de déformation due à la dilatation thermique qu'avec un poteau 100 % aluminium.

Comportement ductile sous chargement

En combinant aluminium et béton, on obtient un comportement plus ductile, ce qui permet de mieux dissiper l'énergie en cas de séisme ou surcharge exceptionnelle.

Réduction des coûts de protection passive

Moins besoin de protection incendie (peintures intumescentes, encoffrements), car le béton intérieur joue un rôle protecteur naturel.

1.7. Conclusion

La recherche bibliographique souligne un intérêt croissant pour l'étude du comportement des structures en aluminium exposées au feu. Les avancées expérimentales et numériques ont permis de mieux comprendre les effets des hautes températures sur ce matériau, en particulier sa conductivité thermique et sa résistance mécanique. Le prochain chapitre analysera ces effets en s'appuyant sur les recommandations de l'Eurocode.

**CHAPITRE 2 PROPRIETES
THERMIQUES ET
MECANIQUES DE
L'ALUMINIUM ET CAS
D'ETUDE**

2.1. Introduction

L'aluminium et ses alliages offrent une combinaison unique de propriétés, ce qui en fait l'un des matériaux métalliques les plus polyvalents, les plus rentables et les plus attrayants pour une grande variété d'applications. Celles-ci vont de la feuille d'emballage hautement malléable aux utilisations techniques de haute performance. En fait, les alliages d'aluminium sont les deuxièmes métaux de structure les plus utilisés, dépassés seulement par l'acier [75].

L'un des principaux avantages de l'aluminium est sa faible densité - seulement 2,7 g/cm³, soit environ un tiers de celle de l'acier (7,83 g/cm³). À titre de comparaison, un pied cube d'acier pèse environ 222,26 kg, alors que le même volume d'aluminium ne pèse que 77.11 kg. Malgré leur légèreté, certains alliages d'aluminium peuvent atteindre des résistances supérieures à celles de l'acier de construction. Ce rapport résistance/poids fait de l'aluminium un matériau idéal pour la construction de structures durables et légères, en particulier dans les applications de transport telles que l'aérospatiale, l'automobile et la marine [75].

2.2. Propriétés thermiques et mécaniques de l'aluminium sous haute température

2.2.1. Propriétés thermiques

Ces propriétés thermiques sont particulièrement cruciales lorsque les éléments en aluminium de la structure se trouvent à proximité ou adjacents au foyer principal d'un incendie dans un autre bâtiment. Elles peuvent également jouer un rôle important dès les premiers instants d'un incendie majeur au la structure elle-même. Cependant, si les composants en aluminium sont fortement encrassés par de la suie, les avantages liés aux propriétés physiques des matériaux d'origine peuvent être réduits,

Le tableau 2-1 présente les propriétés physiques comparées de plusieurs alliages d'aluminium couramment utilisés et d'un acier de construction standard [76].

Tableau 2-1 : Propriétés physiques des alliages d'aluminium et de l'acier représentatives.

Matériau	Point de fusion (°C)	Point d'ébullition (°C)	Chaleur de fusion (kJ/kg)	Chaleur spécifique (J/kg·K)	Conductivité thermique (W/m·K)	Émissivité, ϵ	Coefficient de dilatation thermique ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)
1050-O	645–658	2425	90	900	229	0.02–0.10	25
508-O	574–648	2425	90	900	117	0.02–0.40	24.2
6005A-T5	605–655	2425	90	940	188	0.02–0.40	26
Acier ASTM E24	1400–1500	2860	250	420	54	0.10–0.80	15

2.2.1.1. Chaleur spécifique

La capacité thermique massique (propriété intensive) et la capacité thermique (propriété extensive) sont des concepts fondamentaux en thermodynamique, avec des implications pratiques cruciales. En particulier, constitue la base de tous les calculs théoriques et expérimentaux de transfert de chaleur.

La compréhension de la capacité thermique massique est restée cohérente depuis sa première étude documentée en 1760. Aujourd'hui, elle est généralement définie comme "la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'une unité de masse d'une substance d'un degré Kelvin."

Cependant, ce qui a évolué au fil du temps, c'est la précision de sa mesure. Les progrès des techniques expérimentales et des modèles computationnels ont considérablement amélioré l'exactitude des estimations de la capacité thermique massique, garantissant une meilleure efficacité et rentabilité dans les applications industrielles [77].

La chaleur spécifique de l'aluminium, C_{al} , doit être déterminée à partir de ce qui suit [78] :

Pour $0^\circ\text{C} < \theta_{al} < 500^\circ\text{C}$

$$C_{al} = 0,41 \cdot \theta_{al} + 903 \text{ (J/kg}^\circ\text{C)} \quad (2-1)$$

Note La variation de la chaleur spécifique est illustrée dans la figure (2-1).

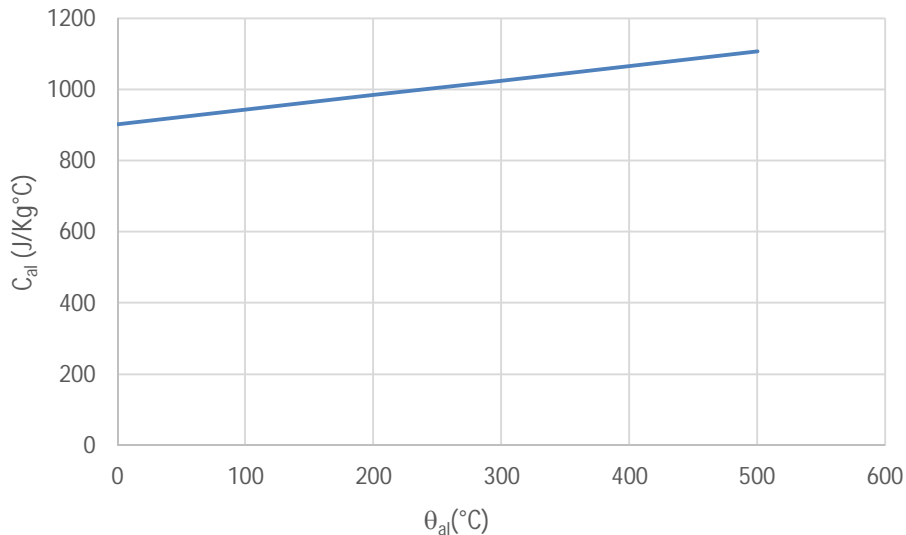


Figure 2-1 : Variation de la chaleur spécifique de l'aluminium en fonction de la température.

2.2.1.2. Élongation thermique

L'aluminium est un matériau dont la dilatation thermique est relativement élevée, ce qui signifie qu'il s'allonge lorsqu'il est exposé à une augmentation de température. Son coefficient de dilatation linéaire, estimé à $23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, entraîne une expansion plus prononcée par rapport à l'acier, influençant la stabilité des structures sous conditions thermiques extrêmes. Lors d'une exposition à des températures élevées, comme en cas d'incendie, l'aluminium absorbe rapidement la chaleur en raison de sa conductivité thermique élevée, ce qui peut accélérer la déformation des éléments de construction. Par exemple, une poutre en aluminium de 5 mètres soumise à une élévation de température de 200°C subira un allongement d'environ 23 mm, affectant ses connexions et sa capacité de résistance mécanique. Cette dilatation excessive peut engendrer des modifications géométriques importantes, influençant la répartition des charges et augmentant le risque de flambement ou de rupture. Pour pallier ces effets, plusieurs solutions sont mises en œuvre, notamment l'utilisation de joints de dilatation, de barrières thermiques et de revêtements ignifuges afin de limiter l'impact des variations de température sur la structure [79].

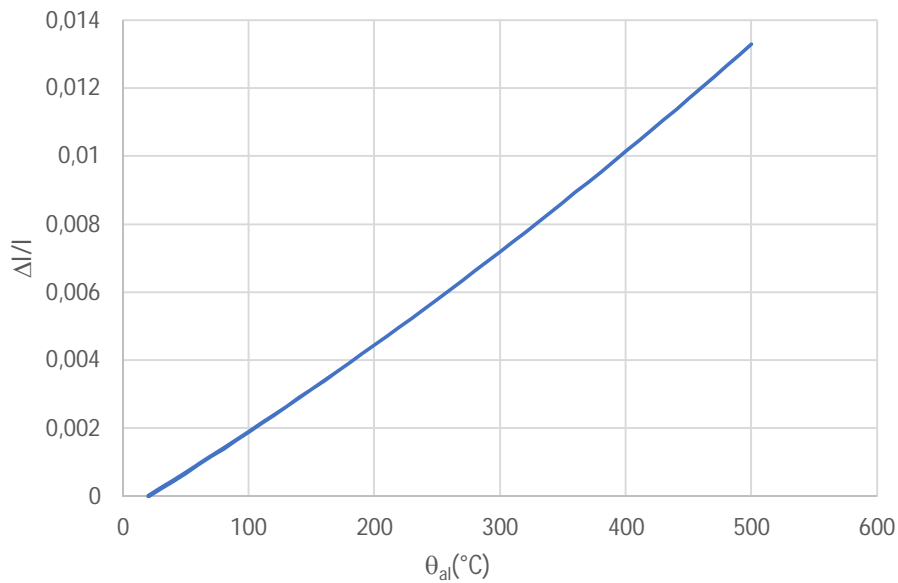


Figure 2-2 : Élongation thermique de l'aluminium en fonction de la température.

2.2.1.3. Conductivité thermique

L'aluminium présente une conductivité thermique de $237 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et une densité de $2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, soit environ un tiers de celle des aciers et des fontes. Les alliages d'aluminium, généralement alliés à des éléments tels que le Si, le Cu, le Mg et le Zn, offrent une combinaison de propriétés légères, de solides performances mécaniques et d'excellentes conductivités thermique et électrique. Compte tenu des préoccupations croissantes concernant le réchauffement climatique, les constructeurs automobiles adoptent de plus en plus des alliages d'aluminium légers pour réduire le poids des véhicules, ce qui permet de diminuer la consommation d'énergie et les émissions. De même, dans les télécommunications, les alliages d'aluminium moulés sous pression sont largement utilisés pour les radiateurs des stations de base en raison de leurs propriétés thermiques favorables [80].

La conductivité thermique est un paramètre critique pour les alliages d'aluminium dans ces applications. Par exemple, les composants automobiles résistants à la chaleur, tels que les blocs moteurs et les culasses, nécessitent une conductivité thermique élevée pour assurer une dissipation efficace et uniforme de la chaleur et maintenir des performances optimales du moteur. Parallèlement, à mesure que les systèmes de communication passent de la 4G à la 5G, les stations de base génèrent beaucoup plus de chaleur, ce qui entraîne une augmentation rapide de la température

des puces. Sans une dissipation efficace de la chaleur, les performances et la durée de vie des équipements risquent d'en pâtir [80].

Pour répondre à ces demandes en constante évolution, la recherche sur la conductivité thermique des alliages d'aluminium est essentielle pour développer des alliages de haute performance qui équilibrent l'efficacité thermique et la résistance mécanique [80].

La conductivité thermique de l'alliage d'aluminium, λ_{al} pour une température $0^\circ\text{C} < \theta_{al} < 500^\circ\text{C}$ est déterminée comme suit [78] :

- a) Pour les séries d'alliages 3xxx et 6xxx:

$$\lambda_{al}=0,07 \theta_{al}+190 \text{ (W/m}^\circ\text{C)} \quad (2-2)$$

- b) pour les alliages des séries 5xxx et 7xxx :

$$\lambda_{al}=0,1\theta_{al}+140 \text{ (W/m}^\circ\text{C)} \quad (2-3)$$

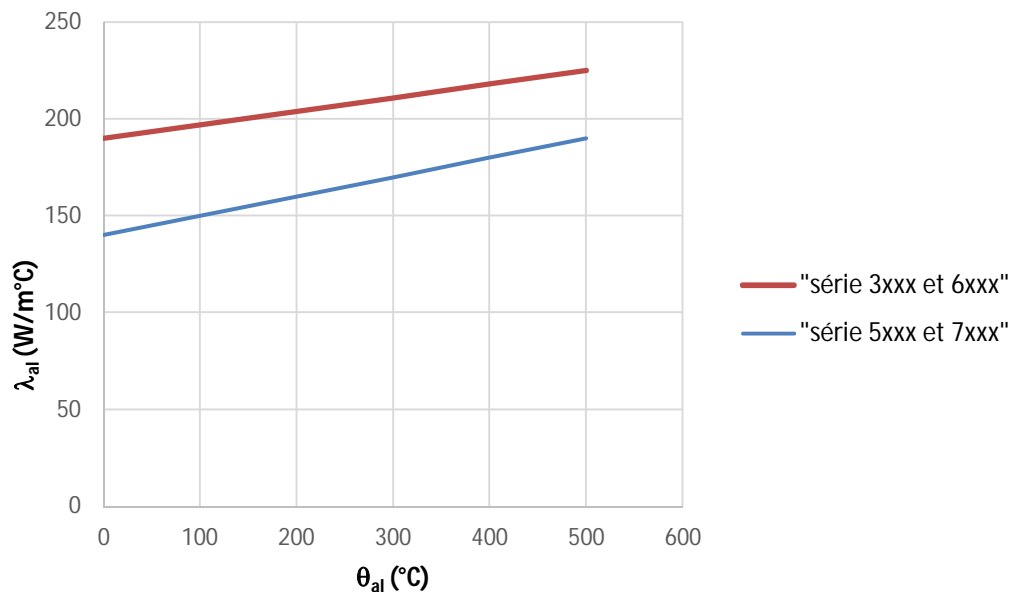


Figure 2-3 : Variation de la conductivité thermique de l'aluminium en fonction de la température pour différents alliages

2.2.1.4. Émissivité de l'aluminium

L'émissivité est un paramètre clé dans le transfert de chaleur par rayonnement, notamment en situation d'incendie. Elle caractérise la capacité d'un matériau à émettre de l'énergie thermique par rayonnement par rapport à un corps noir. Pour

l'aluminium, ce coefficient dépend fortement de l'état de surface, de la température et de l'éventuelle présence d'une couche d'oxyde [81].

Selon EN 1991-1-2 [14] : l'émissivité du membre est prise comme 1,0 (méthode conservatrice).

Pour une valeur réaliste et courante, on adopte $\varepsilon=0,8$.

2.2.2. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium se dégradent à des températures élevées, bien en dessous de leur point de fusion. Pour la plupart des alliages, une exposition prolongée à des températures supérieures à 150-200 °C (300-400 °F) entraîne une réduction de la résistance par rapport à la température ambiante, l'ampleur de l'affaiblissement augmentant à des températures plus élevées ou sur des durées plus longues.

Ces alliages ne sont généralement pas recommandés pour une utilisation à long terme dans cette plage de températures ou au-delà. Cependant, ils restent largement utilisés dans les applications à température ambiante jusqu'à 150-200 °C. Pour les applications à plus haute température, des alliages spécialisés en particulier ceux de la série aluminium-cuivre 2xxx, conçus pour une meilleure résistance à la chaleur - sont souvent choisis [76].

Les alliages d'aluminium standard fondent à environ de 600 °C et voient leur résistance mécanique diminuer de moitié vers 200 °C. Selon la norme EN9, les paramètres clés de leur comportement, comme la limite élastique conventionnelle et le module d'élasticité (E_T), évoluent avec la température, comme illustré sur la figure 2-5.

Plus précisément, la figure 2-5 présente la limite élastique à travers le coefficient de réduction. Ce coefficient exprime le rapport entre la résistance élastique à une température (T) donnée et celle mesurée à température ambiante [82].

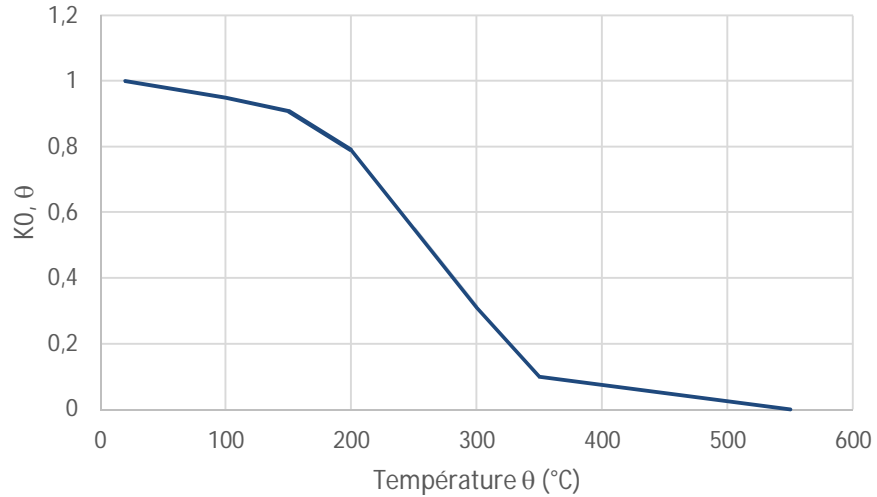


Figure 2-4 : Évolution du facteur de réduction $K_{0, \theta}$ en fonction de la température pour l'alliage EN-AW 6061 T6.

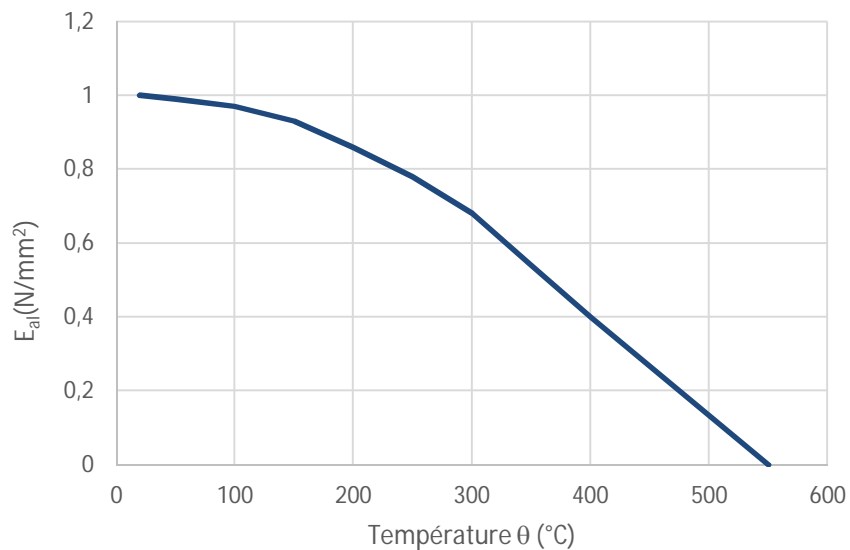


Figure 2-5 : Evolution de module de Young en fonction de la température.

2.2.2.1. Propriétés de résistance et de déformation

Pour une exposition thermique pouvant aller jusqu'à 2 heures, la résistance à 0,2 % à température élevée des alliages d'aluminium énumérés dans le tableau 2-2 est la suivante :

$$\hat{f}_{0, \theta} = k_{0, \theta} \cdot f_0 \quad (2-4)$$

Avec :

$\hat{f}_{0, \theta}$: est de 0,2 à température élevée

f_0 : est de 0,2 à température ambiante selon la norme EN 1999-1-1.

Tableau 2-2 : Tableau des Facteurs de Réduction des Propriétés Mécaniques des Alliages d'Aluminium selon l'Eurocode 9 - Annexe E [83].

Alloy	Temper	Aluminium alloy temperature °C							
		20	100	150	200	250	300	350	550
EN AW-3004	H34	1,00	1,00	0,98	0,57	0,31	0,19	0,13	0
EN AW-5005	O	1,00	1,00	1,00	1,00	0,82	0,58	0,39	0
EN AW-5005	H14 ¹⁾	1,00	0,93	0,87	0,66	0,37	0,19	0,10	0
EN AW-5052	H34 ²⁾	1,00	1,00	0,92	0,52	0,29	0,20	0,12	0
EN AW-5083	O	1,00	1,00	0,98	0,90	0,75	0,40	0,22	0
EN AW-5083	H12 ³⁾	1,00	1,00	0,80	0,60	0,31	0,16	0,10	0
EN AW-5454	O	1,00	1,00	0,96	0,88	0,50	0,32	0,21	0
EN AW-5454	H34	1,00	1,00	0,85	0,58	0,34	0,24	0,15	0
EN AW-6061	T6	1,00	0,95	0,91	0,79	0,55	0,31	0,10	0
EN AW-6063	T5	1,00	0,92	0,87	0,76	0,49	0,29	0,14	0
EN AW-6063	T6 ⁴⁾	1,00	0,91	0,84	0,71	0,38	0,19	0,09	0
EN AW-6082	T4 ⁵⁾	1,00	1,00	0,84	0,77	0,77	0,34	0,19	0
EN AW-6082	T6	1,00	0,90	0,79	0,65	0,38	0,20	0,11	0

1) The values may be applied also for temper H24/H34/H12/H32
2) The values may be applied also for temper H12/H22/H32
3) The values may be applied also for temper H22/H32
4) The values may be applied also for EN AW-6060 T6 and T66
5) The values do not include an increase in strength due to aging effects. It is recommended to ignore such effects.

La résistance à 0,2 % des alliages d'aluminium à température élevée, non couverte par le tableau 2-2, mais répertoriée dans des autres tableaux de la norme EN 1999-1-1 [12].

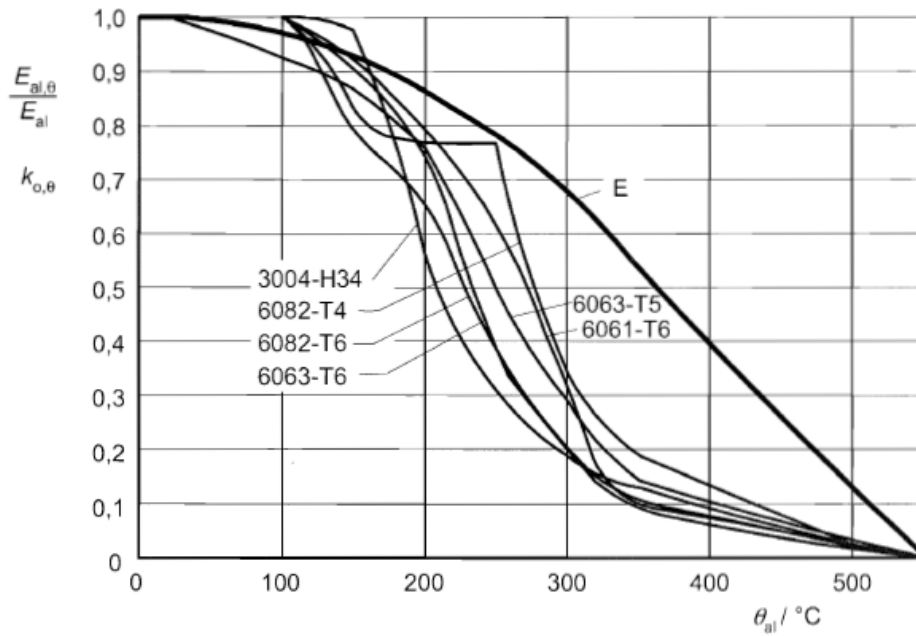


Figure 2-6 : Évolution du module d'élasticité réduit de différents alliages d'aluminium en fonction de la température (selon l'Eurocode 9).

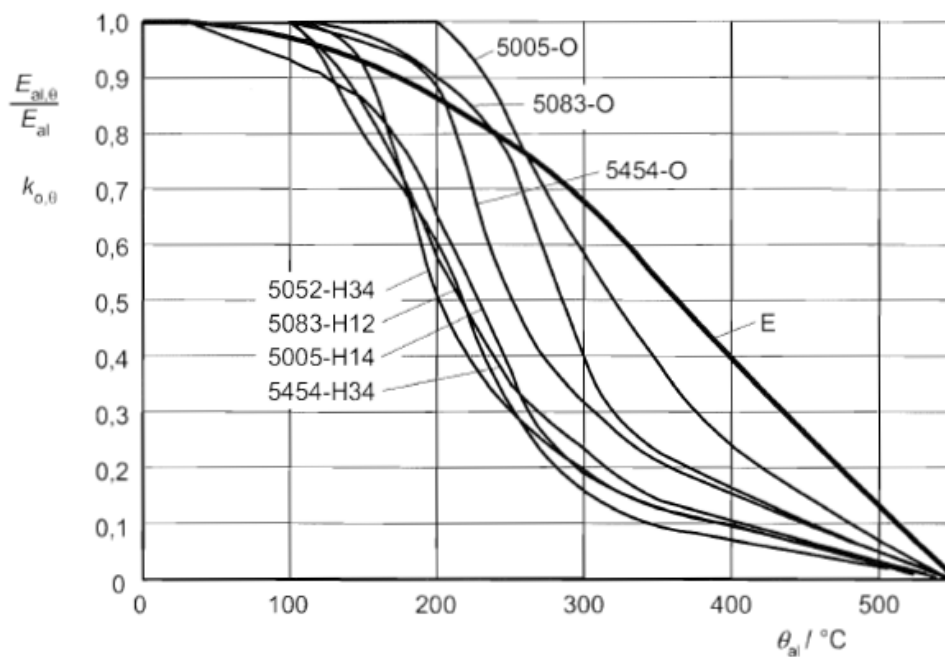


Figure 2-7 : Diminution du module d'élasticité relatif de différents alliages d'aluminium de la série 5xxx en fonction de la température (selon l'Eurocode 9)

2.2.2.2. Coefficients réducteurs k_θ selon la température

La figure ci-dessus présente l'évolution des coefficients réducteurs k_θ en fonction de la température pour l'aluminium, conformément aux recommandations de l'Eurocode 9 (EN 1999-1-2) [83]. On y observe trois courbes :

$E_{al\theta} / E_{al}$: Représente la réduction du module d'élasticité avec la température.

$k_{0,2,\theta}$ ($K0,\theta$): Représente la réduction de la limite d'élasticité (ou contrainte de preuve à 0,2 %).

$k_{u,\theta}$ ($K0, \theta$) : Représente la réduction de la résistance ultime à la traction.

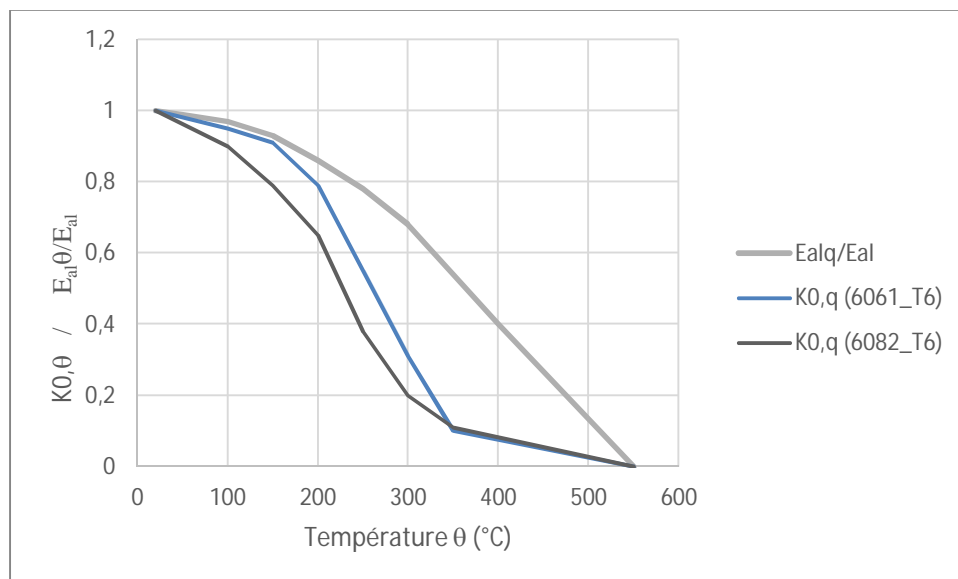


Figure 2-8 : Evolution de Coefficients réducteurs en fonction de la température.

2.2.2.3. Masse volumique

La masse volumique de l'aluminium ρ_{al} peut être considérée comme indépendante de la température de l'aluminium. La valeur suivante doit être prise [83] :

$$\rho_{al} = 2700 \text{ kg/m}^3.$$

2.2.2.4. Contrainte-déformation de l'aluminium

(a) Contrainte – déformation depuis la littérature

La modélisation du comportement mécanique des alliages d'aluminium est complexe, même à température ambiante, en raison de la grande variabilité liée à leur composition et aux procédés de fabrication. Les courbes contrainte-déformation ($\sigma-\epsilon$) montrent un durcissement plastique continu qui ne peut pas être reproduit fidèlement par des modèles simplifiés tels que le modèle élastique parfaitement plastique. À haute température, l'Eurocode 9 propose une approche simplifiée basée uniquement

sur les variations du module d'élasticité et de la limite d'élasticité, sans considérer les effets de durcissement. Pour surmonter ces limites, le modèle de **Ramberg-Osgood** est recommandé, car il permet de mieux représenter le comportement non linéaire des alliages d'aluminium, y compris en régime de grandes déformations [82], sa formulation générale s'exprime de la manière suivante :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{f_{0.2}} \right)^n \quad (2-5)$$

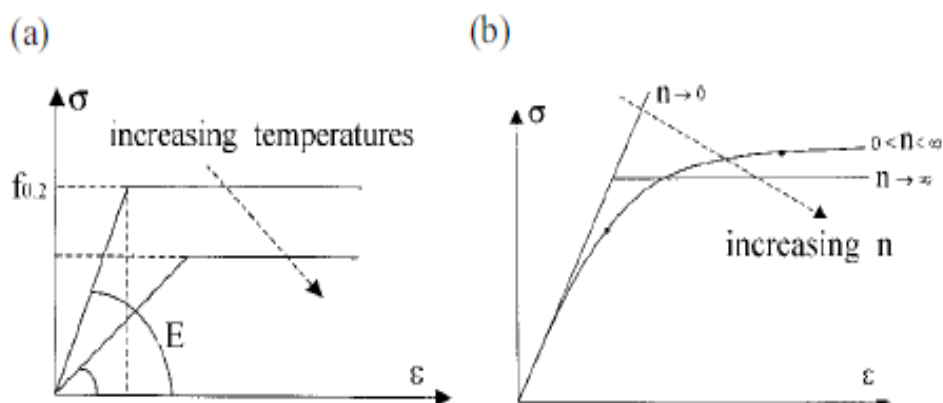


Figure 2-9 : Lois constitutives typiques des alliages d'aluminium.

(a) loi élastique-parfaitement plastique, (b) relation Ramberg-Osgood.

(b) Contrainte-déformation de l'aluminium depuis l'Eurocode

L'Annexe E [12] fournit des lignes directrices pour évaluer la résistance au feu des structures en aluminium, en considérant la dégradation des propriétés mécaniques (résistance et rigidité) avec l'augmentation de la température.

Modèles analytiques

La caractérisation analytique de la relation contrainte (σ) - déformation (ε) d'un alliage d'aluminium peut être effectuée à l'aide de l'un des modèles suivants :

- Modèles par morceaux
- Modèles continus

Les paramètres numériques qui définissent chaque modèle doivent être calibrés sur la base des propriétés mécaniques réelles du matériau. Celles-ci doivent être obtenues par des essais de traction appropriés ou, à défaut, sur la base des valeurs nominales indiquées pour chaque alliage dans la section 3.

Modèles linéaires par morceaux

Ces modèles reposent sur l'hypothèse selon laquelle le comportement du matériau (loi σ - ε) est décrit au moyen d'une courbe multilinéaire, dont chaque branche représente respectivement la région élastique, inélastique et plastique, avec ou sans durcissement.

Selon cette hypothèse, la caractérisation de la relation contrainte-déformation peut généralement être réalisée à l'aide de l'un des modèles suivants :

- un modèle bilinéaire avec et sans durcissement (équation 4).
- un modèle threlinéaire avec et sans durcissement (équation 5).

1. Modèle bilinéaire :

Si l'on utilise un modèle bi-Linear avec durcissement (figure 2-8 a), on peut supposer les relations suivantes [12] :

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{pour } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p. \quad (2-6)$$

$$\sigma = f_p + E1(\varepsilon - \varepsilon_p) \quad \text{pour } \varepsilon_p \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{max}. \quad (2-7)$$

Avec :

f_p : Limite élastique conventionnelle de proportionnalité.

ε_p : Déformation correspondante à la contrainte f_p .

ε_{max} : Déformation maximale correspondante à la contrainte f_{max} .

E : Module d'élasticité.

$E1$: module d'écrouissage.

Dans le cas où l'on suppose un modèle « élastique-parfaitement plastique » (figure 2-8 b), le matériau reste parfaitement élastique jusqu'à la contrainte limite élastique f_p . Les déformations plastiques sans durcissement ($E1 = 0$) doivent être prises en compte jusqu'à ε_{max} .

En l'absence d'une évaluation précise des paramètres ci-dessus, les valeurs suivantes peuvent être supposées pour les deux modèles des figures (2-8 a) et (2-8 b) :

$$F_p = \text{valeur nominale de } f_0.$$

$$F_{max} = f_u \text{ valeur nominale de } f_p.$$

$$\varepsilon_{max} = 0.5\varepsilon_u$$

$$\varepsilon_p = f_0 / E.$$

$$E1 = (f_u - f_0) / (0,5 \varepsilon_u - \varepsilon_p).$$

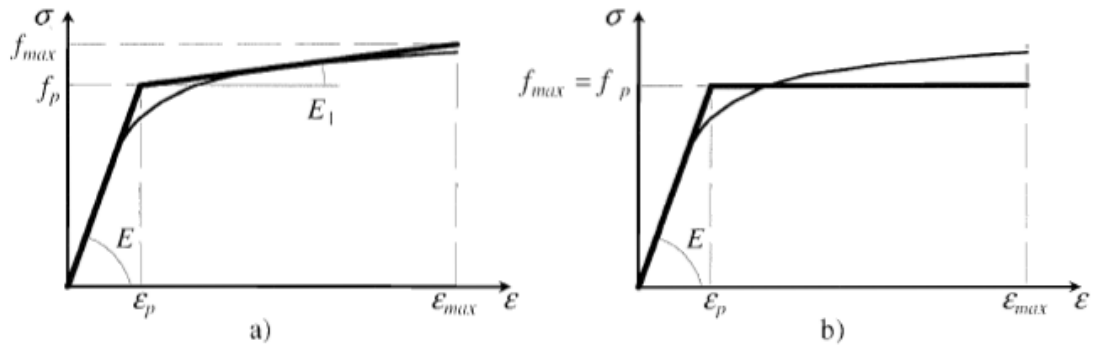


Figure 2-10 : Modèles bilinéaires.

2. Modèle tri-linéaire :

Si l'on utilise un modèle tri-linéaire avec écrouissage (figure 2-10 a), on peut supposer les relations suivantes [12] :

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{pour } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p \quad (2-8)$$

$$\sigma = f_p + E_1(\varepsilon - \varepsilon_p) \quad \text{pour } \varepsilon_p \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max} \quad (2-9)$$

$$\sigma = f_e + E_2(\varepsilon - \varepsilon_e) \quad \text{pour } \varepsilon_e \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max} \quad (2-10)$$

Avec :

f_p : Limite élastique conventionnelle de proportionnalité

f_e : Limite conventionnelle d'élasticité

ε_p : Déformation correspondant à la contrainte

ε_e : Déformation correspondant à la contrainte

ε_{\max} : Déformation correspondant à la contrainte F_{\max}

E_1 : Premier module de durcissement

E_2 : deuxième module de durcissement

Dans le cas où l'on suppose le modèle « parfaitement plastique » figure (2-10 b), déformations plastiques sans durcissement. ($E_2 = 0$) doit être pris en compte pour les plages de déformation comprises entre ε_e et ε_{\max} .

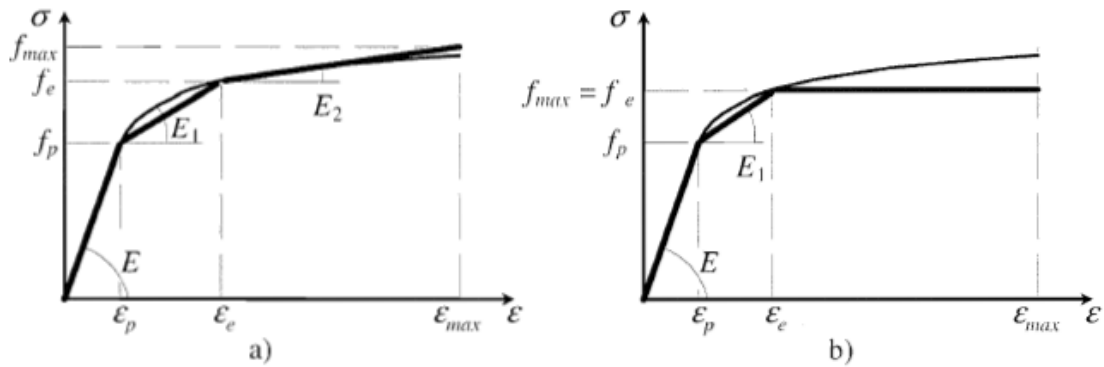


Figure 2-11 : Modèles tri-linéaires.

Dans notre étude on a utilisé les courbes portant relation contrainte-déformation (σ - ϵ) de l'aluminium de la figure (2-10) selon le modèle bilinéaire, qui est cohérent avec les principes de l'Annexe E de la partie 1-1 de l'Eurocode 9 en la combinant avec les coefficients de réduction de la partie 1-2 de l'EC9, pour l'évaluation du comportement au feu des structures en aluminium.

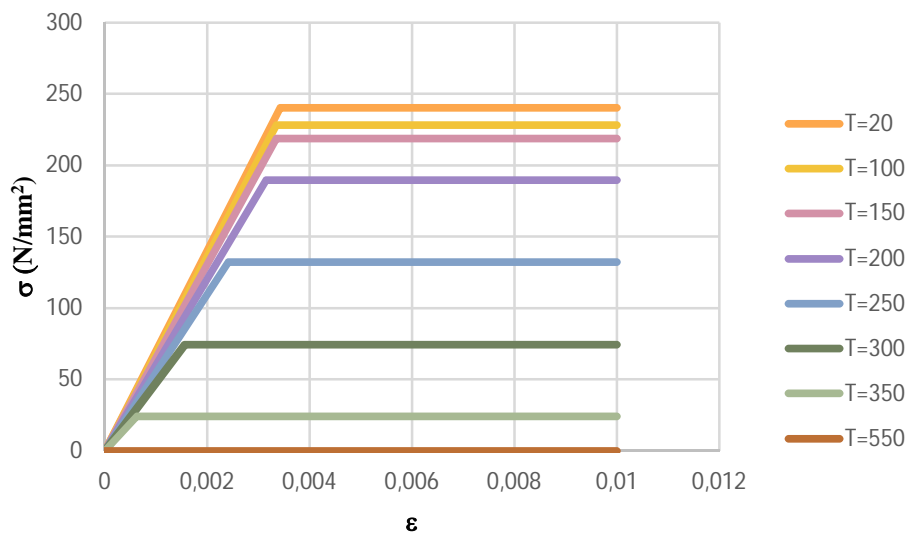


Figure 2-12 : Contrainte-déformation de l'aluminium T6061 en fonction de la température

2.3. Cas d'étude

2.3.1. Propriétés géométriques

Un portique en aluminium, conçu avec une simple travée et un seul niveau, a été sélectionné pour une analyse thermique sous l'influence d'un feu standard ISO834 et

un feu paramétrique. La structure se compose d'une poutre type IPE d'une longueur de 4 mètres, et deux poteaux type HEA d'une hauteur de 3 mètres. Les dimensions et la géométrie des sections sont décrites dans le tableau :

Tableau 2-13 : Dimension des sections des éléments du portique.

	h (mm)	b(mm)	tw (mm)	tf(mm)
Poteau type HEB	350	300	10	18
Poutre type IPE	250	260	18	13

Le portique est exposé à deux types de feux, soit un feu standard soit un feu paramétrique appliqué sur trois faces, prenant en compte deux modes de transfert thermique : la convection et le rayonnement.

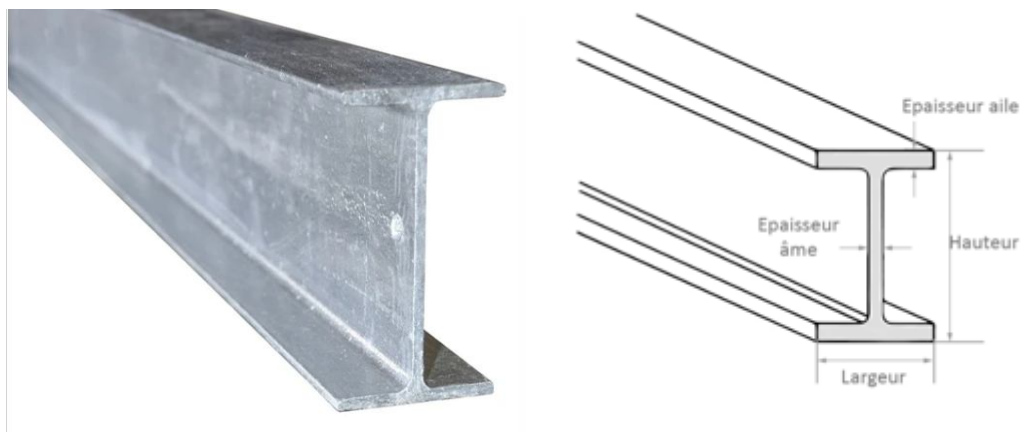


Figure 2-14 : Profil type IPE.

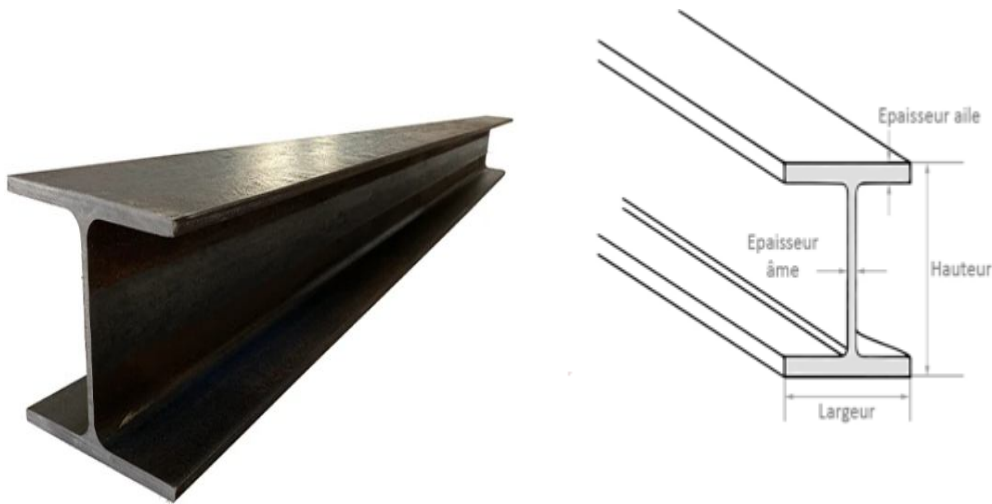


Figure 2-15: Profil type HEA.

2.3.2. Caractéristiques des feux appliqués sur la structure

2.3.2.1. Feu standard ISO 834

L'évaluation thermique d'un portique en aluminium avec protection des poteaux ou non est essentielle pour assurer sa sécurité et stabilité lorsqu'il est exposé à des températures élevées. Cette étude permet aux ingénieurs de :

- Optimiser la résistance au feu en améliorant maîtrisant l'évolution de la température en fonction du temps dans les éléments structuraux du portique.
- Prévoir et maîtriser les contraintes thermiques, notamment les déformations dues à la dilatation des matériaux.
- Affiner le choix des matériaux et le dimensionnement pour renforcer la stabilité structurelle.

Grâce à des outils de simulation comme ANSYS, il est possible de visualiser la répartition de la chaleur et les efforts internes subis par la structure. Ces analyses approfondies permettent d'améliorer la conception et la durabilité des structures en aluminium, assurant leur fiabilité face aux conditions extrêmes d'un incendie.

2.3.2.2. Feu paramétrique

Dans les études de comportement au feu des structures, le recours à des modèles réalistes d'incendie est essentiel pour représenter fidèlement l'évolution thermique à

l'intérieur d'un compartiment. Contrairement au feu normalisé (comme la courbe ISO 834), qui impose une montée uniforme de la température sans considération des conditions réelles, le feu paramétrique tient compte de paramètres spécifiques tels que les dimensions du local, les caractéristiques des matériaux combustibles, le taux de ventilation, la charge thermique et la durée effective du feu [84].

Le feu paramétrique permet ainsi de simuler l'évolution de la température dans un environnement fermé, depuis la phase de développement, jusqu'à l'embrassement généralisé et la décroissance thermique. Ce type de modélisation est particulièrement utile pour évaluer la résistance au feu dans des situations plus proches de la réalité, en intégrant les effets du compartimentage, de l'apport en oxygène et de la quantité de combustible disponible [84].

Dans le contexte de cette étude, l'introduction du feu paramétrique vise à évaluer l'impact thermique sur la stabilité d'un portique en aluminium, en considérant un scénario d'incendie réaliste pouvant survenir dans une structure fermée. Cette approche renforce l'analyse en offrant une évaluation plus précise des performances thermiques des éléments étudiés [84].

2.4. Conclusion

Les propriétés thermiques et mécaniques de l'aluminium offrent des avantages, notamment sa conductivité élevée ($235 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) qui favorise la dissipation de la chaleur, mais son faible point de fusion ($660 \text{ }^\circ\text{C}$) et son rayonnement limité le rendent sensible aux élévations thermiques. Mécaniquement, sa résistance spécifique est notable à température ambiante, mais elle chute drastiquement dès $200\text{-}300 \text{ }^\circ\text{C}$, nécessitant des mesures de renforcement. Dans ce contexte, lorsque le feu, qu'il s'agisse du feu ISO 834 avec sa progression régulière ou du feu paramétrique avec son intensité variable, est appliqué sur l'ensemble du portique, la protection est spécifiquement intégrée aux poteaux via l'utilisation de béton dans des structures à poteaux mixtes. Cette approche vise à améliorer la stabilité thermique et mécanique des poteaux, offrant une résistance ciblée face aux sollicitations incendie tout en laissant le reste du portique exposé, ce qui souligne l'importance d'une conception stratégique adaptée aux conditions thermiques.

**CHAPITRE 3 COMPORTEME
NT THERMIQUE D'UN
PORTIQUE A OSSATURE EN
ALUMINIUM SOUS L'EFFET
D'UN FEU STANDARD ET FEU
PARAMETRIQUE**

3.1. Introduction

Dans le domaine de la sécurité incendie appliquée aux structures, l'analyse du comportement thermique des matériaux est une étape fondamentale, malgré sa légèreté et sa résistance à la corrosion, en raison de sa vulnérabilité (perte de résistance dès 200 °C, fusion à 550 °C). Afin de mieux comprendre cette problématique, ce chapitre se consacre à l'étude du comportement thermique d'un portique en aluminium avec des poteaux mixtes, soumis à deux types de feu :

- le feu standard ISO 834, une courbe conventionnelle définissant une montée continue de la température sans décroissance.
- le feu paramétrique, une modélisation plus réaliste basée sur des paramètres propres au compartiment (ventilation, charge thermique, etc.).

Les poteaux mixtes, combinant aluminium et béton, agissent comme une protection pour retarder la chaleur et renforcer la stabilité, permettant une comparaison des impacts des deux scénarios d'incendie.

L'analyse thermique des structures en aluminium avec protection de poteaux ou non vise à atteindre plusieurs objectifs essentiels pour évaluer leur comportement face aux incendies et optimiser leur conception.

Les propriétés du matériau aluminium, telles que la chaleur spécifique, la conductivité thermique, la densité et l'élongation thermique, ont été définies conformément aux descriptions fournies dans le chapitre 2.

3.2. Modélisation numérique et conditions aux limites

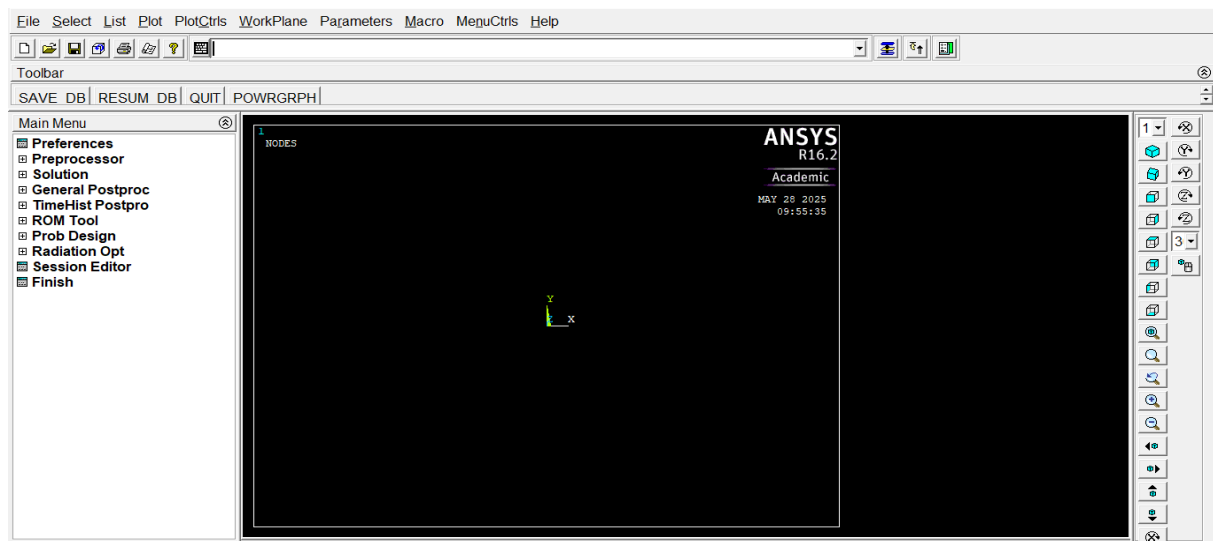
3.2.1. Utilisation d'ANSYS pour l'Analyse Thermique

Dans le cadre de cette étude, le logiciel **ANSYS** a été utilisé pour réaliser une analyse thermique transitoire de la structure soumise à un incendie. ANSYS est un outil de simulation numérique par éléments finis largement reconnu dans le domaine de l'ingénierie, notamment pour sa capacité à modéliser des phénomènes thermiques complexes en tenant compte des propriétés des matériaux, des transferts de chaleur (conduction, convection, rayonnement) et des conditions aux limites.

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

L'objectif principal de l'utilisation d'ANSYS dans ce travail est de simuler l'évolution de la température dans les différentes parties du portique à ossature en aluminium, lorsqu'il est exposé aux scénarios de feu : un feu standard (ISO 834) et un feu paramétrique. Le modèle numérique construit dans ANSYS permet de représenter la géométrie réelle du portique, de définir des maillages adaptés pour les zones critiques (comme l'âme et les semelles), et d'appliquer des lois de température dépendantes du temps.

L'analyse fournie par ANSYS permet ainsi une visualisation précise et localisée du comportement thermique, mettant en évidence les zones les plus sollicitées thermiquement et contribuant à une meilleure compréhension de la performance des solutions mixtes face au feu. Cette approche numérique complète efficacement les approches analytiques classiques et renforce la fiabilité des résultats obtenus.



CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

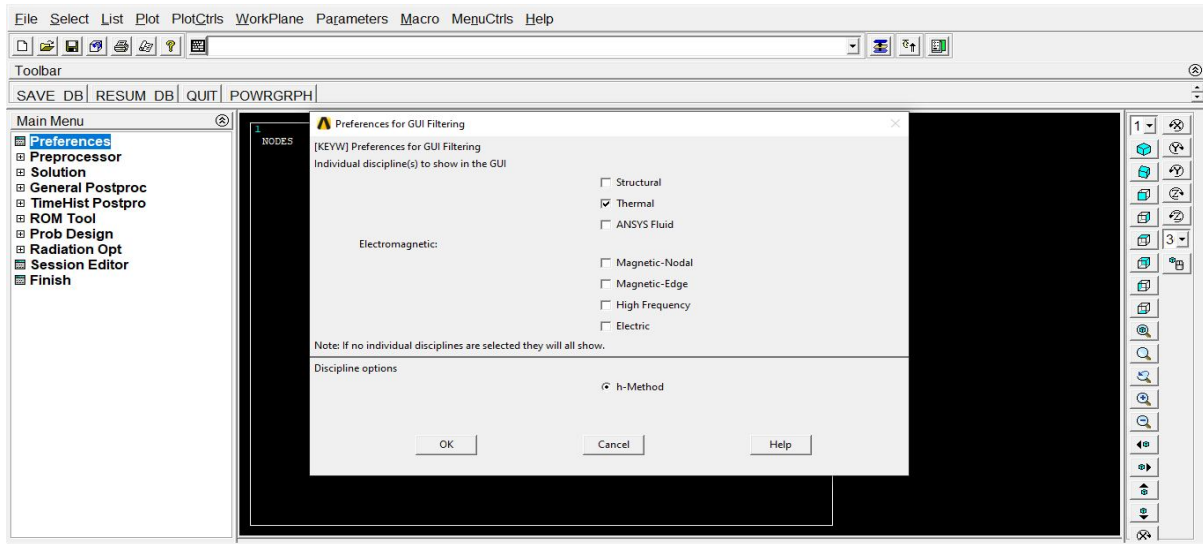


Figure 3-1 : Présentation de la face de travail du logiciel ANSYS.

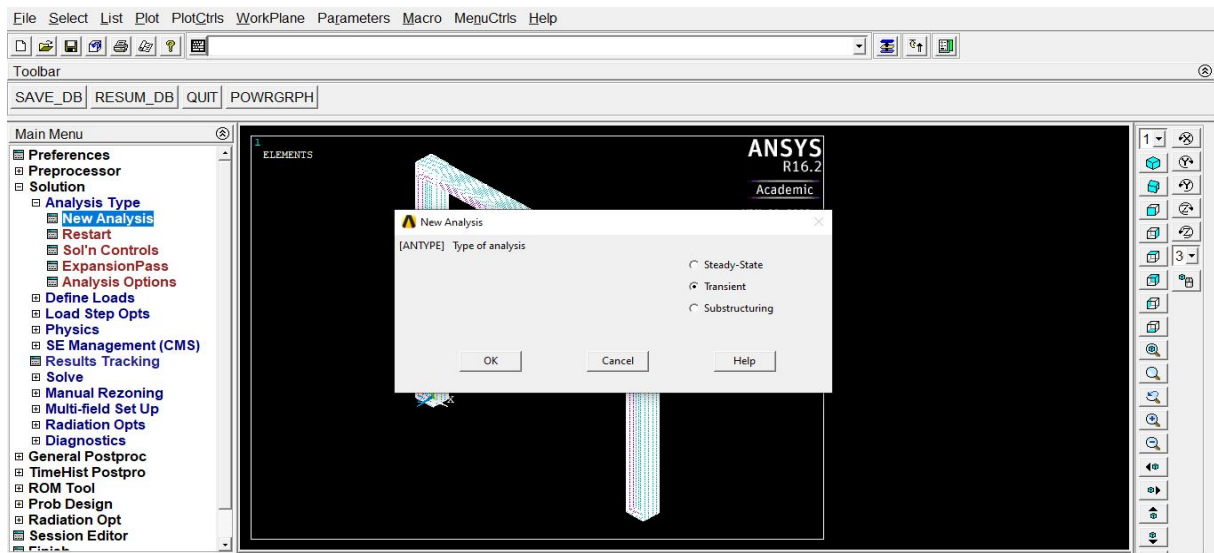


Figure 3-2 : Mode transitoire de l'analyse thermique.

3.2.2. Modèle élément fini et maillage

La géométrie du portique, composée d'une poutre horizontale et de poteaux verticaux, a été modélisée dans ANSYS en traçant une série de points connectés par des lignes, puis en générant les surfaces correspondantes en vue de l'analyse thermique.

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

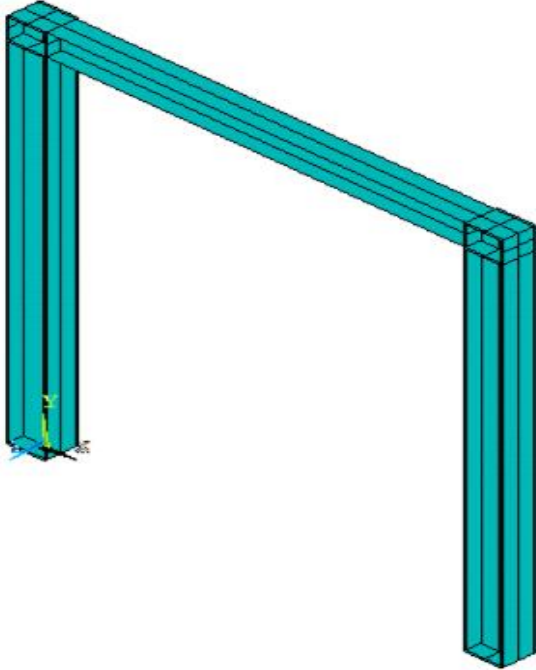


Figure 3-3 : Portique simple représenté par des surfaces et réalisé par ANSYS.

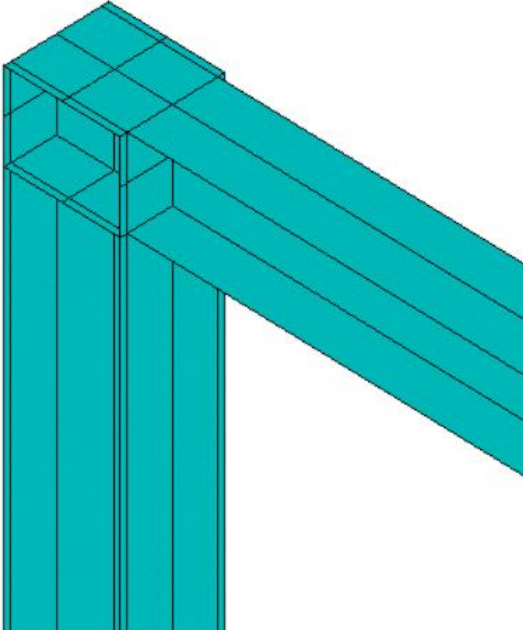


Figure 3-4 : Jonction poutre-poteau du portique réalisé par ANSYS.

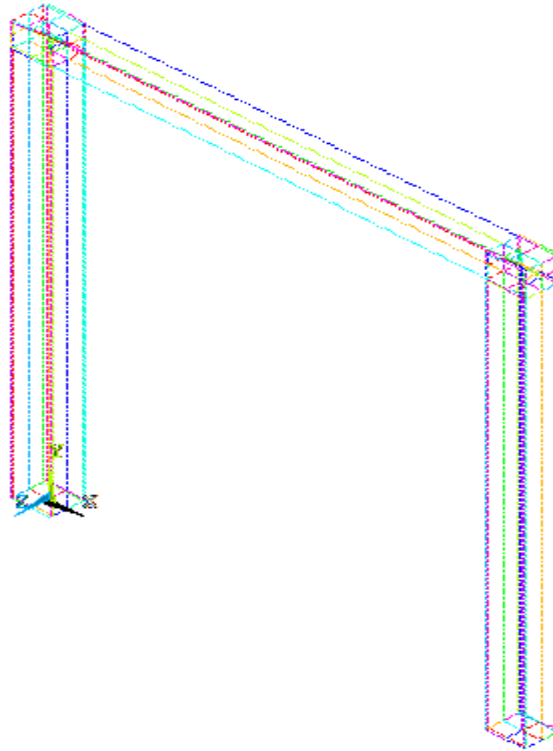


Figure 3-5 : Portique simple représenté par des lignes et réalisé par ANSYS.

3.2.2.1. Éléments finis thermiques utilisés dans les simulations

(a) L'élément SHELL 131

L'élément SHELL131 est un élément utilisé pour modéliser les éléments structuraux en aluminium. C'est un élément de coque multicouche en 3D possédant des capacités de conduction thermique dans le plan et à travers l'épaisseur. Il est composé de quatre nœuds, avec jusqu'à 32 degrés de liberté thermique à chaque nœud [85].

Cet élément conducteur est utilisé pour des analyses thermiques stationnaires ou transitoires en trois dimensions. Il peut générer des températures qui peuvent être transmises aux éléments de coque structurels afin de modéliser la flexion thermique.

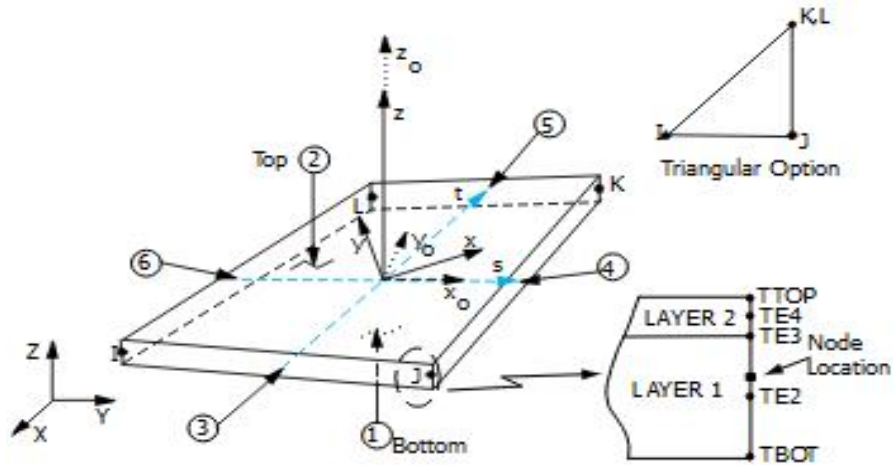


Figure 3-6 : Géométrie de l'élément SHELL131 [85].

(b) L'élément SOLID70

C'est un élément qui est utilisé pour modéliser thermiquement le béton choisi comme protection des poteaux en aluminium.

Cet élément a les caractéristiques suivantes :

- Type : Élément solide 3D (éléments de volume)
- Utilisation : Parfait pour modéliser le béton ou l'aluminium dans des structures générales.
- Caractéristiques :
 - 8 nœuds avec 3 degrés de liberté (U_x , U_y , U_z)
 - Supporte les grandes déformations et les non-linéarités
 - Utilisable pour des analyses thermiques.

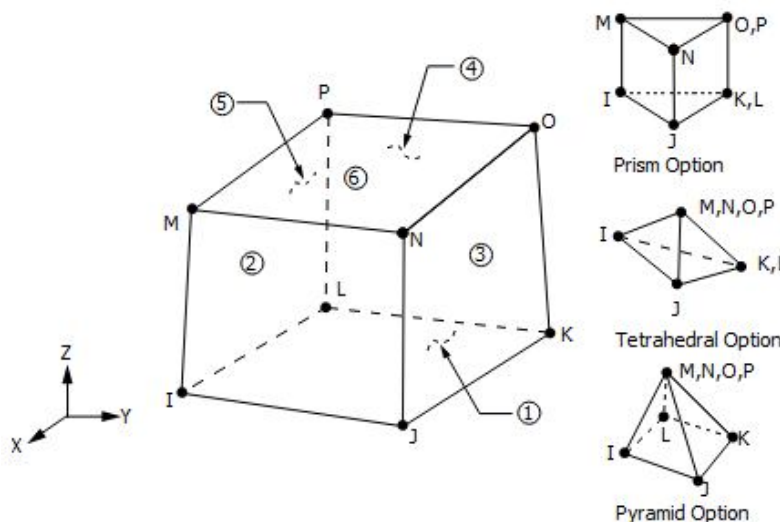


Figure 3-7 : Géométrie de l'élément SOLID70.

3.2.2.2. Maillage de la structure

Les éléments du portique ont été discrétisés en maillage par la méthode des éléments finis, avec une subdivision en 100 divisions pour les poteaux et 100 divisions pour la poutre.

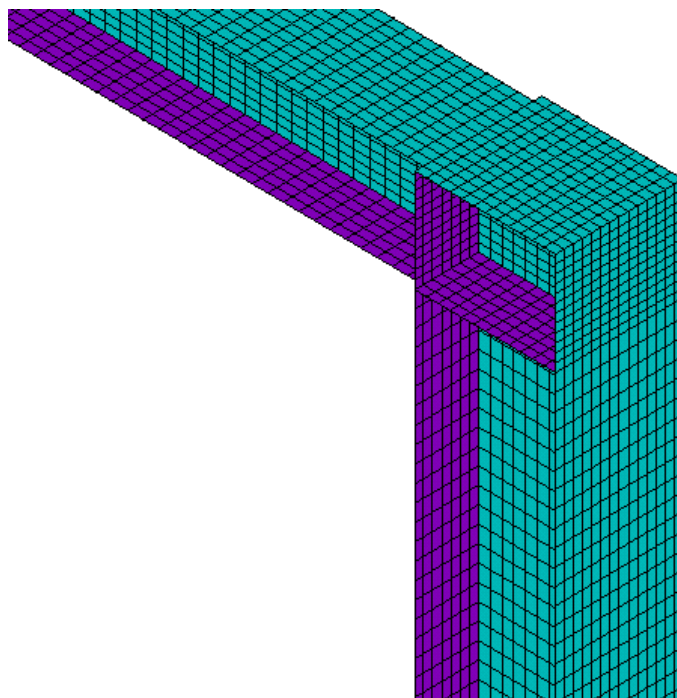


Figure 3-8 : Maillage du portique à ossature en aluminium avec raffinement localisé au niveau des connexions (élément SHELL131 – ANSYS).

3.2.3. Définition des Conditions aux Limites

Pour l'analyse thermique d'un portique en aluminium avec poteaux mixtes sous l'effet d'un feu standard, les conditions aux limites sont essentielles pour simuler avec précision les interactions thermiques et structurales. Voici leur définition typique dans ce contexte :

3.2.3.1. Convection

La convection représente le transfert thermique entre les surfaces du portique et le fluide environnant (air, eau, etc.), jouant un rôle clé dans l'analyse thermique. Voici les étapes détaillées :

(a) Définir les Surfaces de Convection :

- **Sélection des surfaces exposées** : Identifier les faces du portique directement exposées à la source thermique, comme celles orientées vers l'incendie.

(b) Appliquer les Conditions de Convection :

- **Face exposée :** un coefficient de convection $\alpha = 25 \text{ W/K.m}^2$ est attribué à cette surface, représentant les échanges thermiques avec l'air environnant.

Ce coefficient reflète les conditions de transfert intensifiées par l'exposition directe au feu.

Ces paramètres de convection permettent de modéliser avec précision les transferts de chaleur dans le portique, assurant une analyse thermique fiable et adaptée à la structure en aluminium exposée à un feu standard.

3.2.3.2. Rayonnement

(a) Sélection des surfaces de rayonnement :

- Identifier les surfaces du portique qui participent aux échanges thermiques par rayonnement, c'est-à-dire celles capables d'émettre ou d'absorber de l'énergie thermique.

(b) Définition des émissivités des matériaux :

- Attribuer à chaque matériau de la structure (aluminium, béton, etc.) une valeur d'émissivité correspondant à sa capacité à émettre ou absorber le rayonnement thermique. Par exemple, l'émissivité de l'aluminium est généralement faible en raison de sa surface réfléchissante, sauf s'il est revêtu.

(c) Définition des températures de référence :

- Spécifier les températures à partir desquelles les échanges de chaleur par rayonnement seront évalués. Cela inclut la température des surfaces de la structure et celle de l'environnement ambiant ou des sources de chaleur.

Ces paramètres permettent de modéliser avec précision le transfert de chaleur par rayonnement, un aspect crucial pour prédire le comportement thermique des structures en aluminium sous des conditions de feu.

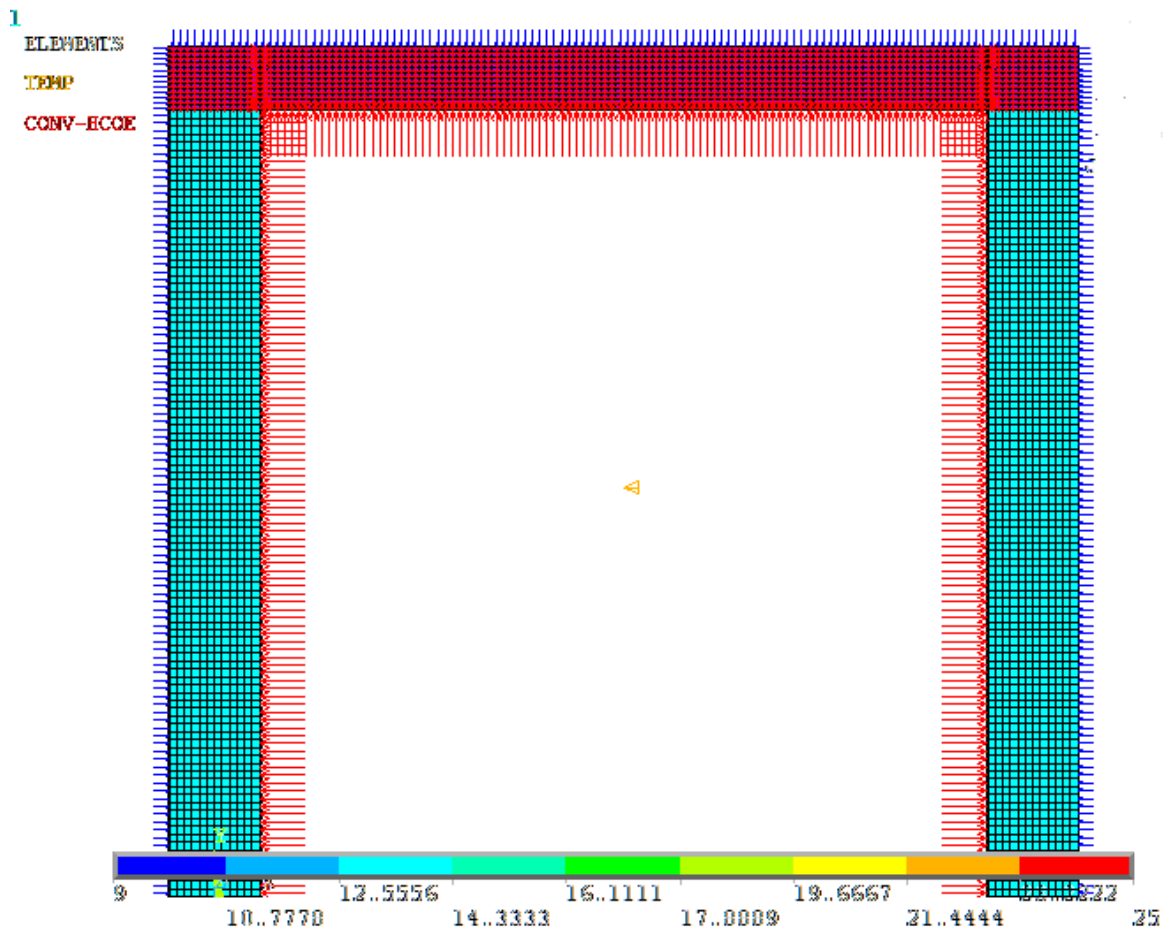


Figure 3-9 : Modélisation thermique d'un portique soumis à la convection et au rayonnement.

3.3. Etude thermique par la méthode analytique

L'évolution de la température en fonction du temps pour un élément de structure est donnée pour une section non protégée selon l'Eurocode 3 partie 1-2 [42].

Pour une distribution uniforme équivalente de la température dans la section transversale, l'augmentation de température dans un élément en acier non protégé pendant un intervalle de temps doit être déterminée à partir

$$\Delta\theta_{al,t} = K_{sh} \frac{Am/V}{c_{al} \cdot \rho_{al}} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (3-1)$$

Où :

- K_{sh} est le facteur de correction pour l'effet d'ombre,
- Am/V est le facteur de section pour les éléments en aluminium non protégés [1/m]

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

- A_m est la surface de l'élément par unité de longueur [m^2/m]
- V est le volume de l'élément par unité de longueur [m^3/m]
- c_{al} est la chaleur spécifique de l'aluminium [J/kgK]
- $\dot{h}_{net.d}$ est la valeur de conception du flux de chaleur net par unité de surface [W/m^2]
- Δt est l'intervalle de temps [secondes]
- ρ_{al} est la masse unitaire de l'aluminium [kg/m^3]
- Pour les sections en I sous actions de feu nominales, le facteur de correction pour l'effet d'ombre peut être déterminé à partir de :

$$K_{sh}=0,9 [A_m / V] b [A_m / V] \quad (3-2)$$

où :

- est la valeur en boîte du facteur de section

Dans tous les autres cas, la valeur de doit être prise comme :

$$K_{sh} = [A_m / V] b [A_m / V] \quad (3-3)$$

Les actions thermiques sont données par le flux de chaleur net [W/m^2] à la surface de l'élément. Sur les surfaces exposées au feu, le flux de chaleur net doit être déterminé en considérant le transfert de chaleur par convection et radiation comme suit :

$$\dot{h}_{net.d} = \dot{h}_{net.c} + \dot{h}_{net.r} \quad (3-4)$$

où :

- $\dot{h}_{net.r}$ est donné par (2-5)
- $\dot{h}_{net.c}$ est donné par (2-6)

(3) Le composant de flux de chaleur convective net doit être déterminé par :

$$\dot{h}_{net.c} = \alpha_c \cdot (\theta_g \cdot \theta_m) \quad (3-5)$$

- α_c est le coefficient de transfert de chaleur par convection [W/m^2K]
- θ_g est la température du gaz à proximité de l'élément exposé au feu [$^{\circ}C$]

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

- θ_m est la température de surface de l'élément [°C]

Sur le côté non exposé des éléments séparateurs, le flux de chaleur net doit être déterminé en utilisant l'équation 3-2, avec $\alpha_c = 4$ [W/m²K]. Le coefficient de transfert de chaleur par convection doit être pris comme $\alpha_c = 9$ [W/m²K], en supposant qu'il contient les effets du transfert de chaleur par radiation

Le composant de flux de chaleur radiative net par unité de surface est déterminé par :

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \cdot \epsilon_m \cdot \epsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (3-6)$$

- ϕ est le facteur de configuration
- ϵ_m est l'émissivité de surface de l'élément
- ϵ_f est l'émissivité du feu
- σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($= 5.67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴)
- θ_r est la température de radiation effective de l'environnement de feu [°C]
- θ_m est la température de surface de l'élément [°C]

La courbe température-temps standard est donnée par :

$$\Theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad (3-7)$$

où :

- Θ_g est la température du gaz dans le compartiment d'incendie.
- t est le temps (secondes).

L'évolution de la température en fonction du temps pour un élément de structure en acier formé à froid est donnée par la figure ci-dessous.

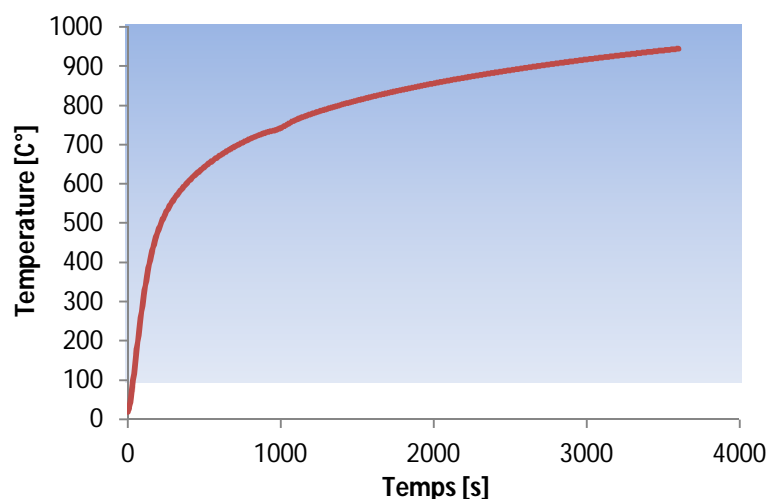


Figure 3-10 : Evolution de la température en fonction du temps par la méthode analytique pour un élément de structure.

3.4. Analyse numérique

L'étude numérique constitue une étape essentielle dans l'évaluation du comportement thermique d'une structure soumise à un incendie. Elle permet de simuler, de manière contrôlée et précise, la propagation de la chaleur des matériaux, en tenant compte des caractéristiques géométriques, des propriétés thermo-physiques et des conditions aux limites. Dans ce travail, la modélisation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel **ANSYS**.

Le modèle étudié est un portique à ossature en aluminium, composé de poutres et des poteaux protégés ou non. La géométrie a été définie de manière simplifiée mais représentative, afin de conserver l'essentiel des phénomènes thermiques. Un maillage adapté a été généré, avec un raffinement localisé dans les zones critiques (jonctions, semelles, âme des poteaux) pour assurer une meilleure précision des résultats.

Deux types de scénarios thermiques ont été appliqués :

- Un feu standard ISO 834.
- Un feu paramétrique.

Les conditions aux limites comprennent un échange par convection (coefficient $\alpha = 25$ W/m²·K) et par rayonnement (émissivité $\varepsilon = 0,8$), tandis que la température initiale de la structure est fixée à 20 °C. Le temps total de simulation est de 3600 secondes (1 heure), avec un pas de temps permettant de suivre finement l'évolution thermique.

Cette modélisation permet de suivre la distribution de température dans les différents éléments du portique au cours du temps, et de comparer les résultats obtenus selon le type de

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

feu appliqué. Les données extraites servent ensuite à interpréter la performance thermique de la structure et à identifier les zones les plus exposées ou nécessitant un renforcement.

3.4.1. Application du feu sur le portique

Afin de simuler le transfert thermique, on applique le feu par les deux modes de propagation : par convection autour des éléments, α il est fixé à $25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ sur les faces exposées au feu et par rayonnement.

MODEL SOLUTION

STEP=1
SUB =50
TIME=3600
TEMP [K]
KSYS=0
SMN =590.477
SMX =863.493

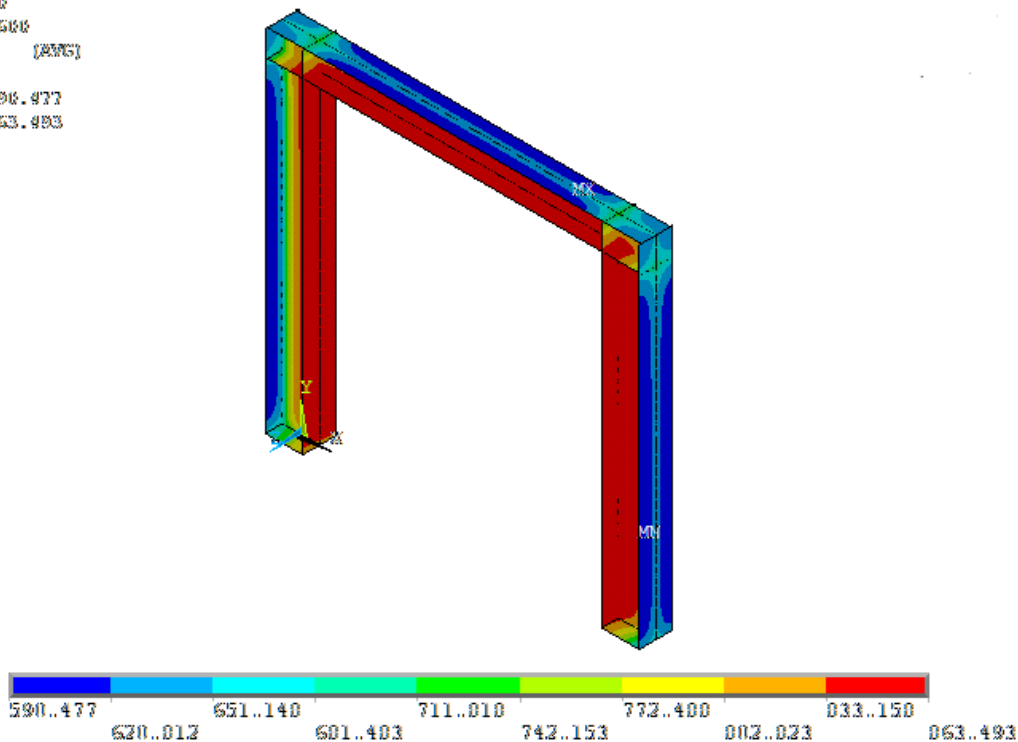


Figure 3-11 : Distribution de la température au portique après une exposition au feu de 3600s.

3.4.2. Analyse thermique du poteau et de la poutre en aluminium sous le feu standard ISO834

3.4.2.1. Analyse thermique du poteau sous le feu ISO 834

Le graphique présenté ci-dessous montre l'évolution de la température en fonction du temps pour un poteau en aluminium soumis à un feu standard ISO 834. On y distingue cinq courbes

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

représentant : les semelles intérieure et extérieur du poteau, l'âme, l'ISO834, et la courbe analytique selon EN 1999 1-2.

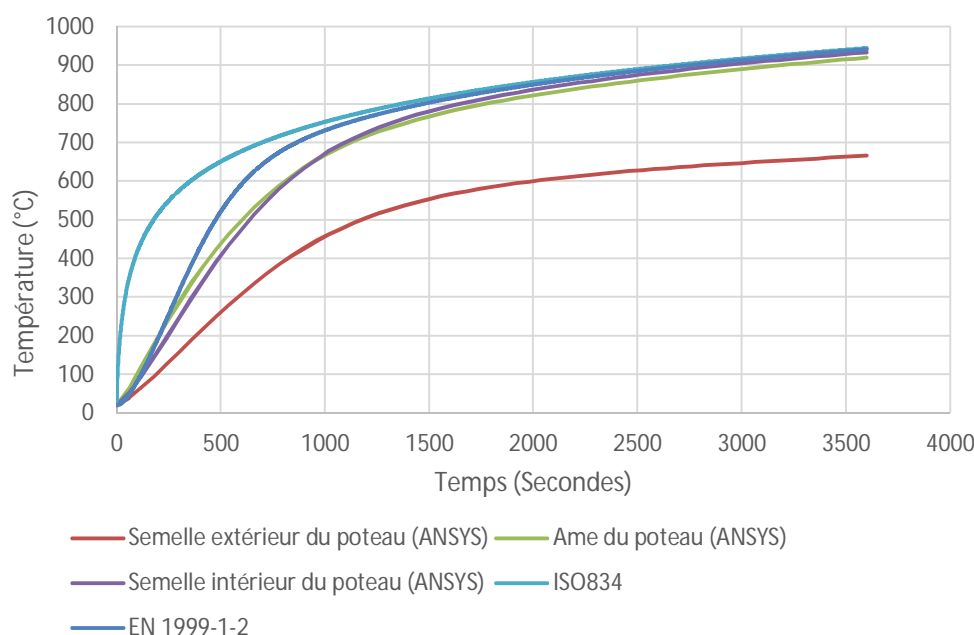


Figure 3-12 : Evolution de la température en fonction du temps dans différents nœuds du poteau sous ISO834

Toutes les courbes montrent une montée rapide de la température au début de l'exposition au feu, suivie d'un ralentissement progressif, conformément au comportement attendu d'un feu ISO 834, avec des températures de 942 °C après une heure (3600 s).

- On observe une augmentation rapide de la température pendant les premières minutes, qui tend vers une stabilisation à partir de 3000 secondes.
- La courbe ISO834 montre une montée en température plus rapide et plus élevée que les autres éléments du poteau analysés.
- La courbe analytique de la norme EN 1999-1-2 indique une température nettement inférieure, notamment par rapport aux zones internes du poteau.

Le feu provoque une élévation rapide de la température jusqu'à 942°C pour la plupart des zones internes.

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

Les différences de température observées entre les différentes zones du poteau révèlent un comportement thermique fortement influencé par la position et le degré d'exposition des éléments au feu. La semelle extérieure, avec une température maximale de 666,30 °C, reste significativement plus froide que les zones internes, ce qui suggère qu'elle bénéficie d'un refroidissement plus efficace grâce aux échanges thermiques avec l'environnement extérieur. Ce phénomène peut s'expliquer par des pertes de chaleur par convection et rayonnement, plus importantes en surface.

En revanche, l'âme du poteau et la semelle intérieure atteignent des températures très élevées (respectivement 931 °C et 934 °C), proches de celles indiquées par la courbe ISO 834. Cela montre que ces zones accumulent plus de chaleur du fait de leur confinement et de la forte conductivité thermique de l'aluminium, qui favorise la transmission rapide de la chaleur vers l'intérieur de la section. Ce niveau de température est critique car il peut entraîner une chute significative de la résistance mécanique du poteau, en particulier au niveau de l'âme, qui joue un rôle central dans le maintien de la charge.

La comparaison avec la norme EN 1999-1-2, qui prévoit des températures plus modérées, souligne l'importance de tenir compte des conditions réelles de propagation thermique dans les calculs de résistance au feu. Cette norme semble mieux représenter le comportement des éléments plus exposés à l'extérieur, mais peut sous-estimer les risques thermiques dans les zones internes si elle est utilisée seule sans simulation numérique.

Interprétation

- Semelle extérieure du poteau : elle chauffe moins rapide et reste significativement plus froide que l'âme et la semelle intérieure, atteignant à 666,30 °C après 3600 secondes. Cela est probablement dû à une meilleure exposition à l'air ou à un refroidissement plus important.
- Ame du poteau et semelle intérieure : présentent des températures plus élevées, ces deux zones ont un comportement thermique similaire, avec des températures qui se rapprochent de la courbe ISO 834, la semelle intérieur atteignant à 934 °C et l'âme atteignant à 931°C, indiquant une importante absorption thermique.
- La courbe ISO834 sert de modèle pour les incendies standards, indiquant l'évolution thermique maximale attendue que devrait suivre une structure exposée au feu.

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

- EN 1999-1-2 : Donne des températures plus modérées, proche de celles observées dans la semelle extérieure.

3.4.2.2. Analyse thermique de la poutre sous le feu ISO 834

Le graphique présenté ci-dessus montre l'évolution de la température en fonction du temps pour la poutre en aluminium soumise à un feu standard ISO 834. On y distingue cinq courbes représentant : les semelles intérieure et extérieur du poteau ,l'âme,ISO834,et la courbe analytique selon EN 1999 1-2.

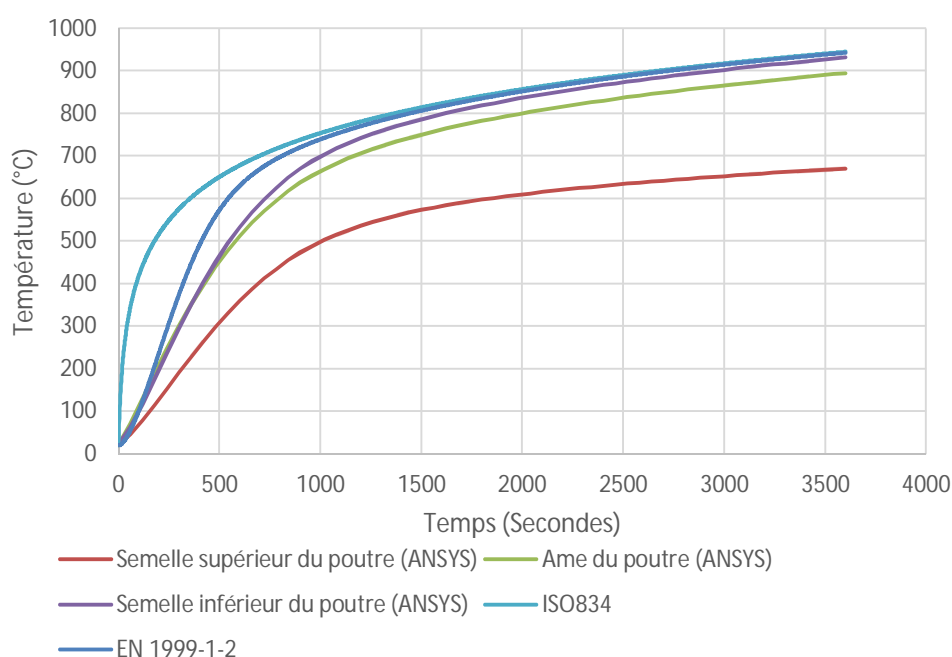


Figure 3-13: Evolution de la température en fonction du temps dans différents nœuds de la poutre sous ISO834

La tendance est très similaire à celle du poteau. La montée en température est très rapide durant les 1000 premières secondes, puis plus lente ensuite.

- Semelle inférieure : zone la plus exposée, proche de la flamme, atteint très rapidement des températures supérieures à 944°C.
- Âme : température intermédiaire 929°C, transmettant l'énergie thermique entre les semelles, Son comportement est influencé par les phénomènes de conduction et de rayonnement.

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

- Semelle supérieure : La zone moins exposée, avec un maximum de 671°C.
- Courbe ISO834 : Elle représente l'évolution de la température dans un incendie standard, fournissant une référence pour comparer la tenue thermique de la poutre.
- La courbe analytique de la norme EN 1999-1-2 indique une température nettement inférieure, notamment par rapport aux zones internes de la poutre.

Les différences de température entre les différentes zones de la poutre mettent en évidence l'influence de l'exposition au feu et de la position des éléments dans la section. La semelle supérieure, qui atteint une température maximale à 671 °C, montre un comportement thermique modéré. Cette température relativement basse s'explique par une exposition réduite aux flammes ou par un meilleur échange thermique avec l'environnement extérieur, limitant ainsi l'accumulation de chaleur.

En revanche, la semelle inférieure et l'âme présentent des températures nettement plus élevées (944°C et 929 °C respectivement), traduisant une absorption thermique importante. Ces zones, plus proches de la source de chaleur ou plus confinées, sont soumises à une montée rapide en température, en raison à la fois de leur position structurelle et de la forte conductivité thermique de l'aluminium, qui facilite la transmission de l'énergie thermique.

La courbe ISO 834, qui atteint 942 °C, fournit un cadre de référence pour évaluer le comportement thermique dans des conditions normalisées d'incendie. Le fait que les températures observées dans les zones internes de la poutre s'en approchent souligne la vulnérabilité thermique de ces éléments et la nécessité de les prendre en compte dans la vérification de la résistance au feu.

Interprétation

- Les modèles ISO 834 atteignent la température la plus élevée dans chaque courbe graphe, avec une montée rapide et sans ralentissement : ils représentent une condition théorique de référence, sans inertie thermique.
- Les zones internes (âme et semelle inférieure/intérieure) sont les plus exposées thermiquement, car elles accumulent la chaleur plus rapidement, tandis que les zones extérieures/supérieures restent plus fraîches, probablement en raison de meilleures conditions de dissipation.

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

- La différence de comportement entre poteau et poutre provient essentiellement de leur orientation (verticale vs horizontale) et du positionnement relatif par rapport à la source de chaleur.
- Les courbes des semelles intérieures et âmes restent proches du modèle analytique, ce qui signifie que ces parties sont critiques du point de vue de la sécurité incendie, car elles sont plus exposées à une dégradation thermique rapide.
- En revanche, les semelles extérieures/supérieures réagissent plus lentement, ce qui peut être exploité pour le renforcement structurel ou la protection.

3.4.3. Analyse thermique du poteau et de la poutre sous le feu paramétrique

3.4.3.1. Analyse thermique du poteau sous le feu Paramétrique

Le graphique présenté ci-dessus montre l'évolution de la température en fonction du temps pour un poteau en aluminium soumis à un feu Paramétrique. On y distingue cinq courbes représentant :

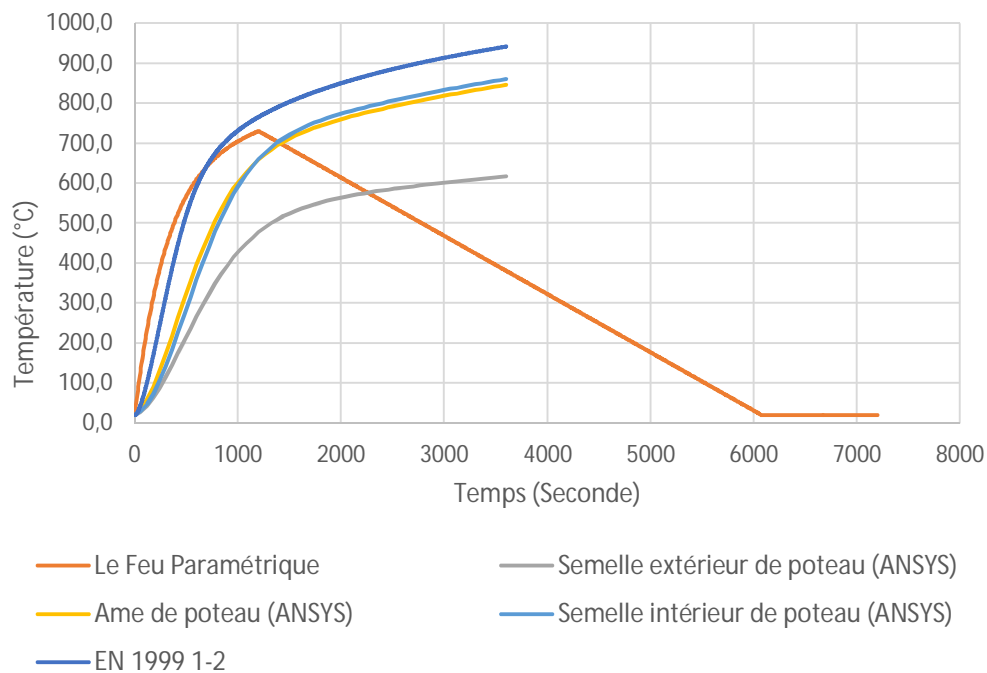


Figure 3-14 : Evolution de la température dans différents nœuds du poteau soumis à un feu paramétrique.

- La courbe du feu paramétrique présente une montée rapide en température jusqu'à 756 °C en 1200 secondes, suivie d'une phase de refroidissement progressif qui débute

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

naturellement après le pic thermique. Cette évolution reflète un scénario d'incendie réaliste, incluant la diminution de la température due à la consommation du combustible et à la ventilation.

- L'âme du poteau montre une évolution thermique relativement proche de celle du feu paramétrique, atteignant un pic de 861 °C. Cette proximité indique une bonne transmission thermique entre les gaz chauds et cette zone centrale du profil.
- La semelle intérieure atteint des températures légèrement supérieures 861 °C, ce qui peut s'expliquer par sa plus grande surface d'exposition aux gaz chauds à l'intérieur du poteau. En revanche, la semelle extérieure subit une élévation de température plus lente et plus limitée, 617 °C, probablement en raison de son exposition réduite ou de la dissipation thermique vers les zones non exposées au feu.
- La courbe EN 1991-1-2 correspond au feu standard ISO 834, utilisé dans les essais normalisés. Contrairement au feu paramétrique, cette courbe ne comporte pas de phase de refroidissement, avec une montée continue dépassant 941 °C. Cela la rend conservatrice, utile pour la vérification normative, mais moins représentative d'un feu réel.
- Le feu paramétrique présente une montée rapide en température jusqu'à 756°C vers 1200 s, suivie d'une phase de refroidissement naturelle jusqu'à atteindre environ 100 °C vers 6000 s.
- Les résultats ANSYS montrent que l'âme du poteau et la semelle intérieure atteignent des températures plus élevées que le pic du feu paramétrique, culminant respectivement de 861 °C, ce qui reflète une inertie thermique et un transfert de chaleur différé.
- La semelle extérieure, quant à elle, présente une température nettement plus basse (617 °C), ce qui témoigne d'un gradient thermique interne important au sein de la section du poteau.
- La courbe EN 1991-1-2 monte continuellement jusqu'à 941 °C sans inclure de phase de refroidissement. Elle représente une approche conservatrice, utilisée dans les normes de dimensionnement au feu pour garantir la sécurité structurelle dans des conditions sévères. En comparaison, les résultats ANSYS montrent des températures globalement inférieures à cette courbe, en particulier dans la semelle extérieure, ce qui montre que la norme surestime potentiellement les températures internes réelles.

Interprétation

• Phase initiale (0 – 1 200 s)

- Montée rapide de la température selon le feu paramétrique.
- Âme du poteau : 861 °C (absorption directe de la chaleur).
- Semelle intérieure : 861 °C (exposition maximale aux gaz chauds).
- Semelle extérieure : 612 °C (position éloignée, sollicitation réduite).

• Phase d'inertie thermique (1 200 – 4 000 s)

- Malgré la décroissance du feu paramétrique, l'âme et la semelle intérieure continuent de chauffer ou de se stabiliser.
- Décalage temporel entre la température ambiante et la température interne dû à la capacité de stockage de l'acier.

• Phase de refroidissement (après 4 000 s)

- Baisse très lente des températures internes.
- Stockage prolongé de la chaleur impactant la résistance résiduelle et la capacité portante.
- Risque accru de flambement thermique et de fragilisation des sections chaudes.

3.4.3.2. Analyse thermique de la poutre sous le feu Paramétrique

Le graphique présenté ci-dessus montre l'évolution de la température en fonction du temps pour un poteau en aluminium soumis à un feu Paramétrique. On y distingue cinq courbes représentant :

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

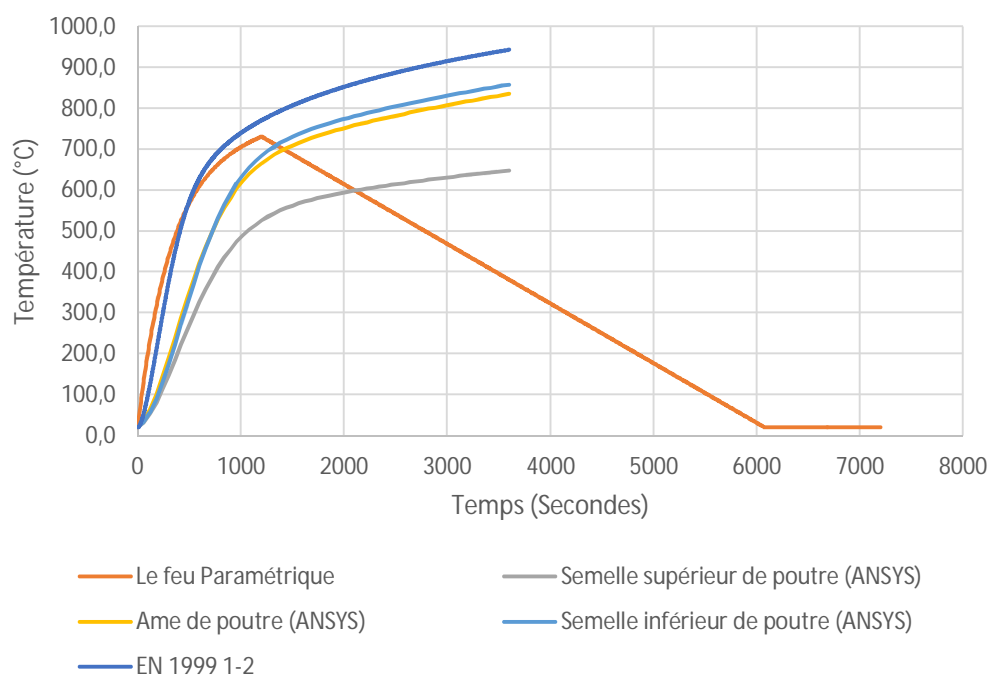


Figure 3-15 : Evolution de la température dans différents nœuds de la poutre soumise à un feu paramétrique.

- La courbe du feu paramétrique montre une montée rapide en température, atteignant un pic de 750 °C à 1200 secondes, suivie d'une phase de décroissance thermique prolongée jusqu'à 6000 secondes, avant stabilisation. Cette courbe est représentative d'un feu naturel, dans lequel la température baisse progressivement après que la charge combustible soit épuisée.
- L'âme de la poutre suit une évolution thermique proche de celle du feu paramétrique, atteignant un maximum d'environ 855 °C. Cette zone centrale, en contact direct avec les gaz chauds, absorbe rapidement la chaleur.
- La semelle inférieure atteint des températures légèrement plus élevées (860 °C), ce qui peut s'expliquer par une exposition directe plus prolongée ou une accumulation thermique due à sa position.
- En revanche, la semelle supérieure montre une élévation plus modérée, plafonnant à 648 °C. Cette différence s'explique par sa protection naturelle contre les gaz chauds (par exemple, recouverte de dalle ou isolée par le plancher supérieur), ce qui limite son échauffement.

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

- La courbe EN 1991-1-2 montre une montée continue de la température jusqu'à plus de 941 °C, sans phase de refroidissement.
- Le feu paramétrique monte jusqu'à 750 °C en 1200 secondes, puis redescend lentement jusqu'à 100 °C à 6000 secondes, avant de se stabiliser.
- Les résultats ANSYS montrent que l'âme et la semelle inférieure atteignent des températures supérieures au pic du feu paramétrique (855–860 °C), et conservent une température élevée même lorsque le feu diminue, en raison de l'inertie thermique du matériau.
- La semelle supérieure, moins exposée au feu, monte plus lentement en température et atteint une température maximale d'environ 648 °C, ce qui confirme un gradient thermique vertical important dans la poutre.
- La courbe EN 1991-1-2 présente une montée continue de température sans refroidissement, atteignant environ 950 °C, Comparativement, toutes les températures issues d'ANSYS restent inférieures à cette courbe, en particulier pour la semelle supérieure, ce qui indique que la courbe standard surestime le niveau thermique réel dans certaines parties de la poutre.

Interprétation

• Phase de montée en température (0 – 1 200 s)

- Le feu paramétrique atteint un pic d'environ 750 °C à 1 200 s.
- La semelle inférieure de la poutre monte rapidement jusqu'à 860 °C, indiquant une forte exposition directe au feu.
- L'âme atteint à 855 °C, traduisant une exposition intermédiaire.
- La semelle supérieure chauffe plus lentement, plafonnant de 648 °C, montrant une exposition réduite.

• Répartition thermique non uniforme

- Forte différence de température entre les zones hautes et basses de la section.
- Cette asymétrie thermique provoque des gradients thermiques verticaux importants, pouvant engendrer des contraintes différentielles.

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

• Phase de stabilité / inertie thermique (1 200 – 4 000 s)

- Alors que la température ambiante du feu diminue, les composants internes (âme, semelle inférieure) restent à température élevée.
- L'inertie thermique du matériau se manifeste clairement : la structure continue à absorber et stocker la chaleur.

• Phase de refroidissement (après 4 000 s)

- Les températures internes diminuent lentement, surtout pour les éléments ayant atteint des pics élevés.
- La semelle supérieure, moins sollicitée thermiquement, refroidit plus rapidement.
- Ce refroidissement différé peut avoir un impact sur la reprise de charge ou les déformations résiduelles.

3.4.4. Comparaison entre les résultats du comportement issus de l'application du Feu ISO 834 et du Feu Paramétrique

Ces résultats de comparaison de comportement thermique sont montrés dans le tableau 3-1 où on observe que le temps atteint pour une température de 500°C est très réduit en appliquant le feu standard ISO834 par rapport au feu paramétrique.

Tableau 3-1 : Comparaison entre les comportements thermiques dus au Feu ISO 834 et au Feu Paramétrique.

Critère	Feu ISO 834	Feu Paramétrique
Temps pour 500 °C (Poteau)	Semelle extérieure : 1200 s Âme : 600s Semelle intérieure : 600 s	2775s
Temps pour 500 °C (Poutre)	Semelle supérieure : 1000 s Âme : 540 s Semelle inférieure : 540 s	2775s

Le feu ISO 834 offre une dégradation plus lente et prévisible, tandis que le feu paramétrique impose une sollicitation thermique aiguë, accélérant la perte de stabilité.

3.5. Analyse thermique du portique à poteaux protégés

L'analyse thermique permet d'étudier comment la température évolue dans une structure lorsqu'elle est exposée au feu. Dans le cas des portiques à poteaux mixtes, le poteau est constitué d'un profilé en aluminium rempli ou entouré de béton. Cette protection en béton joue un rôle important, car elle ralentit la montée en température à l'intérieur du poteau et protège l'aluminium contre les effets néfastes de la chaleur.

Cette partie du travail a pour but de suivre l'évolution de la température au niveau du poteau protégé au cours du temps, afin d'évaluer son efficacité et de comprendre comment elle améliore la résistance de la structure face à un incendie. Un poteau protégé, ou poteau mixte, est composé de plusieurs matériaux qui travaillent ensemble pour améliorer la résistance au feu et la stabilité de la structure. Les principaux éléments utilisés sont :

Le profilé en aluminium constitue l'élément central du poteau mixte et assure la capacité portante principale de la structure. Grâce à sa légèreté, sa résistance à la corrosion, l'aluminium est un matériau intéressant pour les structures soumises à des charges verticales tout en recherchant une réduction du poids global.

Du point de vue thermique, le béton est un mauvais conducteur de chaleur, avec une conductivité thermique moyenne de 1,4 à 2,0 W/m·K, ce qui protège le poteau en aluminium contre l'échauffement rapide. Sa capacité calorifique, estimée à environ 900 J/kg·K, lui permet d'absorber de la chaleur avant de subir des augmentations de température significatives. De plus, son coefficient de dilatation thermique relativement faible (10×10^{-6} /K) limite les déformations dues aux variations thermiques.

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

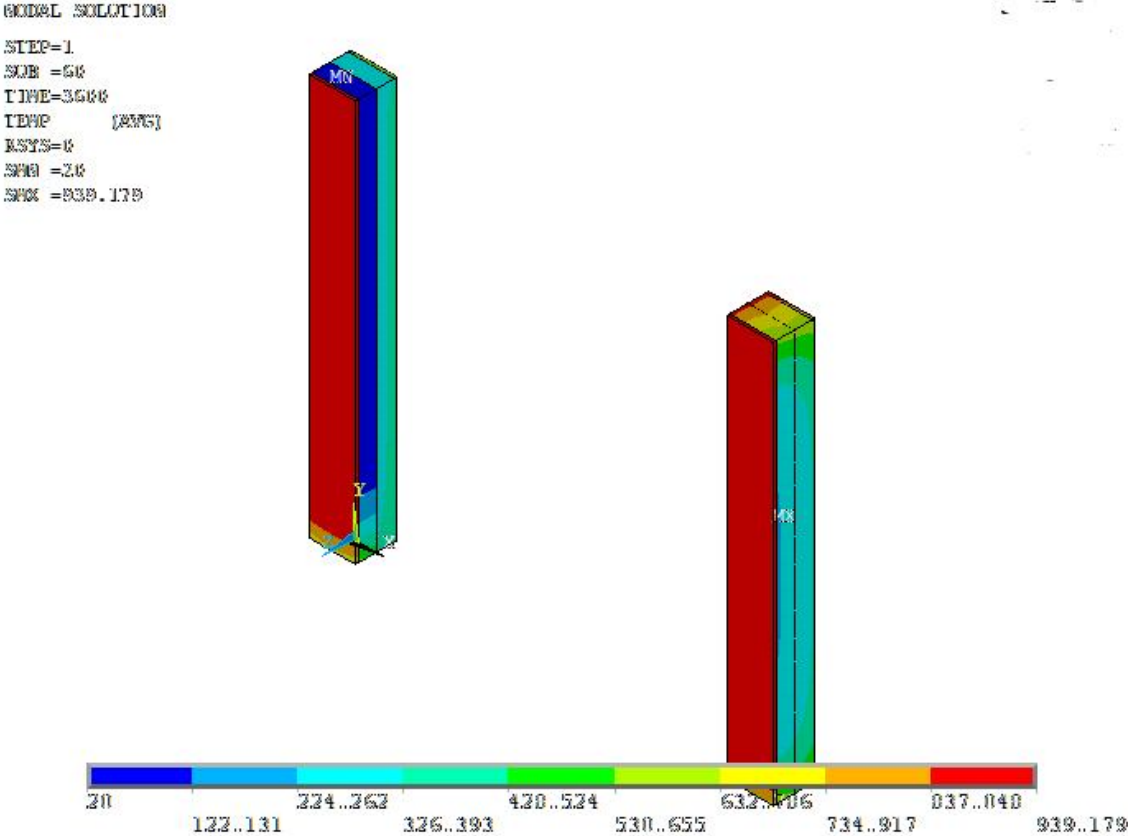


Figure 3-16 : Distribution Thermique des Poteaux Protégés par le Béton à 3600s.

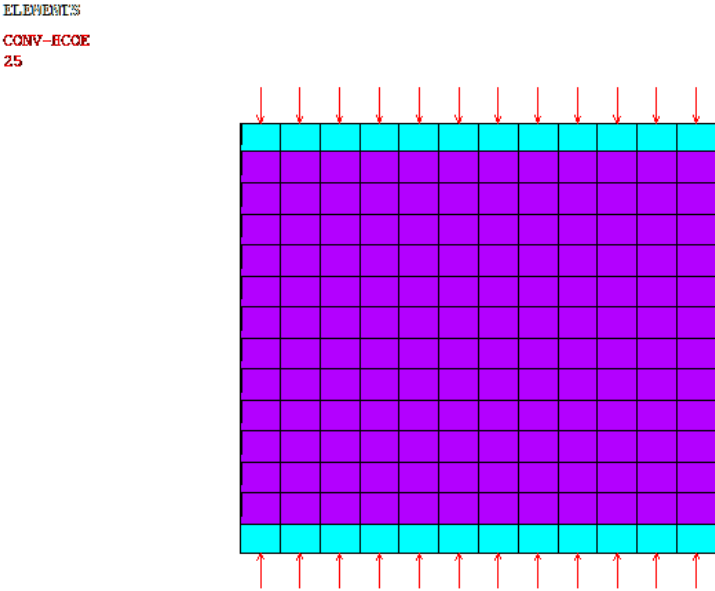


Figure 3-17 : Application de la convection sur les Poteaux mixtes.

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

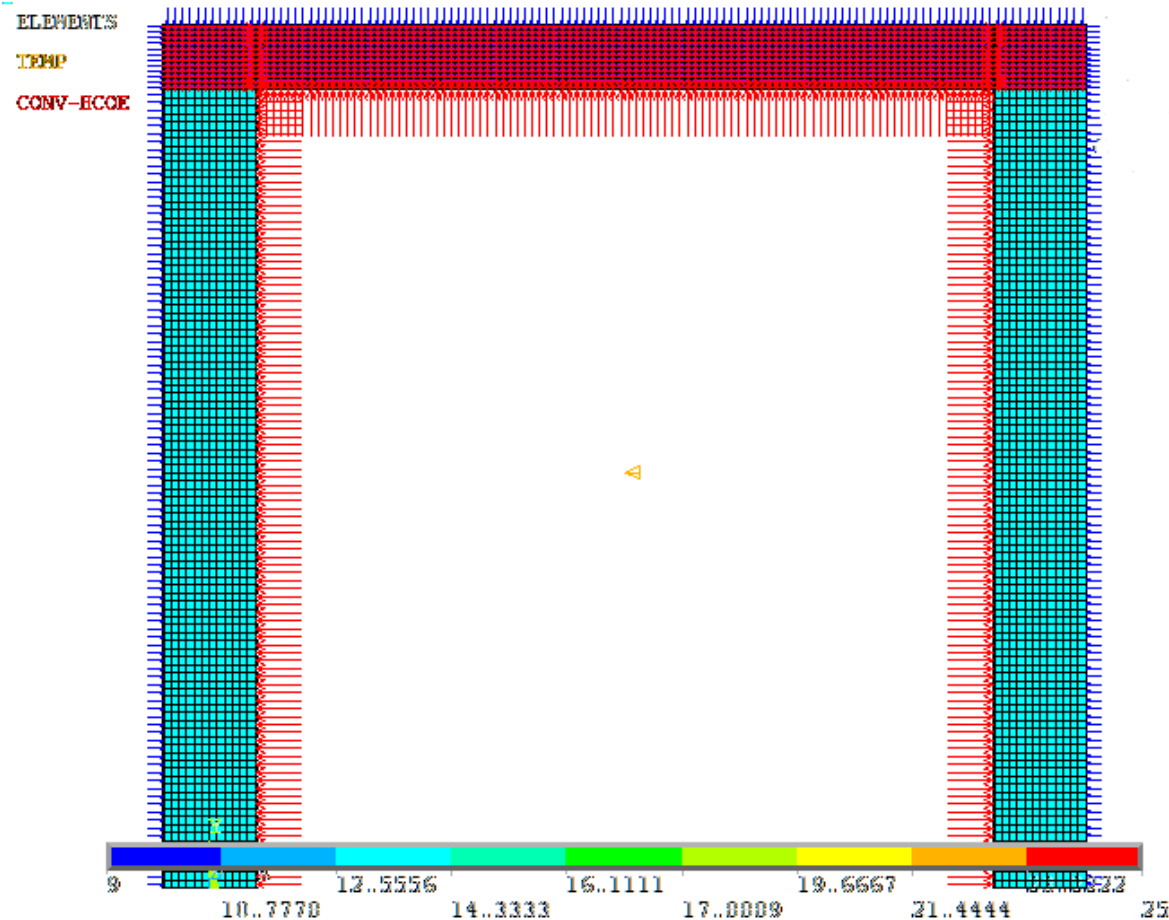


Figure 3-18 : Distribution Thermique et Convection sur un Portique.

ELEMENTS
RDSF-EMIS
1

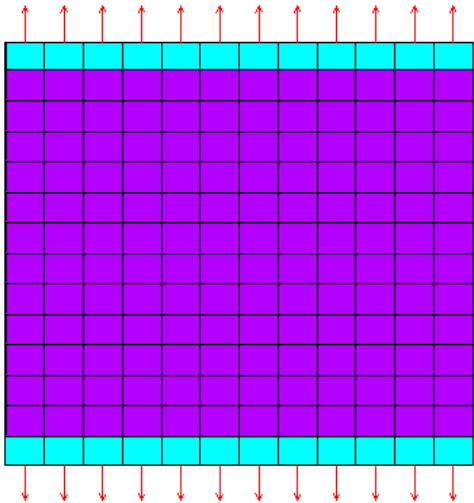


Figure 3-19 : Application de la radiation sur les poteaux mixtes.

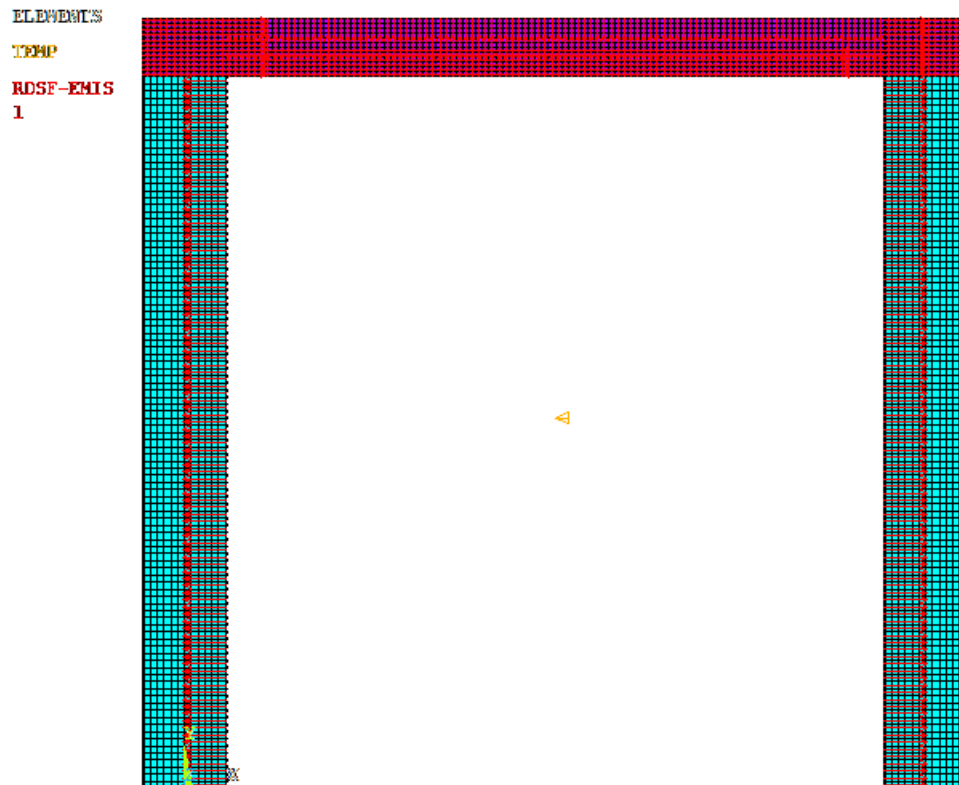


Figure 3-20 : Distribution de la Radiation à l'Intérieur des Poteaux.

3.5.1. Etude numérique

La figure 3-15 représente l'évolution de la température (°C) en fonction du temps (secondes) pour plusieurs parties de la structure avec poteaux protégés par du béton.

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

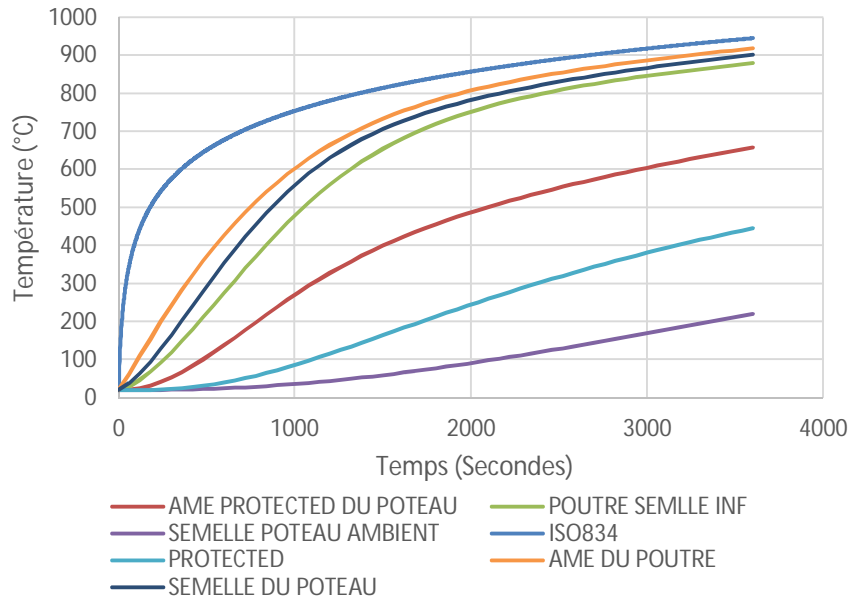


Figure 3-21 : Evolution de la température en fonction du temps pour plusieurs parties de la structure avec poteaux protégés.

La performance de la protection incendie a permis d'avoir les constatations suivantes :

- Les courbes de protection et l'âme protégée de poteau montent beaucoup plus lentement que les autres.
- À 3600 s, la température de l'âme protégée du poteau reste inférieure à 700 °C, contre plus de 900 °C pour la semelle du poteau et la poutre.
- Cela montre que la protection thermique appliquée (béton ou isolant) est efficace pour retarder l'échauffement du cœur du poteau.

Comportement différencié des éléments :

- Les semelles et âmes exposées (comme la semelle du poteau ou l'âme de la poutre) atteignent rapidement des températures critiques (>800 °C), ce qui indique une perte significative de la résistance mécanique de ces zones si non protégées.
- En revanche, les zones protégées assurent une meilleure stabilité thermique, préservant plus longtemps la capacité portante.

Effet de l'inertie thermique du béton :

- Le béton, en tant que matériau de protection ou de remplissage, agit comme barrière thermique en ralentissant la montée de température dans l'âme du poteau.
- Cela est particulièrement visible pour l'âme protégée de poteau : montée lente et température finale bien en dessous de celle imposée par la courbe ISO.

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

Importance de la localisation et de la géométrie :

- Les températures varient fortement en fonction de la position dans la section (âme vs semelle) et de l'exposition directe au feu.

Les éléments non exposés (comme semelle poteau) conservent une température presque constante (<250 °C), ce qui est essentiel pour la stabilité globale du portique.

3.5.2. Etude analytique

L'étude analytique a pour objectif d'évaluer le comportement au feu du portique en aluminium avec poteaux mixtes protégés, en s'appuyant sur les formulations données par l'Eurocode 1 (EN 1991-1-2) et l'Eurocode 9 (EN 1999-1-2).

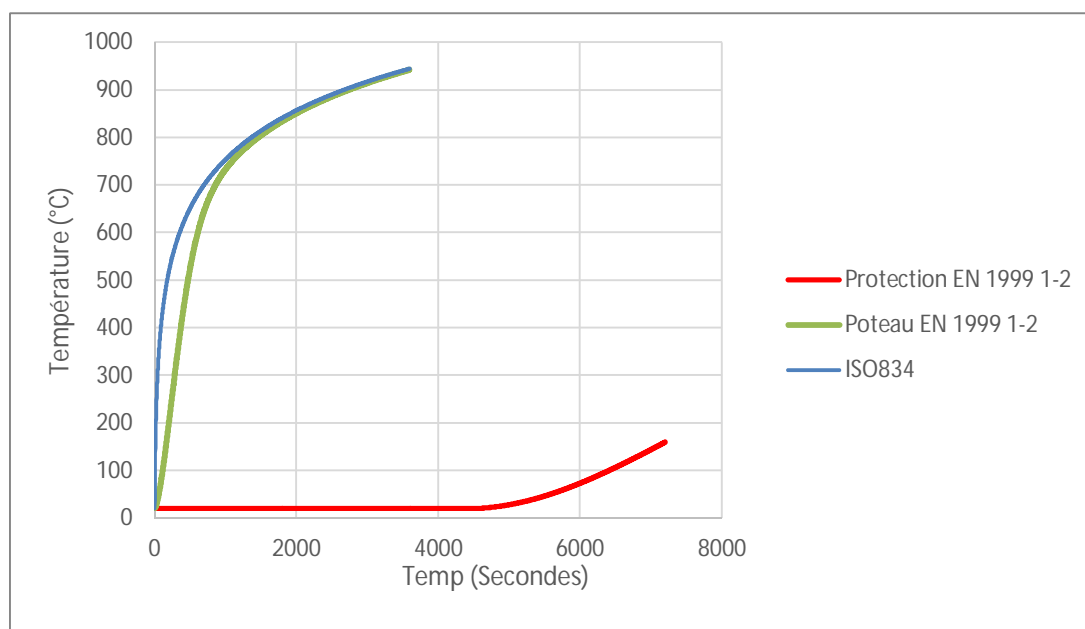


Figure 3-22 : Evolution de la température en fonction du temps selon EN 1999 1-2.

3.5.2.1. Analyse Thermique

Trois courbes sont visibles :

- La courbe (ISO 834) montre une montée rapide et soutenue de la température, atteignant 944 °C à 3800 secondes, représentant le comportement thermique dans un incendie standard sans mesures de protection.
- La courbe de Poteau EN 1999-1-2 suit la tendance de l'ISO 834, indiquant que sans protection spécifique, le poteau absorbe rapidement la chaleur et atteint des températures critiques.

CHAPITRE 3. COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN PORTIQUE A OSSATURE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET D'UN FEU STANDARD ET FEU PARAMETRIQUE

- En revanche, la courbe de Protection EN 1999-1-2 révèle une évolution thermique bien plus lente, plafonnant autour de 200 °C, ce qui témoigne de l'efficacité notable de la protection thermique appliquée au poteau.

3.5.2.2. Interprétation des Résultats

Réduction thermique significative : La protection du poteau conforme à EN 1999-1-2 permet de limiter l'échauffement interne du poteau 700°C par rapport au scénario non protégé.

Comportement différentiel : L'écart important entre les courbes met en lumière la performance de béton, capables de retarder la transmission de la chaleur.

3.6. Conclusion

L'évolution de la température en fonction du temps a montré que la structure en aluminium atteint rapidement le seuil maximum de 500°C relatif à la limite donnée par l'Eurocode 9 partie 1-2 pour les propriétés thermiques. Pour améliorer la sécurité, l'utilisation de poteaux protégés par du béton s'est révélée très efficace. Le béton protège l'aluminium de la chaleur, renforce la structure et retarde l'effondrement. Cette solution améliore à la fois la résistance thermique et mécanique du portique. De plus, la comparaison entre le feu ISO 834 et le feu paramétrique a montré l'importance d'adapter la conception des structures selon le type d'incendie.

**CHAPITRE 4 ANALYSE
THERMOMECHANIQUE DE
PORTIQUE EN ALUMINIUM
SOUS L'EFFET DE HAUTES
TEMPERATURES**

4.1. Introduction

L'analyse thermomécanique d'un portique en aluminium soumis à des températures élevées à l'aide du logiciel ANSYS est une étape essentielle pour évaluer son comportement structurel face aux sollicitations thermiques et mécaniques. La performance sous hautes températures nécessite une étude approfondie pour garantir la sécurité et la stabilité de telles structures.

4.1.1. Contexte et Importance

Les portiques en aluminium, sont couramment utilisés dans le domaine de la construction légère. Leur mise en œuvre repose sur des critères tels que la légèreté, la durabilité et la rapidité d'assemblage. Cependant, leur comportement en situation d'incendie reste un point critique, en raison de la sensibilité thermique de l'aluminium. La conception de ces structures requiert une bonne connaissance des propriétés des matériaux à haute température ainsi qu'une analyse rigoureuse de leur stabilité sous sollicitations combinées. Dans ce contexte, l'utilisation d'un outil de simulation numérique tel qu'ANSYS permet de modéliser avec précision les effets thermomécaniques, d'anticiper les défaillances potentielles et d'optimiser les performances structurelles en conditions extrêmes.

4.1.2. Objectif de l'analyse et propriétés du matériau

L'analyse thermomécanique d'un portique en aluminium à l'aide du logiciel ANSYS vise à évaluer le comportement de la structure soumise à des charges mécaniques et à une élévation de température typique d'un incendie. Les objectifs principaux de cette analyse sont les suivants :

- **Evaluer les déformations** des structures en fonction du temps et déterminer leur charge critique, leur température critique et les déplacements limites.
- **Identifier les zones critiques** où peuvent apparaître des instabilités (flambement, déplacement, déformation) à haute température.
- **Optimiser les paramètres de conception et de protection** pour renforcer la stabilité de la structure face à des conditions extrêmes d'incendie.

Les caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux intégrées dans l'analyse comprennent l'élongation thermique, la densité, la relation contrainte-déformation, le module d'élasticité (module de Young) et le coefficient de Poisson.

4.2. Modélisation et conditions aux limites

4.2.1. Géométrie du portique en aluminium étudié

Le portique étudié dans le cadre de cette analyse thermomécanique est une structure en aluminium à deux appuis (encastrée à la base), représentant une travée typique d'un bâtiment léger. Ce type de configuration est largement utilisé dans les constructions modulaires en raison de la simplicité d'assemblage et de la légèreté des matériaux.

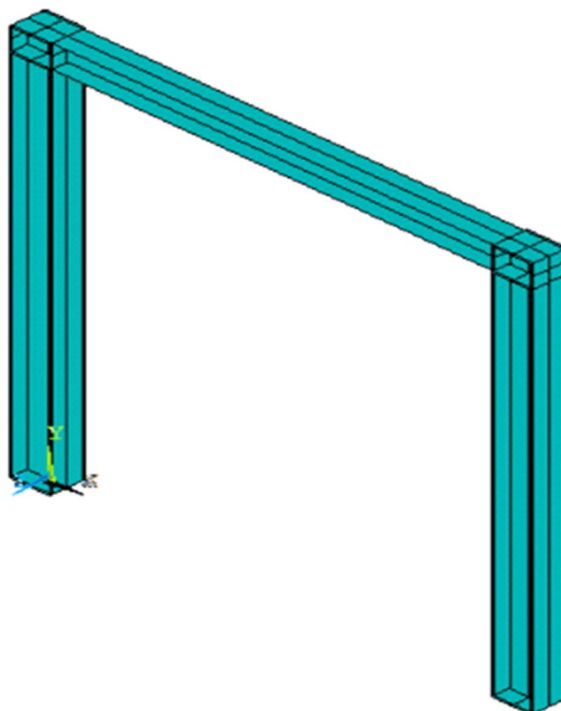


Figure 4-1 : Portique réalisé par ANSYS.

4.2.2. Élément fini pour l'Analyse mécanique

L'élément SHELL181 est adapté à l'analyse de structures de coques minces à moyennement épaisses. Il s'agit d'un élément à quatre nœuds, avec six degrés de liberté par nœud : des translations selon les directions x, y et z, ainsi que des rotations autour des axes x, y et z. (Si l'option membrane est activée, l'élément ne possède que des degrés de liberté

CHAPITRE 4. ANALYSE THERMOMECHANIQUE DE PORTIQUE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET DE HAUTES TEMPERATURES

translationnels). L'option triangulaire dégénérée ne doit être utilisée que comme éléments de remplissage lors du maillage [85].

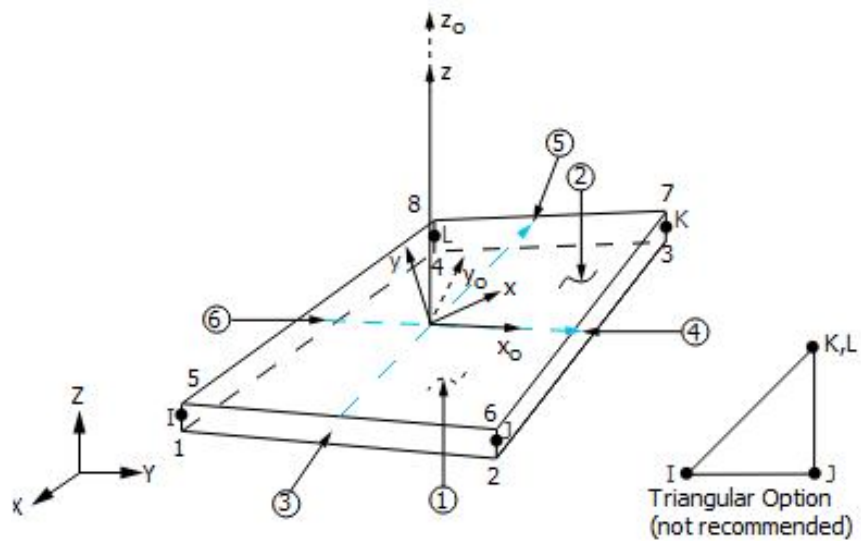


Figure 4-2 : Géométrie de l'élément SHELL181.

4.2.3. Conditions aux limites

Les poteaux sont fixés à leurs extrémités (encastrement), avec des charges verticales F_Y . Les déplacements sont contraints à 0 mm aux supports initiaux, reflétant la rigidité des fondations.

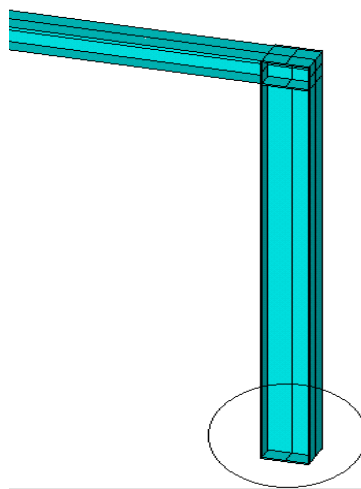


Figure 4-3 : Conditions aux limites du portique.

4.3. Détermination de la charge critique

Dans cette étude, la poutre est soumise à une charge uniformément répartie, appliquée de manière progressive. Cette charge augmente linéairement à partir d'une valeur initiale nulle, jusqu'à atteindre un niveau critique provoquant l'instabilité de la structure. Ce scénario permet de déterminer avec précision la charge critique associée au flambement ou à la ruine de l'élément structural ou de la structure.

4.3.1. Résultat de l'analyse

L'analyse mécanique constitue un domaine fondamental de l'ingénierie, permettant de comprendre et de prédire le comportement des structures soumises à différentes sollicitations. Elle joue un rôle clé dans l'assurance de la sécurité, de la fiabilité et de la performance des ouvrages. L'intégration d'outils numériques performants comme **ANSYS** permet d'obtenir des résultats à la fois précis et détaillés, facilitant ainsi des décisions techniques optimisées durant les phases de conception, de vérification et d'amélioration des structures.

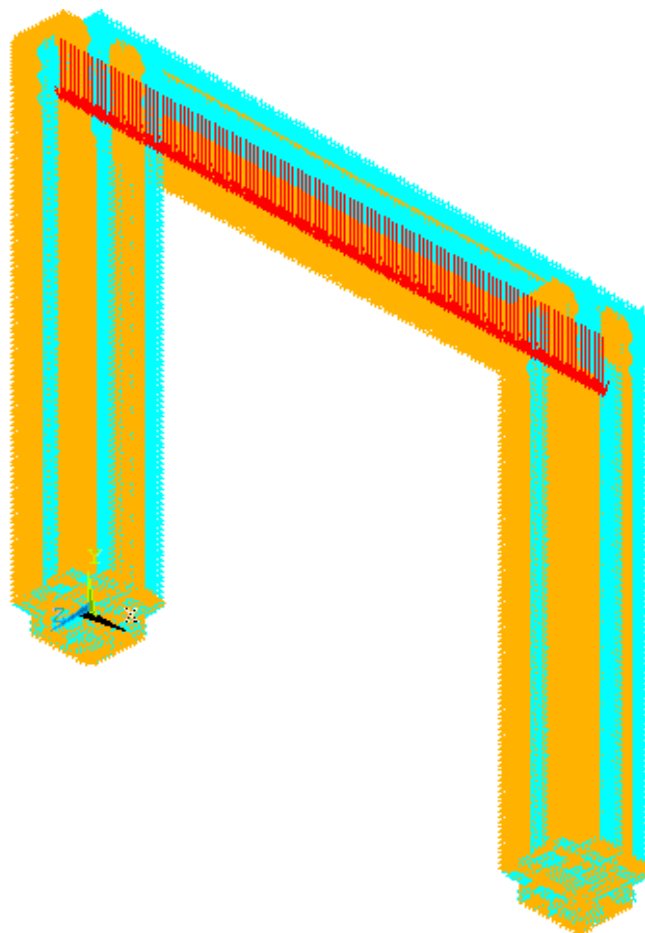


Figure 4-4 : Schéma du portique sous la charge critique.

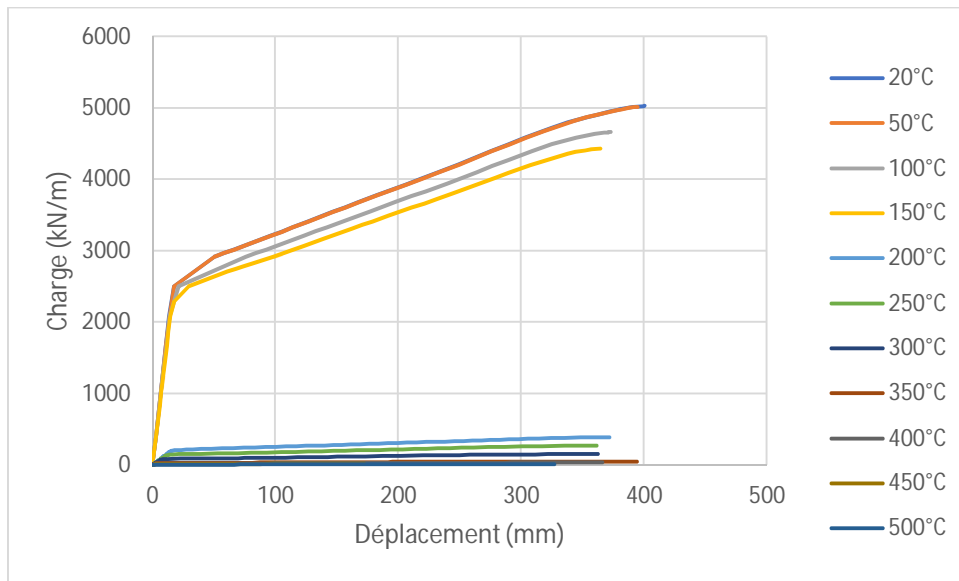


Figure 4-5 : Evolution de la charge en fonction du déplacement à mi- travée de la poutre du portique

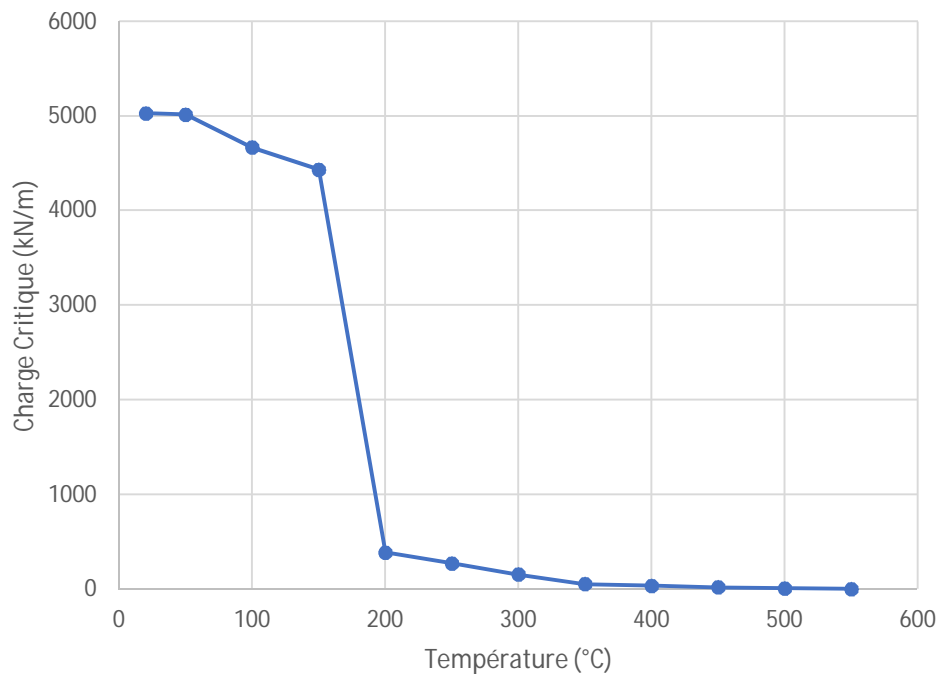


Figure 4-6 : Evolution de la charge critique du portique en aluminium en fonction de la température

4.3.2. Analyse générale et interprétations

Comportement global

De manière générale, à mesure que la température augmente, la pente des courbes diminue.

CHAPITRE 4. ANALYSE THERMOMECHANIQUE DE PORTIQUE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET DE HAUTES TEMPERATURES

Cela signifie que l'aluminium devient moins rigide et donc plus déformable sous charge à haute température.

À basse température, le matériau supporte des charges élevées avec peu de déplacement. Inversement, à haute température, la même charge provoque de plus grandes déformations.

Rigidité

Les courbes à 50 °C, 100 °C et 150 °C montrent une forte pente initiale, indiquant une rigidité élevée.

Entre 200 °C et 300 °C, la rigidité commence à diminuer, mais le comportement reste relativement stable.

À partir de 400 °C jusqu'à 500 °C, la pente devient très faible, montrant une structure très affaiblie mécaniquement.

Capacité portante du matériau

De 50 °C à 150 °C : La capacité de charge est maximale, à 5000 kN/m. L'aluminium conserve ses propriétés mécaniques optimales.

200 °C à 350 °C : L'élément résiste encore correctement, avec une capacité légèrement réduite (4500–4700 kN/m).

400 °C à 500 °C : La capacité tombe à 500–1000 kN/m, signe d'une perte importante de résistance.

À 500 °C, la courbe est très plate, indiquant que l'aluminium n'offre presque plus de résistance à la déformation → effondrement possible sous charge modérée.

Déformation Élastique

La partie linéaire initiale de chaque courbe représente la zone élastique.

Dans cette région, le matériau peut retrouver sa forme initiale une fois la charge supprimée.

Cette zone est nettement visible à basse température (de 50 °C à 300 °C), traduisant une bonne rigidité et une élasticité du matériau.

De 350 °C à 500 °, la zone élastique devient à peine perceptible, ce qui signifie que l'aluminium entre rapidement en phase plastique.

Déformation Plastique

Au-delà de la phase élastique, chaque courbe s'aplatit progressivement, marquant le début de la zone plastique, où la déformation devient permanente.

Plus la température augmente, plus cette zone débute tôt et s'étend en déplacement, mais avec une capacité de charge plus faible.

À 400 °C, 450 °C, cette phase domine largement le comportement mécanique.

À 500 °C, la courbe est quasiment plate dès le début, indiquant que le portique perd tout comportement porteur significatif.

La charge maximale atteinte dans ces cas est nettement inférieure à celle observée à basse température, indiquant que le matériau perd rapidement en résistance sous haute température.

Cela révèle un risque de ruine prématurée dans des conditions d'exposition prolongée au feu.

4.4. Analyse du Comportement Mécanique

4.4.1. Sous le Feu ISO 834

4.4.1.1. Le Déplacement Vertical

Le déplacement vertical désigne la variation de position d'un point d'une structure dans la direction verticale (haut ou bas), sous l'effet d'une charge, d'une contrainte thermique ou d'une combinaison des deux.

Il s'agit d'une réponse structurelle à une sollicitation externe.

Dans le cas d'un portique, c'est généralement la flèche (courbure) due à une charge verticale ou à un affaissement provoqué par le feu ISO 834.

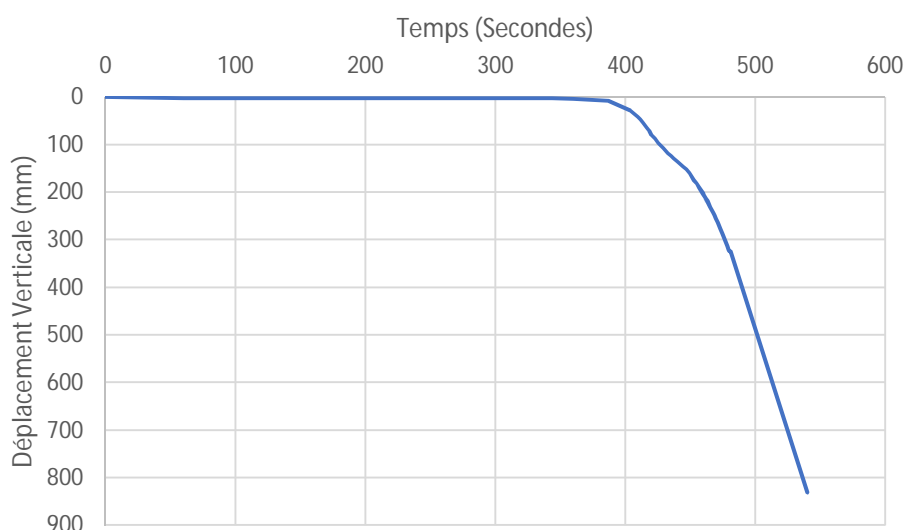


Figure 4-7 : Déplacement Vertical à mi-travée de la poutre en fonction du Temps.

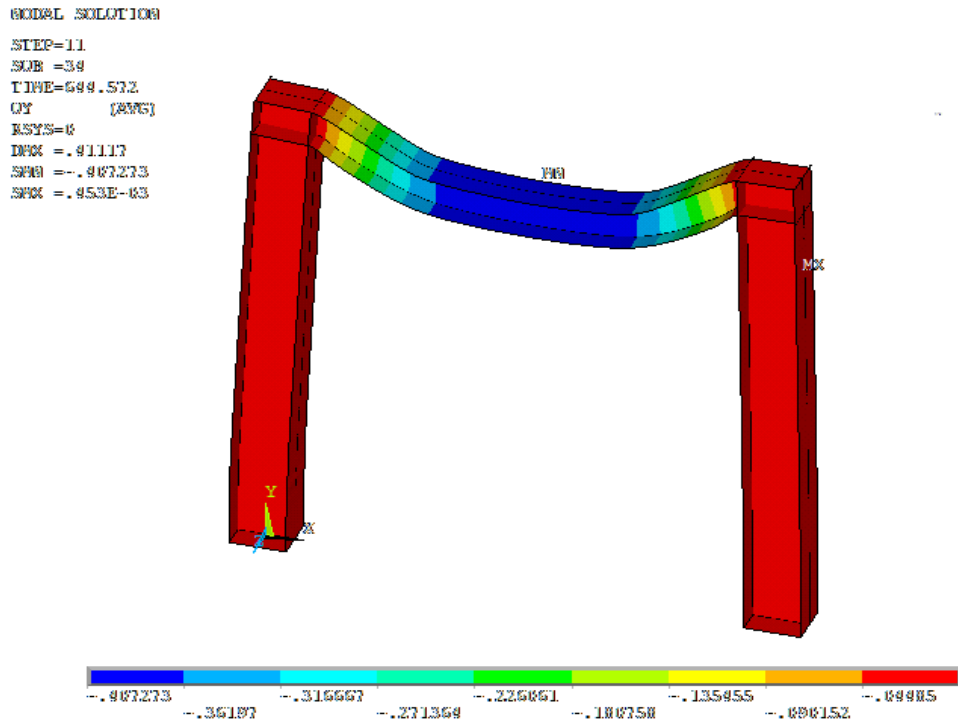


Figure 4-8 : Déplacement vertical du Portique sous l'Effet du Feu ISO 834 – Simulation ANSYS à 544,57 s.

Distribution des déplacements verticaux (UY) montrant un affaissement significatif de la traverse, dû à la perte progressive de rigidité de l'aluminium exposé au feu ISO 834. La figure met en évidence une déformation avancée précédant l'effondrement.

Le matériau se dilate, perd sa rigidité, et s'affaisse progressivement. Le déplacement vertical augmente avec la température jusqu'à une déformation critique, parfois suivie d'un effondrement.

Sur le graphique, on observe les étapes suivantes :

- **Phase de Stabilité (0 – 400s)**

Le déplacement vertical reste très faible et quasi constant. Cela reflète un comportement élastique : le matériau conserve sa forme initiale malgré la montée en température. L'aluminium conserve temporairement leur rigidité

- **Phase de Transition (400– 450 s)**

Le déplacement commence à augmenter de façon perceptible.

Le matériau entre progressivement en phase plastique, perdant sa capacité à résister aux charges verticales

- **Phase de Rupture (>450 s)**

Augmentation brutale du déplacement vertical (jusqu'à 850 mm vers 540 s).

Cela indique une perte complète de portance verticale due à l'affaiblissement thermique.

Effondrement possible ou déformation irréversible majeure.

4.4.1.2. Le Déplacement Horizontal

Le déplacement horizontal est un indicateur crucial de l'instabilité thermique d'un portique soumis à un feu.

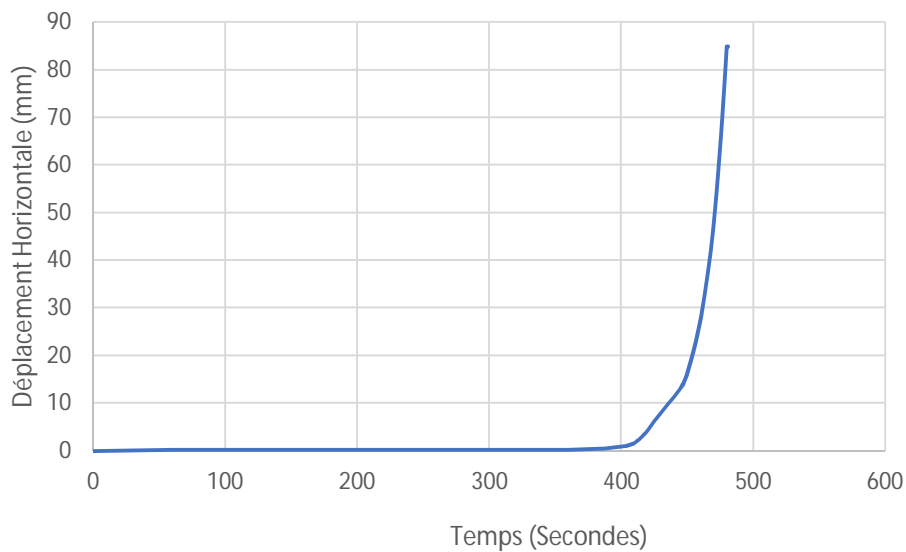


Figure 4-9 : Déplacement Horizontal en fonction du Temps du portique

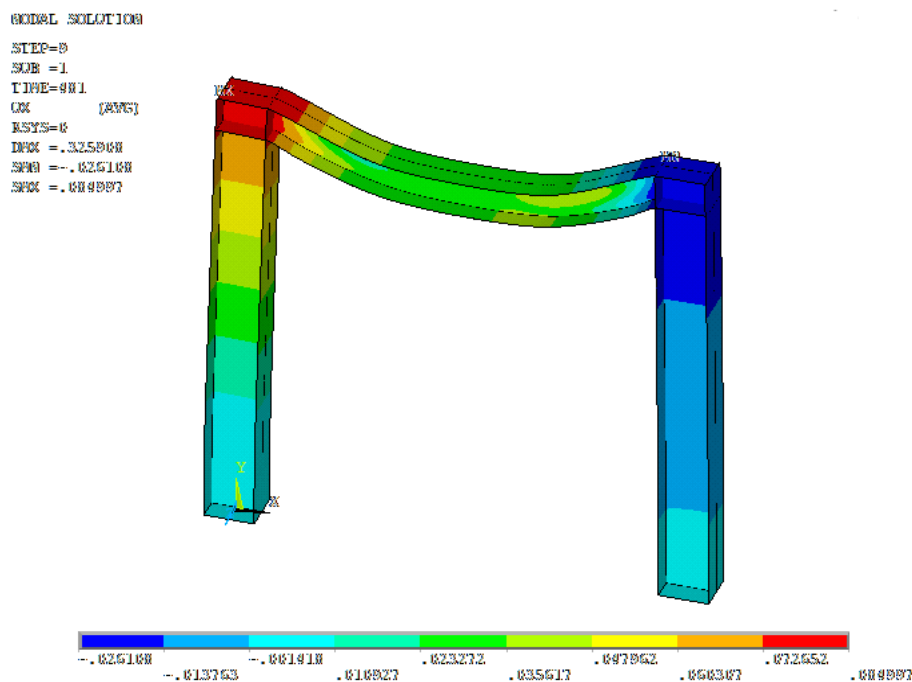


Figure 4-10 : Déplacement Horizontal du Portique sous l'Effet du Feu ISO 834 au temps $t=911$ s.

Distribution des déplacements horizontaux (UX), illustrant la perte de stabilité progressive de portique sous l'effet de la montée en température selon le feu ISO 834.

Sur le graphique de la figure, on observe les étapes suivantes :

- **Phase initiale (0 – 400 s)**

Le déplacement horizontal est nul ou négligeable : la structure est latéralement stable au début de l'exposition thermique.

- **Phase de montée (400 – 450 s)**

Le déplacement augmente rapidement, atteignant à 85 mm, traduisant une perte progressive de rigidité due à la montée en température. Ce phénomène correspond à la dilatation thermique latérale, accompagnée d'un début de flambement.

- **Phase critique (Rupture latérale) (> 480 s)**

Un déplacement qui rapidement atteignant

Cela traduit une instabilité latérale dynamique : flambement thermique, perte de redressement, effondrement rapide par instabilité globale.

4.4.1.3. Interprétation globale du comportement du portique sous feu ISO 834

Quand la structure en aluminium est exposée au feu, elle passe par trois grandes phases :

- **Phase stable (0 – 400 secondes)**

Verticalement : la structure ne bouge presque pas vers le bas.

Horizontalement : il n'y a pas de déplacement sur les côtés.

La structure est encore solide. Elle garde sa forme.

- **Phase de déformation (400 – 480 secondes)**

Verticalement : la poutre commence à s'affaisser un peu.

Horizontalement : la structure commence à se déformer sur le côté.

La chaleur fait perdre de la rigidité à l'aluminium. La structure commence à plier.

- **Phase d'effondrement (après 480 secondes)**

Verticalement : la structure s'enfonce rapidement.

Horizontalement : elle bascule fortement sur le côté.

La structure ne résiste plus. Elle perd toute sa stabilité et s'effondre.

4.4.2. Sous le feu Paramétrique

4.4.2.1. Le Déplacement Vertical

Le déplacement vertical représente le mouvement d'un point d'un élément structural (souvent la flèche d'une poutre ou d'un plancher) dans le sens de la gravité. Sous l'effet d'une charge ou de la température, il traduit l'affaissement progressif de la structure. Un déplacement vertical élevé signale une déformation importante, pouvant indiquer un risque de ruine imminente.

CHAPITRE 4. ANALYSE THERMOMECHANIQUE DE PORTIQUE EN ALUMINIUM SOUS L'EFFET DE HAUTES TEMPERATURES

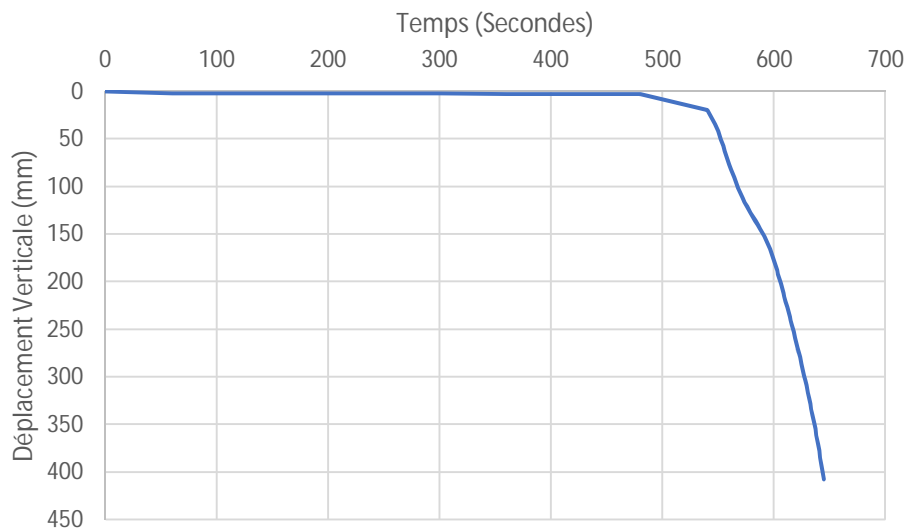


Figure 4-11 : Déplacement Vertical (mm) en fonction du Temps (s).

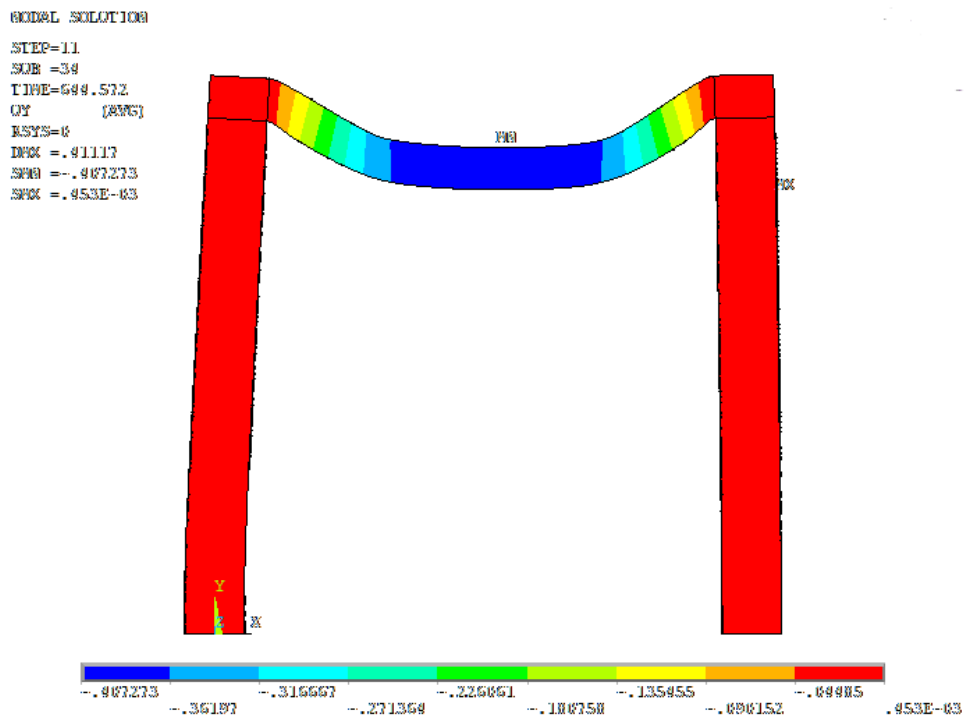


Figure 4-12 : Déplacement Vertical du Portique sous Feu Paramétrique au temps t=699,57 s.

La distribution des déplacements verticaux (UY) au niveau d'un portique exposé à un feu paramétrique. On observe une importante déformation vers le bas de la poutre, indiquant une perte de rigidité de l'aluminium sous température élevée.

- **Phase de Stabilité (0 – 480 s)**

Le déplacement vertical reste très faible et quasi nul pendant cette période.

Cela reflète un comportement élastique : malgré la montée en température, la structure conserve sa forme.

L'aluminium conserve temporairement ses propriétés mécaniques, notamment son module.

Il n'y a pas encore de déformation plastique importante

- **Phase de déformation (480 – 640 s)**

On observe une montée progressive du déplacement.

L'aluminium entre dans une phase plastique : la rigidité diminue, les efforts internes ne sont plus équilibrés, et les flèches augmentent.

- **Phase de Rupture /Effondrement Brutal (>640 s)**

Le déplacement vertical augmente brutalement, Cela indique une perte totale de la stabilité.

La structure subit un effondrement rapide ou une déformation irréversible majeure.

Cette phase correspond à un effondrement global de portique.

La structure ne peut plus résister ni à son propre poids ni à d'éventuelles charges résiduelles.

4.4.2.2. Le Déplacement Horizontal

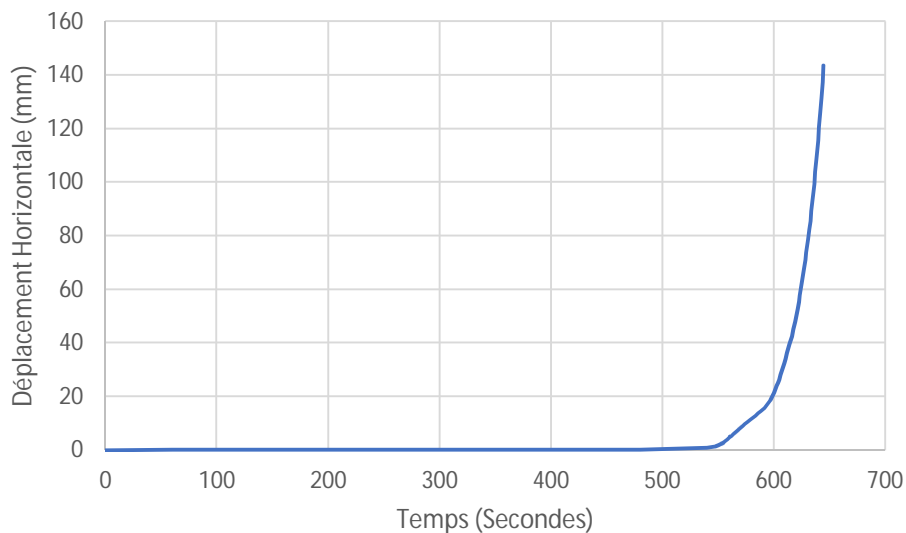


Figure 4-13 : Déplacement Horizontal (mm) en fonction du Temps (s).

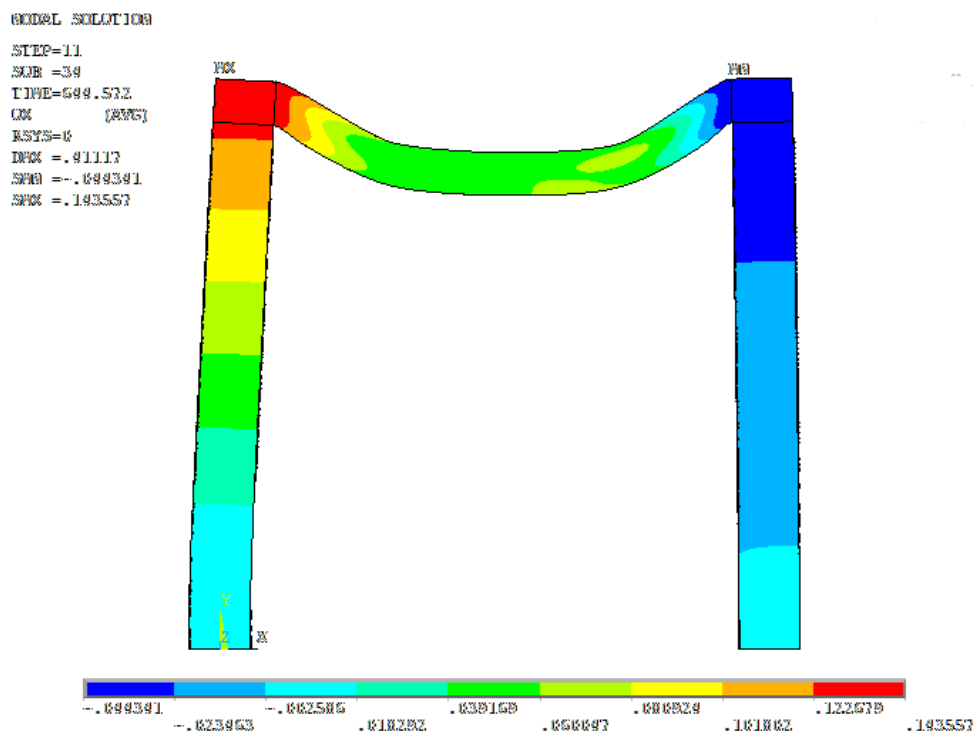


Figure 4-14 : Déplacement horizontal du Portique sous Feu Paramétrique au temps $t=649,57$ s.

Les déplacements horizontaux (UX) du portique en aluminium soumis à une sollicitation thermique simulée selon un feu paramétrique. Une déformation latérale est observée, notamment au niveau de la jonction poutre-poteau gauche. Cela traduit une perte progressive puis totale de la stabilité latérale.

- **phase de Stabilité (0 – 540 s)**

Le déplacement horizontal reste quasi nul, traduisant une stabilité latérale efficace malgré le feu paramétrique.

L'aluminium conserve encore suffisamment de rigidité latérale.

- **Phase de déformation (540 – 600 s)**

Le déplacement horizontal qui augmente progressivement (jusqu'à quelques centaines de mm). On observe une légère augmentation du déplacement.

Ce mouvement indique le début d'un déséquilibre de portique, probablement lié à la dilatation thermique ou au relâchement de contraintes internes.

- **Rupture latérale (>600 s)**

Le déplacement horizontal augmente brutalement, ce qui est caractéristique d'un effondrement ou flambement complet.

Ce phénomène suggère une perte totale de stabilité latérale du nœud analysé (poteau, poutre ou jonction).

La déformation est irréversible et correspond à un mécanisme d'instabilité structurelle globale, souvent amplifié par le feu paramétrique.

4.4.2.3. Interprétation globale du déplacement vertical et du déplacement horizontal

- **Phase de Stabilité Initiale (0 – 540s)**

Déplacement vertical : quasi nul → le portique conserve sa portance verticale.

Déplacement horizontal : également négligeable → stabilité latérale assurée.

Cette phase correspond à un comportement élastique global : l'aluminium conserve encore sa rigidité mécanique et ses propriétés structurelles.

Malgré la montée en température, aucune instabilité n'est observée.

La structure joue pleinement son rôle porteur, sans signes de faiblesse apparente.

- **Phase de déformation Critique (480 – 640 s)**

Verticalement : montée progressive du déplacement → amorce de déformation plastique.

Horizontalement : augmentation latérale modérée → signe d'un déséquilibre progressif.

Cette période est critique : L'aluminium entre dans une zone de perte de rigidité, où les déformations deviennent irréversibles.

La structure subit une redistribution interne des contraintes, probablement due à la dilatation thermique et au relâchement des appuis.

C'est à ce moment que les premiers mécanismes d'instabilité (type flambement) apparaissent.

- **Phase de Rupture Totale (>640 s)**

Déplacement vertical : effondrement ou déformation.

Déplacement horizontal : perte complète de stabilité.

La structure subit une rupture simultanée dans les deux directions, signe d'un effondrement global du portique.

Le flambement, amplifié par la montée rapide de température, entraîne une instabilité générale et irréversible.

4.5. Comparaison entre le comportement à feu ISO 834 et celui à feu paramétrique

Le tableau 4-1 montre une comparaison entre les résultats issus des deux feux ISO834 et Paramétrique en termes de temps limite et de comportement.

Tableau 4-1 : Comparaison entre les résultats issus du feu ISO 834 et du feu paramétrique.

Phase	Feu ISO 834 (Déplacement vertical)	Feu ISO 834 (Déplacement horizontal)	Feu Paramétrique (Déplacement vertical)	Feu Paramétrique (Déplacement horizontal)
Stabilité	0-400s, faible(0) élastique	0-400s, nul, stable	0-480s, quasi nul, élastique	0-540s, quasi nul, stable
Déformation	400-450s, augmente, plastique	400-450s, dilatation/flambement.	480-640s, monte progressivement plastique.	540-600s, augmente largement déséquilibre
Rupture	>450s, brutal, perte totale	>480s, instabilité, effondrement	>640 effondrement brutal, perte totale	>600s, brutal, instabilité globale

4.6. Conclusion

L'analyse du comportement mécanique d'un portique en aluminium exposé aux feux ISO 834 et paramétrique met en évidence une réponse structurée en trois phases : stabilité initiale, déformation plastique et effondrement. Dans les deux cas, la structure reste stable durant les premières minutes, traduisant une conservation temporaire des propriétés mécaniques de l'aluminium. Cependant, à mesure que la température augmente, une perte progressive de rigidité apparaît, marquée par une augmentation modérée des déplacements verticaux et horizontaux. Passé un seuil critique (environ 640 secondes), la structure subit une rupture brutale : les déplacements atteignent des valeurs extrêmes, témoignant d'un flambement et d'un affaissement vertical irréversible. Cette rupture simultanée indique une perte totale de stabilité et met en évidence la sensibilité de l'aluminium aux contraintes thermiques. L'évolution de la charge critique du portique en aluminium en fonction de la température met en relief ces indications. L'étude souligne ainsi l'importance d'anticiper les effets du feu dans la conception des structures, notamment en intégrant des mesures de protection et une évaluation rigoureuse de la charge critique.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif principal de ce mémoire était d'analyser le comportement au feu d'une structure en aluminium avec poteaux protégés ou non, en mettant en lumière les effets thermiques et mécaniques induits par une exposition à un feu normalisé ISO 834 et un feu paramétrique. Cette étude s'inscrit dans un contexte où la légèreté, la durabilité et la rapidité de mise en œuvre des structures en aluminium suscitent un intérêt croissant, notamment dans les bâtiments modernes et les ouvrages à architecture innovante. Cependant, la faible résistance de l'aluminium à haute température reste un obstacle majeur à son utilisation en zones exposées au risque incendie.

Les investigations menées dans ce travail, reposent sur l'analyse des réponses thermique et structurale d'un portique en aluminium via une modélisation numérique par éléments finis en utilisant le logiciel ANSYS, et ont permis de tirer plusieurs enseignements essentiels. Le matériau aluminium commence à perdre de sa résistance mécanique dès que la température dépasse 200 °C, avec une réduction significative de sa rigidité, de sa limite élastique et de sa résistance ultime. Cette fragilité thermique expose la structure à un risque élevé de déformation, voire d'effondrement, en cas d'incendie non maîtrisé. L'analyse des résultats thermiques et mécaniques a montré que, durant les premières minutes d'exposition, la structure reste globalement stable. Toutefois, à mesure que la température augmente, des déformations apparaissent, traduisant une perte progressive de rigidité, surtout au niveau des zones les plus sollicitées. Le comportement thermique par la méthode analytique, par le biais de l'Eurocode, ou numérique de la structure en aluminium a mis en évidence l'évolution rapide de la température en fonction du temps en appliquant le feu ISO834 par rapport au feu paramétrique pour atteindre une température critique de 500°C.

L'analyse des charges critiques a montré une baisse rapide de la résistance de la structure en fonction de l'augmentation de la température. L'intégration d'une protection aux poteaux en aluminium a marqué un apport d'une amélioration notable du comportement au feu. Le béton agit comme une masse thermique protectrice qui ralentit la propagation de la chaleur vers le cœur du poteau, tout en participant à la portance globale de l'élément. Cela se traduit par un maintien plus long de la stabilité structurelle, une limitation des déplacements horizontaux, et une meilleure capacité de résistance pendant les phases critiques de l'incendie.

En perspective, plusieurs pistes de recherche peuvent être envisagées : l'optimisation des configurations géométriques des protections des éléments structuraux pour surmonter les limites thermiques de l'aluminium et développer des structures légères, résistantes et plus sûres face au feu, l'analyse de l'effet des protections passives ou actives, ainsi que la validation expérimentale des modèles numériques développés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Andersson, B., F. Markert, and G. Holmstedt, *Combustion products generated by hetero-organic fuels on four different fire test scales*. Fire Safety Journal, 2005. **40**(5): p. 439-465.
2. Nguyen, A.-V., et al., *Structural behaviour and design of roll-formed Aluminium Lipped Channel beams subjected to combined bending and shear*. Thin-Walled Structures, 2022. **174**: p. 109015.
3. Berthomier Michel, P.A., *Sécurité incendie*, 2012. p. 30.
4. INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) (*Le Risque Incendie – Module de Formation Sécurité* 2019, France.
5. Wikipédia. *Triangle du feu*. 2025.
6. Karlsson, B., & Quintiere, J. G., *Enclosure fire dynamics*. 2000.
7. Meftah, A., *Module de sécurité 02 – Chapitre 4 : Incendies*, 2020, Institut Supérieur des Études Technologiques de Jendouba (ISET Jendouba): Jendouba, Tunisie. p. 8.
8. Boursas, F., *Analyse du comportement des structures sous influence du feu*, 2010, Université Mentouri Constantine: Constantine, Algérie.
9. Hassoune, M., *Étude du comportement de panneaux de profilés laminés a froid sous l'effet d'incendie* 2024: Blida.
10. Slamani, O., Chougrani, Mohamed, *Effet des matériaux ignifuges sur la protection contre l'incendie*, 2023, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed.
11. Standardization, I.O.f., *ISO 834-1: Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements*, 1999, ISO: Geneva, Switzerland.
12. Normalisation, C.E.d., *EN 1999-1-1 Eurocode 9 – Calcul des structures en aluminium – Partie 1-1 : Règles générale* 2007.
13. Sekkiou , S., *Etude du comportement des poteaux mixtes (acier-beton) compte tenu d'une exigence au feu*, 2008, Mentouri Constantine.
14. Standardization, E.C.f., *EN 1991-1-2: Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire*, 2002, CEN: Brussels, Belgium.
15. Normalisation), C.C.E.d., *Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-2 : Actions générales – Actions sur les structures exposées au feu* 2002.
16. Skejic, D., I. Curkovic, and M. Rukavina, *Behaviour of aluminium structures in fire - A review* 2015.
17. Polmear, I.J., *Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals* 2006: Butterworth-Heinemann.
18. Grandin, G., *L'aluminium : Histoire, production, transformation*. . Techniques de l'Ingénieur, *Traité matériaux métalliques*, 2011.
19. *Anodisation de l'alliage d'aluminium*, 2020, SAAD DAHLAB. p. 46.
20. Habashi, F., *A History of Metallurgy*, ed. L.U. Press 1997.
21. Institute, I.A., *Aluminium for Future Generations: The Global Aluminium Industry Sustainability Performance* 2013, London: International Aluminium Institute.
22. Sun, Y., *The use of aluminum alloys in structures: Review and outlook*. Structures, 2023. **57**: p. 105290.
23. You, X., et al., *A review of research on aluminum alloy materials in structural engineering*. Developments in the Built Environment, 2024. **17**: p. 100319.
24. Georgantzia, E., M. Gkantou, and G.S. Kamaris, *Aluminium alloys as structural material: A review of research*. Engineering Structures, 2021. **227**: p. 111372.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

25. Liu H, C.Z., Han Q, Chen B et Bu Y, *Study on the thermal behavior of aluminum reticulated shell structures considering solar radiation*. Thin-Walled Structures, vol. 85, pp. 15–24, 2014.
26. Spyrakos, C. and J. Ermopoulos. *Structural performance of aluminium-steel hybrid buildings*. in *7th International Symposium on Structural Engineering*. 2005. Thessalonique, Grèce.
27. Nikolaou, K.D., Skordeli, M. A. A., et Bisbos, C. D., *Limit analysis of aluminium frames via approximate ellipsoidal yield surfaces*. 2013.
28. Xiong Z, G.X., Luo Y, Zhu S et Liu Y, *Experimental and numerical studies on single-layer reticulated shells with aluminium alloy gusset joints*. Thin-Walled Structures, vol. 118, pp. 124–136, 2017.
29. Liu H, D.Y.e.C.Z., *Static stability behavior of aluminum alloy single-layer spherical latticed shell structure with Temcor joints*. Thin-Walled Structures, vol. 120, pp. 355–365, 2017.
30. Wang H, L.P.e.W.J., *Shape optimization and buckling analysis of novel two-way aluminum alloy latticed shells*. Journal of Building Engineering, vol. 36, article 102100, 2021.
31. Dhima.D, *Calcul simplifié de la température critique selon la norme XP ENV 1993-1-2*. Revue de Construction Métallique.
32. Joyeux, D., *Détermination de la température des structures métalliques en situation d'incendie selon l'EUROCODE 3*. Revue de Construction Métallique.
33. Aribert, J.M., *Alternative françaises à l'EUROCODE pour un calcul simplifié à l'incendie des poteaux mixtes à profils creux remplis de béton*. Colloque international de Timisoara, "L'acier dans les constructions modernes, du 13 au 15 octobre 2005.
34. J. Kruppa, L.T.e.J.B.S., *Vers une conception des ouvrages par l'ingénierie incendie*. Revue de Construction Métallique.
35. Joyeux, C.R.e.D., *Stabilité au feu d'éléments de structure métallique tendus ou en flexion simple sans protection*. Revue de Construction Métallique, 2002.
36. Nechnech, W., *Contribution à l'étude numérique du comportement du béton et des structures en béton armé soumises à des sollicitations thermiques et mécaniques couplées : une approche thermo-élasto-plastique endommageable*, 2000.
37. Xu, B.W.e.Y.-y., *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.
38. Wu, B. and Z. J., A, *A numerical study of the behaviour of restrained RC beams at elevated temperatures*. Fire Safety Journal, 2009.
39. Dotreppe, J.M.F.e.J.C., *Fire test and calculation method for circular concrete method*. Fire Technology, vol. 39, pp. 89-97, 2003.
40. Haouach, I., et al., *Fire after earthquake assessment of 3D reinforced concrete structures*. Engineering Structures, 2024. **319**: p. 118889.
41. Hassoune, M., et al., *Performance of single and built-up I-shaped cold formed steel stud under double sided walls fire exposure*. Engineering Structures, 2025. **335**: p. 120392.
42. Oribi, S.B., et al., *Behaviour of cellular steel beams at ambient and high-temperature conditions*. Journal of Constructional Steel Research, 2023. **207**: p. 107969.
43. Piloto, M.R.M.a.B.L.a.A.K.a.P.A.G., *Mechanical analysis of a portal steel frame when subjected to a post-earthquake fire*. Structures, 2023.
44. Abdelhak Kada, Belkacem Lamri, *Numerical analysis of non-restrained long-span steel beams at high temperatures due to fire*. Asian Journal of Civil Engineering, 2018.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

45. Bouchair, A.K.a.B.L.a.L.M.R.M.a.A., *Finite Element Analysis of Steel Beams with Web Apertures under Fire Condition*. Fire Safety Journal, 2021.
46. Chen, L. and M. Liu, *Thermal degradation of aluminum alloys under ISO 834 fire curve*. Fire Safety Journal, 2019. **104**: p. 22–30.
47. Gao, Y. and T. Zhang, *Effectiveness of intumescent coatings on aluminum structures under fire*. Construction and Building Materials, 2021. **281**: p. 122567.
48. Kodur, V.K.R., & Dwaikat, M, *Performance-based fire safety design of structural systems*. Journal of Structural Fire Engineering, 2008.
49. Portnov, G. and A. Korolchenko, *Fire resistance of aluminum structures and methods to enhance their performance*. Buildings, 2023. **13**(7): p. 1669.
50. Zhu, Z. and W. Liu, *Numerical analysis of aluminum alloy reticulated shells with gusset joints under fire*. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2023. **17**(1): p. 113-128.
51. Maljaars, J. and S. F., *Experimental and numerical analyses of aluminium frames exposed to fire conditions*. Heron, vol. 55, pp. 303–318, 2010.
52. Huang, Z. and B. Young, *Local buckling behavior of aluminum columns at elevated temperatures*. Thin-Walled Structures, 2016. **104**: p. 205–215.
53. Razaqpur, A.G. and X. Zha, *Numerical fire analysis of multistory aluminum buildings*. Fire Safety Journal, 2020. **113**: p. 102976.
54. Buchanan, A. and A.K. Abu, *Bolted connections in aluminum structures exposed to fire*. Journal of Fire Protection Engineering, 2017. **27**(4): p. 295–309.
55. Dhima, D., *Méthode simplifiée de vérification de la résistance au feu des éléments en aluminium*, 2018, Université de Liège.
56. Tessier, L. and M. Lefrançois, *Comparative fire behavior of 6000 and 7000 series aluminum alloys*. Materials and Design, 2021. **210**: p. 110069.
57. Zhou, X. and H. Zhang, *Research progress on the fire behaviour of aluminium alloy structures: A review*. Engineering Structures, 2022. **264**: p. 114402.
58. Li, B. and Y. Zhang, *Mechanical properties of aluminium alloy 6013-T6 under elevated temperatures and post-fire conditions*. Construction and Building Materials, 2024. **422**: p. 139862.
59. Cheng, L. and H. Huang, *In-fire material properties of high-strength aluminium alloys*. Fire Safety Journal, 2024. **141**: p. 103743.
60. Sun, Y. and T. Zhang, *Post-fire residual capacities of unequal angle aluminum alloy sections*. Journal of Structural Engineering, 2025. **151**(3): p. 04024038.
61. Chen, J. and M. Wang, *Flexural behavior of aluminum gusset joints after fire exposure*. Advances in Structural Engineering, 2024. **27**(5): p. 1047-1059.
62. Nazrun, A.S. and M.M. Noor, *Comparative study on fire behaviour of solid aluminium sheets coated with intumescent materials*. Fire and Materials, 2024. **48**(2): p. 150-162.
63. Goreta, R. and S. Švaić, *Behaviour of EN AW 6082 T6 aluminum columns exposed to transient heating*. Metals, 2022. **12**(8): p. 1326.
64. Association, E.A., *Aluminium: The Sustainable Metal – Properties and Applications*, 2006, European Aluminium Association.
65. VARGEL, C., *Propriétés générales de l'aluminium et de ses alliages*. 2005.
66. Franssen, J.-M., Vila Real, P., *Fire Design of Steel Structures*, in *Designers' Guide to Eurocode 1 and Eurocode 3*, J.M.V.R. Franssen, P., Editor 2016, ECCS – European Convention for Constructional Steelwork. p. 25–70.
67. ISO, *ISO 834-1: Fire-resistance tests -- Elements of building construction -- Part 1: General requirements*, 1999, International Organization for Standardization.
68. Frangi, A. and M. Fontana, *Fire performance of aluminium structures*. Fire Safety Journal, 2005. **40**(8): p. 668–689.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

69. Soumaya, S., *Etude du comportement des poteaux mixtes (Acier-Béton) compte tenu d'une exigence au feu*, 2008.
70. Gernay, T., Franssen, Jean-Marc, *Design of aluminum alloy structures at elevated temperature*. Fire Safety Journal, 2015: p. 1-12.
71. Frangi, A. and M. Fontana. *Composite columns made of high-strength concrete and aluminium alloy under fire*. in *Proceedings of the 3rd International Workshop on Structures in Fire*. 2003. Ottawa, Canada.
72. Davaine, L. and L.G. Cajot, *Fire design of composite columns made of aluminium and concrete*. Proceedings of the International Conference on Aluminium Structures (INALCO), 2007: p. 315–322.
73. Chen, J., Young, Ben, *Behaviour of concrete-filled aluminium stub columns*. Journal of Constructional Steel Research.
74. Kodur, V., *Properties of Concrete at Elevated Temperatures*. International Scholarly Research Notices, 2014.
75. Davis, J.R., *Aluminum and Aluminum Alloys*. 2001: p. p351-416.
76. Kaufman, J.G., *Properties and Characteristics of Aluminum and Aluminum Alloys*. 2016: p. 9.
77. Li, A.Z.a.Y., *Specific heat capacity of aluminium and aluminium alloys*. 2023: p. 21.
78. Regulation, T.E.U.P., *Design of aluminium structures - Part 1-2: Structural fire design*1999.
79. Feng, M.a.W., Y. C., *An analysis of the thermal performance of aluminium alloy structural members in fire*. Fire Safety Journal, 2005.
80. Li, A.Z.a.Y., *Thermal Conductivity of Aluminum Alloys—A Review*. 2023: pp. 21.
81. Siroux, M., *éveloppement de techniques de mesure de l'émissivité de matériaux opaques à température ambiante : Approches radiométrique et calorimétrique en régime périodique*, 1996, Université Paris 12.
82. Faggiano, B., *Behaviour of aluminium alloy structures under fire*.
83. *EN 1999-1-2: Eurocode 9: Calcul des structures en aluminium – Partie 1-2: Calcul des structures pour leur résistance au feu*, 2007, CEN (Comité Européen de Normalisation).
84. Bailey, C.L., T, *Full-scale fire tests on a composite floor slab incorporating beams of asymmetric steel construction*. Fire Safety Journal, 1999.
85. Inc., A., ANSYS, ANSYS Inc.: Canonsburg, Pennsylvania, USA.