

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 :
- OUKID Zineddine
- ELARBI REZIG Baghdad

**Etude des réponses thermique et mécanique des
poutres métalliques Cellulaires curvilignes en
situation d'incendie**

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

HARICHANE Zamila	Professeure	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Présidente
LAMRI Belkacem	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Examinateur
KADA Abdelhak	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Encadrant

Promotion : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Dieu Tout-Puissant**, qui nous a donné
Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce
travail.

Nous remercions sincèrement notre encadrant, Professeur **KADA Abdelhak**, pour son
accompagnement précieux, ses conseils éclairés et sa disponibilité tout au long de ce travail.
Son soutien constant a été essentiel à l'aboutissement de ce projet.

Nous remercions plus particulièrement professeur **HARICHANE Zamila**, pour avoir présidé
cette soutenance, ainsi que professeur **LAMRI Belkacem**, pour le temps consacré à la lecture
attentive de ce mémoire et pour la richesse de leurs remarques et suggestions. Leur expertise
et leurs observations constructives ont grandement contribué à enrichir cette recherche et à
approfondir notre réflexion.

Nous remercions également le doctorant SALAMAH Mus'ab chercheur au laboratoire de
recherche LISICPE pour nous avoir aidé dans mon travail et nous a beaucoup encouragé.

Nous tenons également à remercier **l'ensemble du corps enseignant** du département de génie
civil pour la qualité de l'enseignement dispensé durant notre formation.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la
réalisation de ce projet.

DEDICACES

(Zineddine)

À **mon père,**

Qui m'a toujours appris que la persévérance et le travail finissent par porter leurs fruits. Ta sagesse m'accompagne à chaque étape.

À **ma mère,**

Ton amour, ta patience et tes prières silencieuses ont été mon refuge dans les moments de doute.

À **mon frères et mes sœurs,**

Rawnek ; Rawane & Bahaa ;Imane ,Pour votre présence chaleureuse, vos mots d'encouragement et votre soutien indéfectible.

À **mes amis les plus proches,**

Rahim ;Baghdad ; Bou abdellah , Pour les échanges constructifs, le partage des difficultés, et les éclats de rire qui ont allégé les longues journées de travail.

Enfin, à **tous ceux qui ont cru en moi,**

Cette réussite est aussi la vôtre.

DEDICACES

(Baghdad)

Je dédie ce travail à :

Ma famille, pour son amour inconditionnel, son soutien moral et matériel tout au long de mon parcours universitaire.

Mes parents, en particulier, pour leurs sacrifices, leurs prières et leur patience.

Mes frères et sœurs, pour leur présence rassurante et leurs encouragements constants.

Mes enseignants, pour leur transmission du savoir et leur accompagnement tout au long de mes études.

Mes amis et collègues, Zineddine & Rahim & Aek pour les moments de partage, de soutien et d'entraide.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce projet.

RESUME

Cette étude analyse le comportement thermique et mécanique des poutres en acier courbées à âme ajourée sous l'effet de températures élevées (20 °C, 500 °C, 700 °C). Une méthodologie combinant l'analyse analytique basée sur l'Eurocode 3 et des simulations numériques via le logiciel ANSYS a été adoptée pour évaluer l'impact des ouvertures sur la capacité portante, la distribution thermique et les déformations. Les résultats montrent que les ouvertures accélèrent le transfert de chaleur, réduisant la stabilité structurelle et augmentant les risques de flambement et d'effondrement en situation d'incendie. L'utilisation d'une protection thermique, telle qu'une couche de béton, limite significativement l'élévation de la température, maintenant l'acier en dessous de 600 °C pendant une durée prolongée, préservant ainsi ses propriétés mécaniques. L'étude souligne l'importance d'une conception optimisée des ouvertures et d'une protection thermique efficace pour garantir la sécurité et les performances des poutres en acier courbées à âme ajourée dans des conditions extrêmes.

Mots-clés : Poutres en acier courbées, Ouvertures d'âme, Incendie, Comportement thermique, Comportement mécanique, Eurocode 3, Méthode des éléments finis

ABSTRACT

This study investigates the thermal and mechanical behavior of curved steel beams with web openings under elevated temperatures, focusing on their performance at 20°C, 500°C, and 700°C. Using a combined approach of analytical calculations based on Eurocode 3 and numerical simulations with ANSYS, the research evaluates the impact of web openings on load-bearing capacity, thermal distribution, and resulting deformations. The findings reveal that web openings accelerate heat transfer, reducing structural stability and increasing the risk of buckling and collapse under fire conditions. The use of thermal protection, such as concrete layers, significantly mitigates temperature rise, maintaining steel temperatures below 600°C for extended periods, thus preserving mechanical properties. The study highlights the importance of optimized opening design and effective thermal protection to enhance the safety and performance of curved cellular steel beams in extreme conditions.

Keywords: Curved steel beams, Web openings, Fire, Thermal behavior, Mechanical behavior, Eurocode 3, Finite Element Method

ملخص

تتناول هذه الدراسة السلوك الحراري والميكانيكي للعوارض الفولاذية المنحنية ذات الفتحات في الويب تحت درجات حرارة مرتفعة، مع التركيز على أدائها عند درجات حرارة 20 مئوية، 500 مئوية، و700 مئوية. باستخدام نهج مدمج يجمع بين الحسابات التحليلية استناداً إلى الكود الأوروبي 3 والمحاكاة العددية باستخدام برنامج ANSYS، تقيّم الدراسة تأثير الفتحات في جسم العارضة على قدرتها على تحمل الأحمال، وتوزيع الحرارة، والتشوهات الناتجة. تكشف النتائج أن الفتحات في ويب العارضة تُسرّع من انتقال الحرارة، مما يقلل من الاستقرار الهيكلي ويزيد من مخاطر الانبعاج والانهياب في ظروف الحريق. استخدام الحماية الحرارية، مثل طبقات الخرسانة، يقلل بشكل كبير من ارتفاع درجة الحرارة، حيث يحافظ على درجات حرارة الفولاذ دون 600 مئوية لفترات طويلة، مما يحافظ على الخصائص الميكانيكية. تؤكد الدراسة على أهمية تصميم الفتحات بطريقة مثالية واستخدام حماية حرارية فعالة لتعزيز السلامة والأداء للعوارض الفولاذية المنحنية ذات الفتحات في الظروف القصوى.

الكلمات المفتاحية: العوارض الفولاذية المنحنية، فتحات الجسم، الحريق، السلوك الحراري، السلوك الميكانيكي، الكود الأوروبي 3، طريقة العناصر المحدودة

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	ii
DEDICACES iii	
DEDICACES iv	
RESUME v	
ABSTRACT vi	
ملخص vii	
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
INTRODUCTION GENERALE	17
Problématique	18
Méthodologie	19
CHAPITRE 1 ETAT DE L'ART	20
1.1. Introduction	21
1.2. Poutre métallique	22
1.2.1. Poutre métalliques sans ouverture	22
1.2.2. Poutre métallique à ouvertures d'âme.....	23
1.2.3. Poutres courbes sans ouvertures	24
1.2.4. Poutres courbes avec ouvertures	25
1.3 Historique	25
1.4 Procédés de fabrication.....	26
1.5 Performances et usages des poutres courbes à âme ajourée	28
1.6 Simulation et analyse thermique.....	Erreur ! Signet non défini.
1.6.1. Risque incendie	Erreur ! Signet non défini.
1.6.2. Les principales étapes du développement d'un incendie	30
1.7 Protection.....	31
1.7.1. Les matériaux non réactifs	32
1.7.2. Matériaux réactifs	32
1.8 Les modes de ruine	Erreur ! Signet non défini.
1.8.1. Flambement.....	33
1.8.2. Rupture par Cisaillement	34
1.8.3. Rupture en flexion.....	34
1.8.4. Torsion	35
1.9 Synthèse du travaux antérieurs	35
1.10. Conclusion	38
CHAPITRE 2 APPROCHE REGLEMENTAIRE DES POUTRES	
METALLIQUES COURBES PLEINES ET A OUVERTURE D'AME	39
2.1. Introduction	40
2.2 Classification et Normes de conception de résistance au feu	40
2.3 Propriétés du matériau	41
2.3.1. Propriétés thermiques.....	41
2.3.2. Propriétés mécaniques de l'acier	44
2.3.3. Protection	47

2.4.	Modèle de conception.....	48
2.5.	Résistance au droit d'une ouverture - Effet Vierendeel	49
2.6.	Résistance au cisaillement du montant.....	50
2.7.	Action Thermique.....	51
2.8.	Vérification de la résistance mécanique	55
2.9.	Cas de poutres à plusieurs ouvertures.....	57
2.10.	Conclusion.....	57
CHAPITRE 3 SIMULATION NUMERIQUE ET ANALYSE THERMIQUE		
D'UNE POUTRE COURBE		58
3.1.	Introduction	59
3.2.	Méthode des éléments finis	59
3.3.	Présentation de logiciel ANSYS.....	60
3.4.	Cas d'étude	62
3.4.1.	Poutre courbe sans ouverture.....	63
3.4.2.	Poutre courbe avec ouverture.....	63
3.5.	Modèle thermique.....	63
3.5.1.	Type d'élément.....	63
3.5.2.	Condition aux limites.....	64
3.5.3.	Modélisation	65
3.5.4.	Application du feu en poutre courbe.....	66
3.5.5.	Description de la distribution thermique des poutres sans ouvertures... ..	73
3.5.6.	Description de la distribution thermique des poutres avec ouvertures	73
3.5.7.	Description de la distribution thermique des poutres courbe sans avec protection en béton.....	74
3.6.	Comparaison entre les résultats analytiques et numériques :	74
3.7.	Conclusion	75
CHAPITRE 4 ANALYSE MECANIQUE SOUS L'EFFET DE HAUTES TEMPERATURES		77
4.1.	Introduction	78
4.2.	Outil d'analyse: logiciel ANSYS	78
4.3.	Type d'élément et les conditions aux limites	79
4.4.	Analyse et interprétation des résultats	80
4.4.1.	Déplacement la poutre à T = 20C°	80
4.4.2.	Déplacement la poutre à T = 500C°	83
4.4.3.	Déplacement la poutre avec ouverture à T = 700 C°	84
4.5.	Comparaison du déplacement à différentes températures	85
4.5.1.	Cas de la poutre solide	85
4.5.2.	Cas de la poutre avec ouverture	86
4.6.	Les contraintes de Von Mises.....	87
4.7.	Conclusion	88
CONCLUSION GENERALE.....		89
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		90

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Poutre métallique en situation d'incendie	22
Figure 1-2 Poutres métalliques à ouvertures d'âmes	24
Figure 1-3 Poutres courbes	25
Figure 1-4 Poutre courbe à ouverture d'âme	25
Figure 1-5 Table d'oxycoupage de poutrelles laminées à chaud	27
Figure 1-6 Procédé de fabrication de poutre cellulaire	27
Figure 1-7 Processus de courbure	28
Figure 1-8 Poutre de toiture courbe	29
Figure 1-9 Triangle de feu	29
Figure 1-10 Madrid (Tour Windsor) , 2005.....	30
Figure 1-11 WTC 2001	30
Figure 1-12 Courbe standard ISO 834	31
Figure 1-13 Figure Panneaux résistants au feu	32
Figure 1-14 Expansion du revêtement intumescent après l'essai	33
Figure 1-15 Double courbure du montant de l'âme Web-Post	34
Figure 1-16 Ruine par cisaillement de la section transversale ajourée.....	34
Figure 1-17 poutre cellulaire avec une ruine par flexion	35
Figure 2-1 Chaleur spécifique de l'acier en fonction de la température.....	42
Figure 2-2 Conductivité thermique de l'acier en fonction de la température	43
Figure 2-3 Dilatation thermique relative de l'acier en fonction de la température	44
Figure 2-4 Diagramme de Relation contrainte-déformation de l'acier à des températures élevées	45
Figure 2-5 Relations contrainte-déformation en fonction de la température	45
Figure 2-6 Coefficient de réduction de l'acier aux températures élevées.....	46
Figure 2-7 Relation contrainte-déformation pour l'acier S355 à des températures élevées.....	47
Figure 2-8 Repérage d'une section de poutre courbe	48
Figure 2-9 section inclinée d'un angle ϕ	50
Figure 2-10 Paramètres de section pour différents modèles de poutres	52
Figure 2-11 Sections affectées par les modes de défaillance potentiels d'un boîtier cellulaire	53
Figure 2-12 Poutre en acier courbée exposée au feu sur quatre côtés	54
Figure 2-13 Poutre en acier courbée exposée au feu sur trois côtés	54
Figure 2-14 Évolution de la température en fonction du temps pour une poutre courbe solide exposé à quatre directions de feu.....	54
Figure 2-15 Évolution de la température en fonction du temps pour une poutre courbe solide exposé à trois directions de feu	55
Figure 2-16 Évolution de la température en fonction du temps pour une poutre courbe avec ouverture exposé à quatre directions de feu	55
Figure 2-17 Évolution de la température en fonction du temps pour une poutre courbe avec ouverture exposé à trois directions de feu	55
Figure 3-1 Exemple d'application de la MEF.....	60
Figure 3-2 Logiciel ANSYS	61
Figure 3-3 Définition du type d'analyse dans ANSYS	61
Figure 3-4 Présentation de face de travail dans ANSYS	62
Figure 3-5 Les dimensions de la section transversal IPE600	62
Figure 3-6 Géométrie SHELL131	64

Figure 3-7 Poutre courbe sans ouverture : model EF en ANSYS.....	65
Figure 3-8 Poutre courbe avec ouverture : model EF en ANSYS	65
Figure 3-9 Poutre courbe solide avec protection : model EF en ANSYS.....	66
Figure 3-10 Répartition de la température dans la section solide R60 exposé sur 4 cotés - ANSYS.....	66
Figure 3-11 Évolution de la température en fonction du temps d'une poutre solide exposée sur quatre côtés - ANSYS	67
Figure 3-12 Répartition de la température dans la section solide R60 exposé sur 3 cotés	67
Figure 3-13 Évolution de la température en fonction du temps pour une poutre courbée solide à trois côtés à l'aide d'ANSYS	68
Figure 3-14 Évolution de la température en fonction du temps pour une poutre courbée solide à trois côtés - ANSYS et EC3.....	68
Figure 3-15 Répartition de la température dans la section avec ouverture R60 exposé sur 4 cotés ANSYS	69
Figure 3-16 Évolution de la température en fonction du temps d'une poutre courbée solide à quatre côtés - ANSYS.....	69
Figure 3-17 Évolution de la température en fonction du temps d'une poutre courbée solide à quatre côtés - ANSYS et EC3.....	70
Figure 3-18 Répartition de la température dans la section avec ouverture R60 exposé sur 3 cotés - ANSYS	70
Figure 3-19 Evolution de température en fonction du temps dans déférent nœuds de poutre courbe avec ouverture 3 cotés par ANSYS	71
Figure 3-20 Évolution de la température en fonction du temps d'une poutre courbée solide sur trois côtés - ANSYS et EC3	71
Figure 3-21 Répartition de la température dans la section solide R60 exposé sur 3 cotés - ANSYS.....	72
Figure 3-22 Evolution de température en fonction du temps dans déférent nœuds de poutre courbe solide.....	73
Figure 4-1 Face structural ANSYS	79
Figure 4-2 Géométrie SHELL181	79
Figure 4-3 Les conditions limites pour Appui double	80
Figure 4-4 Déplacement de la poutre courbe solide à 20 C°	81
Figure 4-5 Variation du déplacement en fonction de charge –cas de la poutre solide à 20 C°	81
Figure 4-6 Déplacement de la poutre avec ouverture à 20 C°	82
Figure 4-7 Variation du déplacement en fonction de charge –cas de la poutre avec ouverture à 20 C°	82
Figure 4-8 Variation du déplacement en fonction de charge –cas de la poutre solide à 500C°	83
Figure 4-9 Variation du déplacement en fonction de charge –cas de la poutre avec ouverture à 500 C°	84
Figure 4-10 Diagramme de déplacement en fonction de charge pour les poutres courbe avec ouverture de 700 C°	84
Figure 4-11 Diagramme de déplacement en fonction de charge pour les poutres courbe solide	85
Figure 4-12 Diagramme de déplacement en fonction de charge pour les poutres courbe avec ouverture	86
Figure 4-13 Les contraintes de Von Mises de la poutre courbe à 500°C	87
Figure 4-14 Les contraintes de Von Mises de la poutre courbe à 700C°	87

Figure 4-15 Les contraintes de Von Mises de la poutre courbe à 500C°88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1	Facteurs de réduction	46
Tableau 3-1	Les Caractéristiques géométriques des cas étudié	63

Notation

A_{brute}	Air de la section brute
A_v	Zone de cisaillement de chaque position (inf, sup) pour section brute
A_{nette}	Air de la section nette
A_v'	Zone de cisaillement de chaque position (inf, sup) pour section nette
A_∅	Air de la section nette inclinée
A_{v,∅}	Air de la section nette inclinée.
A₀	Diamètre d'ouverture.
b	Largeur de semelle
c	Distance entre l'âme et l'extrémité de la semelle
Ca	Chaleur spécifique de l'acier.
d	Hauteur de la partie droite d'une âme.
d_G	Distance entre les centres de gravité des membrures supérieure et inférieure, au droit de l'ouverture.
e	Espace d'axe entre deux ouvertures
E	Module d'élasticité longitudinal de l'acier.
E_{a,∅}	Module d'élasticité longitudinal de l'acier à haute température.
f_y	Limite d'élasticité de l'acier.
f_u	Limite de résistance à la rupture de l'acier.
F_{y,∅}	Limite d'élasticité de l'acier à haute température.
G	Module d'élasticité transversale de l'acier.
h	Hauteur de profilée
h_m	Hauteur de chaque membre (inf, sup) pour section brute
h'_m	Hauteur de chaque membre (inf, sup) pour section nette
h_∅	Hauteur de chaque membre (inf, sup) pour section nette inclinée
ḣ_{net,r}	Flux de chaleur par rayonnement
ḣ_{net,c}	Flux de chaleur par convection
I_{y,brute}	Moment d'inertie de la section par rapport à l'axe y pour section brute.
I_{y,∅}	Moment d'inertie de la section par rapport à l'axe y de chaque membre pour section nette inclinée.
K_{y,∅}	Facteur de réduction à température par rapport au valeur f _y , E _a à 20°C
L	Longueur de la poutre.
M_{Ed}	Moment de flexion repris par la poutre acier au droit d'une ouverture.
M_{c,Ed}	Moment résistant
M_{v,Ed}	Moment résistant plastique réduit du fait de l'effort tranchant
M_{∅,Rd}	Moment fléchissant dans la section critique
N_{∅,Rd}	Moment de résistance réduit pour le cisaillement sur une section inclinée d'un angle φ
N_{t,m,Ed}	Effort normal repris par le Té supérieur.
N_{b,m,Ed}	Effort normal repris par le Té inférieur.
tf	Épaisseur de la semelle
tw	Épaisseur de l'âme.
V_{pl,Rd}	Résistance plastique au cisaillement
V_{h,Ed}	Effort de cisaillement horizontal
V_{t,m,Ed}	Effort tranchant repris par le Té supérieur.
V_{b,m,Ed}	Effort tranchant repris par le Té inférieur.
V_{h,Rd}	Résistance plastique au cisaillement horizontale
V_{∅,Ed}	Effort tranchant repris par le Té inférieur.

W	Largeur du montant d'âme.
$W_{pl, \phi}$	Module de résistance plastique de section nette inclinée.
$Z_{G, brute}$	Position du centre de gravité par rapport à la fibre inférieure pour section brute
$Z_{G, nette}$	Position du centre de gravité par rapport à la fibre inférieure pour section nette
$Z_{G, \phi}$	Position du centre de gravité par rapport à la fibre inférieure pour section nette inclinée.
α_c	Coefficient de transfert thermique par convection.
β	Angle du conicité
$\Delta L/L$	Dilatation thermique
ϵ_m	Émissivité de la surface de l'élément qui dépend du type de matériau.
ϵ_f	Émissivité du compartiment feu.
θ_a	Température d'acier.
θ_m	Température de la surface de l'élément.
θ_g	Température des gaz dans le compartiment.
k	Facteur de réserve de post-critique assuré par les tés au niveau des ouvertures.
λ_a	Conductivité thermique.
$\bar{\lambda}_w$	Paramètre d'élanement
μ_0	Taux d'utilisation au temps
ν	Coefficient de poisson
ρ_a	Masse volumique de l'acier.
$\sigma_{w, Ed}$	Contrainte principale de compression sur la section critique due au moment fléchissant local
$\sigma_{w, Rd}$	Contrainte principale résistante de calcul pour le demi-montant
$\sigma_{w, cr}$	Contrainte principale critique est donnée pour demi montant
τ_{cr}	Contrainte critique de voilement par cisaillement
ϕ_{max}	Angle du section inclinée
ϕ	Facteur de configuration
X	Coefficient de réduction
X_W	Contribution de l'âme à la résistance au voilement par cisaillement.

INTRODUCTION GENERALE

Les poutres en acier à profil courbé et à âme ouverte constituent l'un des éléments structurels le plus adapté aux constructions modernes dite à plateaux libres , offrant un mélange unique de légèreté, de durabilité et d'adaptabilité aux conceptions architecturales complexes. Ces poutres sont largement utilisées dans les bâtiments à grandes portées, tels que les aéroports, les stades et les ponts, mettant en évidence leur capacité à supporter des charges lourdes tout en réduisant la quantité de matériaux utilisés. Cependant, leur exposition à des températures élevées, comme dans le cas d'incendies, représente un défi majeur en raison de la diminution des propriétés mécaniques de l'acier, en particulier en présence d'ouvertures qui accélèrent le transfert de chaleur et affectent la stabilité structurelle.

Ce projet de fin d'étude vise à analyser le comportement thermique et mécanique des poutres en acier courbées à âme ouverte sous l'effet de températures élevées, en se concentrant sur l'évaluation de l'impact des ouvertures et des différentes températures, 20°C, 500°C, 700°C sur leur capacité portante. Une méthodologie combinant l'analyse analytique basée sur les normes européennes (Eurocode 3) et la simulation numérique à l'aide du logiciel ANSYS sera adoptée pour comprendre les variations de la distribution thermique et les déformations résultantes. Cette étude souligne l'importance de concevoir les poutres avec une protection thermique efficace et économique au niveau de l'âme qui présente des ouvertures pour garantir la sécurité et améliorer les performances dans des conditions accidentelles. Le but est d'investiguer le comportement complexe de la réponse thermique et mécanique et de le comparer aux normes et guides de conception en vigueur.

Problématique

Les poutres en acier avec ouvertures d'âme sont largement utilisées dans les structures modernes pour réduire le poids et faciliter l'accès aux services sans augmenter la hauteur de la structure. Cependant, ces ouvertures modifient considérablement le comportement des poutres. Ces défis sont exacerbés lorsque les poutres sont exposées à des températures élevées lors d'incendies, car la résistance de l'acier diminue et se déforme, accélérant ainsi l'effondrement de la structure.

Des études indiquent qu'en situation d'incendie que les ouvertures d'âme accélèrent le transfert de chaleur et affaiblissent la résistance au flambement des montants de la poutre[1].

Si des recherches ont été menées sur les poutres courbes solides en condition normales, les études sur les poutres courbes en conditions d'incendie restent limitées et encore plus en présence d'ouverture dans l'âme. Cela est dû à la complexité supplémentaire causée par la présence des ouvertures et la flexion de poutre cellulaire, qui modifie la répartition des charges et augmente le risque d'instabilité par la présence de modes de ruine ou d'effondrement localisé.

Par conséquent, la compréhension du comportement mécanique et thermique des poutres en acier courbes ou arcs avec ouvertures d'âme sous charge et pendant un incendie est essentielle pour améliorer leur conception et garantir leur sécurité dans des conditions critiques, conformément à l'Eurocode 3.

Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est d'analyser le comportement des constructions, en particulier des poutres métalliques cellulaires curvilignes, en situation d'incendie. Elle vise à évaluer l'impact des températures élevées sur la résistance mécanique et la stabilité structurelle de ces éléments, tout en identifiant les principaux modes de ruine possibles. L'étude cherche également à proposer des solutions de protection et de conception adaptées pour améliorer la sécurité incendie des structures, conformément aux normes en vigueur.

Méthodologie

Conformément à l'Eurocode 3, le dimensionnement des poutres, cintrées et en arcs, en acier, tant en conditions normales (environ 20 °C) qu'en conditions d'incendie, est traité dans les parties EC-1-1[2] et EC-1-2[3].

En conditions normales, l'EN 1993-1-1 traite du dimensionnement des poutres, cintrées et en arcs, en acier en analysant le flambement latéral par torsion et en vérifiant la résistance de la poutre au flambement et à l'effondrement sous diverses charges, en tenant compte des variations des propriétés mécaniques de l'acier. L'analyse structurale permet de déterminer les efforts et les déformations internes, en tenant compte de l'effet de la courbure sur la répartition de ces efforts.

En conditions d'incendie, l'Eurocode 3 partie 1-2 [3] traite du dimensionnement des poutres en acier en analysant les effets thermiques sur les propriétés mécaniques de l'acier. Les températures élevées réduisent la résistance de l'acier et augmentent les déformations, ce qui affecte le comportement de la poutre. L'analyse thermique permet de déterminer la répartition de la température dans la poutre et est combinée à l'analyse mécanique pour évaluer les performances structurelles sous l'influence de la chaleur. La résistance de la poutre au flambage et à l'effondrement sous l'influence de la chaleur doit être vérifiée en tenant compte des modifications des propriétés mécaniques de l'acier. Concernant les poutres cintrées en acier avec ouvertures d'âme, l'Eurocode 3 ne traite pas directement de la conception dans les documents de base. La partie EN 1993-1-13 fournit des recommandations supplémentaires pour la conception des poutres en acier avec de grandes ouvertures d'âme, telles que les poutres cellulaires et perforées. Cependant, cette partie précise que ces recommandations ne s'appliquent pas aux poutres cintrées, bien que les mêmes principes puissent être appliqués.

En ce qui concerne la conception en conditions d'incendie, la partie EN 1993-1-2 traite des effets des températures élevées sur les propriétés mécaniques de l'acier et le comportement des éléments de structure. Cependant, cette partie ne fournit pas de recommandations spécifiques pour les poutres cintrées avec ouvertures d'âme.

CHAPITRE 1 ETAT DE L'ART

1.1. Introduction

Les structures en acier sont des structures construites avec de l'acier ou d'autres métaux comme élément structurel principal et sont utilisées dans de nombreuses applications d'ingénierie et d'architecture. Elles se caractérisent par leur capacité portante élevée, leur facilité d'installation et leur capacité à créer des conceptions architecturales flexibles et légères par rapport aux structures en béton.

Grâce aux progrès des technologies de fabrication, les structures en acier sont devenues l'une des solutions les plus répandues dans la construction moderne. Elles sont largement utilisées dans les bâtiments nécessitant de grandes portées, tels que les aéroports, les stades et les hangars d'avions, en raison de leur durabilité et de leur capacité à supporter des charges sur de longues distances. Les ingénieurs considèrent cela comme un inconvénient en raison de son inefficacité économique. Pour résoudre ce problème et améliorer les performances tout en maîtrisant les coûts, ingénieurs et chercheurs ont recherché des solutions innovantes. Parmi ces solutions, les poutres cellulaires se distinguent. Ces poutres peuvent être simples ou multiples, permettant le passage de différents types d'assainissement et contribuant à réduire l'épaisseur de la fondation sans compromettre la rigidité structurelle. Les poutres cellulaires cintrées sont proposées pour améliorer les performances structurelles grâce à leur conception incurvée, qui contribue à une meilleure répartition des charges et à une concentration réduite des contraintes. Cette forme géométrique améliore la résistance à la flexion et à la fatigue de la poutre, augmentant ainsi sa durabilité et prolongeant sa durée de vie. Grâce à ces propriétés, les poutres cellulaires cintrées offrent un équilibre de résistance, ce qui en fait un choix idéal pour les applications nécessitant des structures rigides avec un minimum de matériaux et de coûts. [3]

Ce chapitre présente l'état de l'art sur l'étude de la réponse thermique et mécanique des poutres métalliques cellulaires curvilignes en situation d'incendie. Cette revue de littérature couvrira les aspects suivants :

- Acier de construction
- Poutre métallique
- Poutre courbe sans ouverture
- Poutre courbe avec ouverture
- Historique
- Procèdes de fabrication
- Les modes de ruine

- Risque incendie
- Les principales étapes du développement d'un incendie
- Propriétés thermiques
- Protection
- Conclusion

1.2. Poutre métallique

Les poutres métalliques sont réalisées par l'acier de construction qui est un alliage de fer et de carbone utilisé dans le génie civil et l'industrie pour sa résistance, sa durabilité et sa facilité d'assemblage. Ils sont employés dans la construction de bâtiments, ponts et infrastructures. Grâce à ses propriétés mécaniques et sa recyclable, la poutre métallique joue un rôle essentiel dans les structures modernes et durables.

1.2.1. Poutre métalliques sans ouverture

Les poutres en acier à âme fermée sont des éléments structuraux essentiels dans la conception des bâtiments modernes, offrant une grande efficacité de transfert de charge et une grande résistance à la déformation. Dans des conditions normales à 20 °C, ces poutres présentent des performances mécaniques stables, une répartition uniforme des contraintes et une capacité à supporter efficacement les charges de conception. Cependant, l'exposition à des températures élevées, comme lors d'un incendie, détériore leurs propriétés mécaniques, entraînant potentiellement une perte de rigidité et de résistance, et augmentant le risque de flambement ou d'effondrement prématuré.[3]

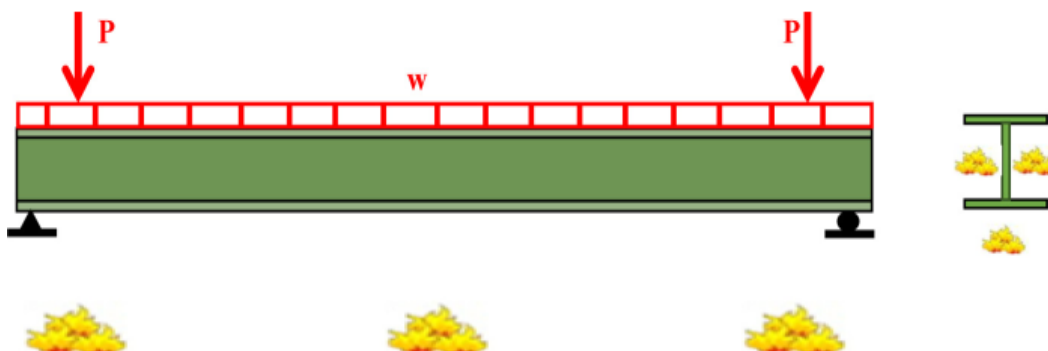


Figure 1-1 Poutre métallique en situation d'incendie

1.2.2. Poutre métallique à ouvertures d'âme

Les poutres en acier à ouverture d'âme sont des éléments structurels courants dans la conception de toitures et de planchers, offrant une construction légère et une répartition efficace des charges [3]. À température normale (20 °C), ces poutres présentent de bonnes performances mécaniques, avec une répartition uniforme des contraintes et une capacité élevée à supporter les charges de conception. Cependant, une exposition à des températures élevées, comme lors d'un incendie, détériore leurs propriétés mécaniques, entraînant potentiellement une perte de rigidité et de résistance, et augmentant le risque de flambage ou d'effondrement prématuré. Il est donc essentiel de comprendre le comportement de ces poutres à différentes températures afin de garantir la sécurité des structures en conditions normales et d'urgence [3].

Nous avons plusieurs types des ouvertures comme montrés sur les figures suivantes :



(a) Poutres métalliques cellulaires [4].



(b) Poutre Angelina [4].



(c) Poutres à ouvertures irrégulières [4].



(d) Poutre à ouverture rectangulaire [5]



(e) Extension poutres à ouvertures Angelina [5]

Figure 1-2 Poutres métalliques à ouvertures d'âmes

1.2.3. Poutres courbes sans ouvertures

Les poutres en acier cintrées ou en arcs sont des éléments structuraux importants utilisées pour réaliser de longues travées due a leurs propriétés géométrique. Pour des structures de grandes portées, elles assurent une répartition efficace des charges et une résistance élevée au flambement, permettant l'augmentation de la capacité portante en utilisant les courbures des éléments. Pour réaliser des projets économiques et fiables l'arc est une solution structurale adaptée [5].

À 20 °C, les poutres en acier présentent de bonnes performances mécaniques. Cependant, sous l'effet de températures élevées, leurs propriétés se détériorent : perte de rigidité, baisse du module et de la limite d'élasticité, augmentant le risque de flambement ou d'effondrement. Comprendre ce comportement thermique est essentiel pour garantir la sécurité structurale en conditions normales et extrêmes.



Figure 1-3 Poutres courbes

1.2.4. Poutres courbes avec ouvertures

Les poutres cintrées en acier à ouverture d'âme sont des éléments structuraux avancés utilisés en architecture. Dans des conditions normales à 20 °C, ces poutres présentent de bonnes performances mécaniques, avec une répartition uniforme des contraintes et une grande capacité à supporter les charges de conception. Cependant, une exposition à des températures élevées, comme lors d'un incendie, détériore leurs propriétés mécaniques, entraînant potentiellement une perte de rigidité et de résistance, et augmentant le risque de flambement ou d'effondrement prématuré [5].



Figure 1-4 Poutre courbe à ouverture d'âme[5].

1.3. Historique

L'étude des poutres courbes allie une riche histoire théorique et expérimentale. Dès les 18^e et 19^e siècles, des scientifiques comme Bresse et Kirchhoff ont posé les bases théoriques, en

développant des équations pour analyser les contraintes dans les arcs et les tiges élastiques [6].

À l'ère industrielle, des ingénieurs tels qu'Eiffel ont validé ces théories par des essais pratiques sur des ponts en arc, révélant l'impact de la courbure sur la distribution asymétrique des contraintes. Au 20^e siècle, Timoshenko a intégré mathématiquement les effets du cisaillement et de la flexion, tandis que des méthodes comme la photoélasticité ont permis de visualiser ces phénomènes.

Avec l'avènement de l'informatique, les méthodes numériques (éléments finis) ont révolutionné la conception des poutres courbes complexes, et les matériaux composites ou l'impression 3D ont élargi leurs applications, des structures aérospatiales aux architectures audacieuses. Cependant, des défis persistent : la concentration de contraintes aux zones courbées, l'optimisation poids-résistance, ou la durabilité, poussant les ingénieurs à exploiter l'IA et des capteurs haute précision. Aujourd'hui, les poutres courbes incarnent la fusion entre élégance technique et performance, au cœur des défis ingénierie du 21^e siècle.

1.4. Procédés de fabrication

La fabrication des poutres métalliques cellulaires curvilignes consiste à découper un profilé en acier laminé à chaud (S235, S275 ou S355) en zigzag à l'aide d'une machine plasma, laser ou par oxycoupage. Cette découpe permet de créer deux demi-profilés qui, après un décalage et un assemblage, formeront une poutre ajourée [7].

L'opération repose sur l'utilisation de profilés laminés à chaud et d'une machine d'oxycoupage ou de découpe laser, avec un motif de découpe en coupes semi-circulaires superposées (voir la figure (1-5)) [8], L'axe de coupe doit être incliné, et en retournant les sections en T de 180°, on obtient une hauteur variable [7]. Ces sections sont ensuite assemblées par soudage pour former des poutres dont la profondeur est augmentée de 60 % par rapport à la poutre initiale. Ce processus génère également des ouvertures, nécessitant une coupe extérieure supplémentaire (voir Figure (1-6)). Cette méthode de fabrication est employée par ArcelorMittal (Luxembourg) [7] et Westock (Royaume-Uni), parmi d'autres fabricants spécialisés dans la production de ces éléments [9].



Figure 1-5 Table d'oxycoupage de poutrelles laminées à chaud [10].

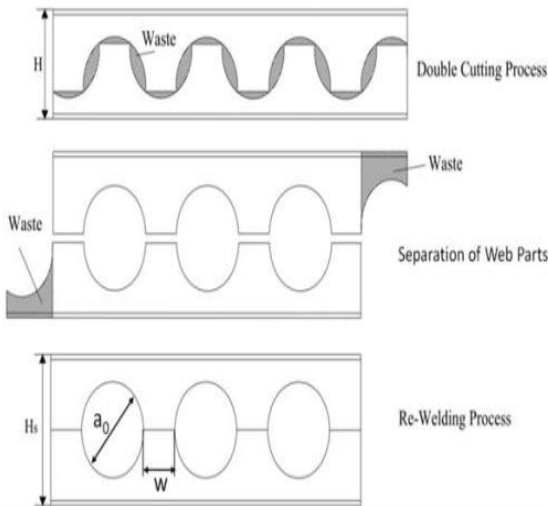
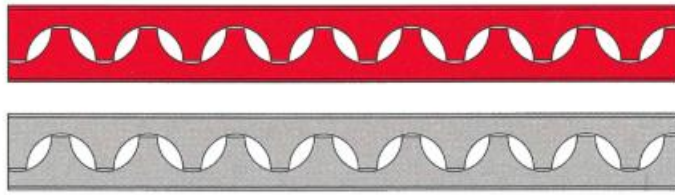
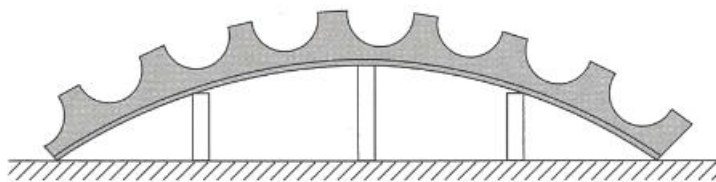


Figure 1-6 Procédé de fabrication de poutre cellulaire [11].

Step 1



Step 2



Step 3

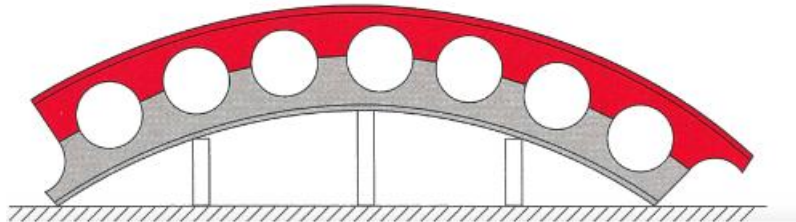


Figure 1-7 Processus de courbure [12].

1.5. Performances et usages des poutres courbes à âme ajourée

Les poutres métalliques cellulaires curvilignes, dérivées des poutres cellulaires classiques, offrent une structure légère, résistante et flexible grâce à leur âme ajourée et leur géométrie courbée. Elles optimisent le poids, facilitent le transport et améliorent l'esthétique, ce qui les rend idéales pour les architectures modernes. Utilisées dans les ponts, bâtiments industriels et structures culturelles, elles permettent de grandes portées avec une réduction des supports intermédiaires tout en s'adaptant aux contraintes spécifiques des projets [13].



Figure 1-8 Poutre de toiture courbe

1.6. Risque incendie

Les incendies représentent un danger majeur pour les bâtiments, menaçant la sécurité des occupants et l'intégrité des structures. Leur propagation rapide, la toxicité des fumées et l'affaiblissement des matériaux aggravent leurs effets destructeurs. Pour limiter ces risques, il est crucial de comprendre leur impact sur les constructions et d'adopter des mesures de prévention et de protection adaptées.

Un feu est une combustion qui peut être contrôlée (fours, chaudières) ou incontrôlée, devenant alors un incendie. Ce dernier se déclenche lorsque trois éléments sont réunis : oxygène, combustible et chaleur. La combustion du carbone produit du CO_2 , mais en manque d'oxygène, elle génère du CO [14].

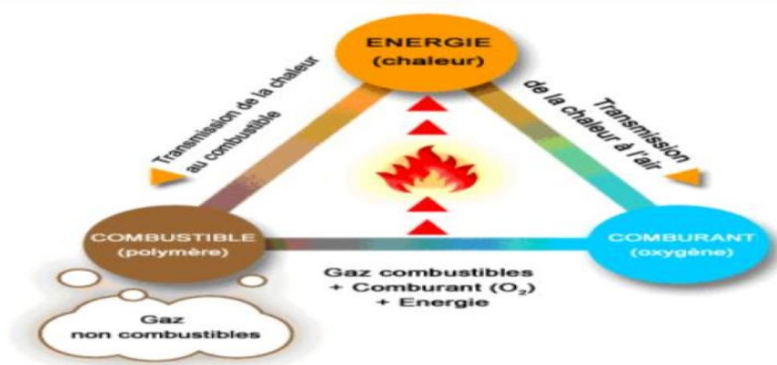


Figure 1-9 Triangle de feu [14].

Bien que l'acier soit un matériau incombustible, les structures métalliques restent vulnérables aux incendies en raison de la dégradation de leurs propriétés mécaniques sous l'effet de la chaleur. En effet, l'élévation de la température entraîne une diminution significative de la limite élastique et du module d'Young de l'acier, ce qui peut provoquer l'effondrement des structures. Suite à des accidents tragiques (Figure 1-10) et à une prise de conscience accrue des enjeux de sécurité, de nombreuses études ont été menées sur ce sujet. Ces recherches ont conduit à l'intégration du comportement des bâtiments en acier en cas d'incendie dans des normes telles que l'Eurocode 3 (NF EN 1993-1-2), publié en 2005 [8, 15].



Figure 1-10 Madrid (Tour Windsor) ,
2005[14]



Figure 1-11 WTC 2001 [14]

Les principales étapes du développement d'un incendie

Le développement du feu est un processus dynamique basé sur l'interaction des éléments du « triangle du feu » (combustible, oxygène, chaleur) qui passe par les étapes suivantes [14]

A) Étape d'allumage

L'étape d'allumage est considérée comme la première étape du développement d'un incendie, car elle commence lorsque les trois éléments de base du « triangle du feu » sont présents. Cette étape est invisible dans certains cas, notamment lorsque l'allumage est lent et sans flamme claire, comme dans les cas de combustion spontanée de certaines matières organiques. L'intervention à ce stade est cruciale, car l'incendie peut être facilement éteint, empêchant ainsi le feu de passer à des stades avancés difficiles à contrôler.

B) Stade de croissance

Il s'agit de la phase de croissance rapide d'un incendie, où la chaleur de l'allumage est transférée aux composants combustibles à proximité et provoque une augmentation de la taille et de l'intensité de la zone d'incendie, ce qui rend son extinction difficile. Cette étape est un tournant très critique, car il est difficile de contrôler l'incendie sans équipement spécial, et les

risques augmentent en raison de l'émission de gaz toxiques et du danger pour la stabilité des bâtiments structurels.

C) Étape d'allumage complète

À ce stade, le feu atteint son apogée, où tout le combustible disponible est brûlé, et la température atteint son maximum, et peut dépasser 1000°C. La flamme se propage rapidement, couvrant toute la zone, ce qui la rend plus difficile à contrôler. Les structures s'effondrent en raison de matériaux de construction fragiles, comme l'acier qui perd sa résistance à haute température, ou le béton qui peut se fissurer et provoquer un incendie soudain de l'ensemble du bâtiment.

D) Stade de déclin

Le feu commence à s'éteindre par manque de combustible ou d'oxygène et la température baisse, mais les braises parviennent toujours à brûler.

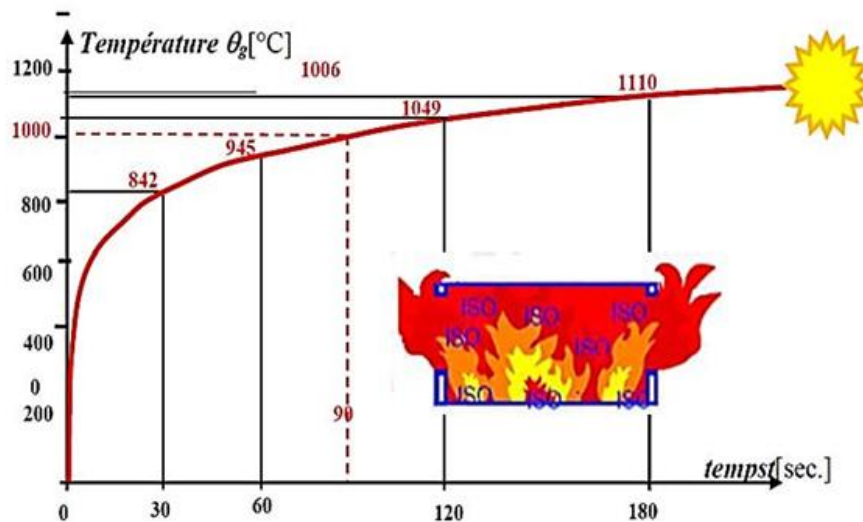


Figure 1-12 Courbe standard ISO 834 [14]

1.7. Protection

En règle générale, les structures en acier sans protection peuvent résister au feu pendant une période de 15 minutes. Cependant, lorsqu'une résistance prolongée est requise, une protection contre l'incendie est nécessaire. Les matériaux de protection passive contre l'incendie qui protègent les structures en acier des effets des températures élevées sont de deux types :

1.7.1. Les matériaux non réactifs

Panneaux résistants au feu

Les panneaux résistants au feu sont utilisés que la protection soit exposée ou dissimulée, et ils offrent une apparence nette et carrée. Les panneaux sont classés en deux grandes catégories. Comme le montre la figure suivante:

- **Panneaux légers** : Ils pèsent entre 150 et 250 kg/m³ et constituent une option économique, ils ont donc tendance à être utilisés dans des situations où l'esthétique n'est pas une préoccupation majeure.

- **Panneaux lourds** : Ils pèsent généralement entre 700 et 950 kg/m³ et sont les meilleurs pour les finitions décoratives car ils ont une apparence plus esthétique [4].



Figure 1-13 Figure Panneaux résistants au feu [16].

1.7.2. Matériaux réactifs

- **Peintures intumescentes**

Ces peintures se composent de trois composants principaux : l'apprêt, la couche de base et le matériau isolant. Le plus critique des trois en ce qui concerne un incendie est la couche de base car elle contient un agent de vapeur qui se décompose sous l'effet de la chaleur pour produire des quantités abondantes de gaz inflammables tels que le dioxyde de carbone, l'ammoniac et la vapeur d'eau. Grâce à cela, le carbone se dilate et se remplit pour former une couche isolante plusieurs fois plus épaisse que la couche d'origine.

Elles sont principalement utilisées sur des bâtiments dont la protection contre l'incendie varie entre 30 et 90 minutes, bien que certaines puissent être obtenues pour assurer une protection pendant 120 minutes. Les peintures intumescentes à couche mince sont les plus courantes dans cette gamme [4].



Figure 1-14 Expansion du revêtement intumescent après l'essai [17].

1.8. Analyse mécanique et modes de ruine

L'Eurocode 3 traite du comportement des poutres cintrées en acier à différentes températures. Les propriétés mécaniques de l'acier, telles que la limite d'élasticité et le module d'élasticité, sont fortement affectées par l'augmentation de la température, ce qui impacte les performances des poutres cintrées. À 20 °C, l'acier est considéré comme étant à son état optimal, où la limite d'élasticité et le module d'élasticité atteignent leurs valeurs maximales. Cependant, lorsque la température atteint 500 °C, la limite d'élasticité commence à diminuer significativement, réduisant la capacité portante de la poutre. À 700 °C, la limite d'élasticité chute à environ 23 % de sa valeur initiale à 20 °C, indiquant une perte significative de la capacité portante de l'élément structurel. Les effets du flambement latéral et de la torsion s'accroissent avec l'augmentation de la température en raison de la diminution de la rigidité et de la résistance[11].

1.8.1. Flambement

Le flambement des poutres cellulaires en acier courbées se produit sous deux formes principales : globale et locale. Le flambement global est causé par des charges de flexion axiale ou de compression et est exacerbé par l'élancement et la courbure de la poutre, ce qui entraîne des contraintes asymétriques qui déséquilibrent la répartition des forces. Il a été étudié par Toprac et al [18]. En revanche, la flexion locale est liée aux parois cellulaires minces, où la flexion augmente les contraintes dans les zones critiques, provoquant un affaissement local. L'interaction de ces phénomènes fragilise progressivement la structure, nécessitant une conception améliorée qui intègre le contrôle de l'élancement, l'épaisseur

adaptative des parois et la gestion de la flexion pour assurer la stabilité et la résistance (voir la Figure (1-16)).



Figure 1-15 Double courbure du montant de l'âme Web-Post [11].

1.8.2. Rupture par Cisaillement

Les structures cellulaires ont une faible résistance au cisaillement. La géométrie courbe peut générer des distributions de contraintes de cisaillement complexes, en particulier dans les réseaux ou au niveau des joints courbes, qui favorisent la fissuration ou le glissement des cellules.

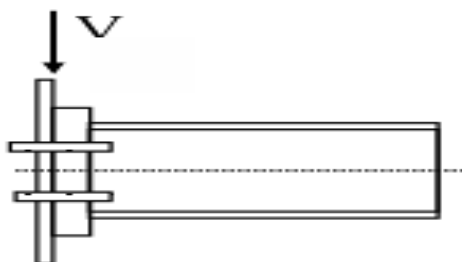


Figure 1-16 Ruine par cisaillement de la section transversale ajourée

1.8.3. Rupture en flexion

La rupture par flexion d'une poutre en acier cellulaire se produit lorsque les contraintes dépassent la résistance du matériau, ce qui entraîne une instabilité. La flexion amplifie les contraintes et les compressions asymétriques, favorisant le flambage et la fissuration dans les zones critiques. De nombreuses études ont été menées pour atténuer ce problème et il a été conclu qu'une conception optimale est essentielle pour assurer la stabilité et l'équilibre des forces [1].



Figure 1-17 poutre cellulaire avec une ruine par flexion [11].

1.8.4. Torsion

La courbure du faisceau cellulaire génère des risques importants liés à sa géométrie et à sa structure cellulaire. Des contraintes inégales sur la face concave peuvent entraîner un flambement global ou local, tandis que les zones de petit rayon concentrent les contraintes, favorisant les fissures et les fractures. La combinaison de la flexion et de la torsion peut déstabiliser la structure comme le montre la figure suivante..[19]

1.9. Synthèse des travaux antérieurs

Barros et al. (2025) étudient par simulation numérique avancée le comportement non linéaire des poutres en acier cellulaires, aussi bien droites que courbes, exposées à des températures ambiantes et en situation d'incendie. Leur analyse prend en compte les imperfections géométriques et les contraintes résiduelles, et met en évidence plusieurs mécanismes de ruine critiques, tels que le flambement latéral-torsionnel, le flambement local de l'âme et le mécanisme de type Vierendeel. Les auteurs montrent les limites des courbes de dimensionnement actuelles prévues par les normes européennes, et proposent une formulation améliorée pour mieux évaluer la résistance des poutres sous sollicitation thermique extrême.

Zaher et al. [7] ont mené une étude expérimentale sur quatre poutres cellulaires cintrées à échelle réelle, afin d'évaluer leur comportement en tant que poutres de toit soumises à une charge verticale concentrée. L'analyse a porté sur l'effet des ouvertures alvéolaires, de l'angle d'inclinaison et du rayon de courbure sur les performances globales. Les résultats ont montré que les formules analytiques établies pour les poutres droites donnent des estimations conservatrices de la résistance au flambement. En complément, un modèle par éléments finis

a été développé, s'avérant fiable pour prédire les charges ultimes et les modes de ruine observés, constituant ainsi un outil pertinent pour les études paramétriques futures.

Ning et al. [21] ont exploré les performances des ponts en arc cellulaire, soulignant leur légèreté et leur résistance, des qualités idéales pour les conceptions modernes. Quatre modèles ont été développés selon une méthode de test orthogonal, puis évalués par essais statiques et simulations numériques sous ABAQUS, avec une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et numériques. L'étude a identifié le rapport hauteur/portée comme le facteur dominant influençant la stabilité au flambement hors plan, suivi des rapports hauteur/épaisseur de l'âme et diamètre/profondeur, contribuant ainsi à une meilleure optimisation de la conception des ponts en arc cellulaire.

Zewudie et al. [20] ont mené une analyse approfondie du comportement non linéaire des poutres cellulaires cintrées à section circulaire en acier, en mettant l'accent sur les performances élastoplastiques, le comportement post-flambage et la résistance au cisaillement. À l'aide d'un modèle numérique avancé sous ABAQUS, intégrant la flexibilité des semelles et de l'âme, l'étude a évalué l'effet du rapport hauteur/portée, de la courbure et des conditions de chargement sur la rigidité et la stabilité globale. Les résultats ont révélé que les méthodes de dimensionnement conventionnelles surestiment la résistance au cisaillement pour les poutres à faible hauteur/portée, soulignant la nécessité de modèles plus adaptés à ce type de configuration.

Pi et al. (2002) [1] ont remis en question la validité de la théorie classique du flambement pour les arcs circulaires peu cintrés soumis à une charge radiale uniforme. En développant une approche énergétique basée sur des équations non linéaires, ils ont démontré que la théorie traditionnelle surestime la charge critique de flambement dans ces cas, tandis qu'elle demeure pertinente pour les arcs à cintrage prononcé.

Da Silva et al. [21] ont étudié le flambement latéral-torsionnel des poutres cellulaires en acier à ouvertures circulaires, en proposant une nouvelle expression pour la constante de torsion. À travers des simulations sous ANSYS, quatre méthodes de calcul de la constante de torsion moyenne pondérée ont été comparées. Les résultats montrent que la méthode basée sur la constante proposée, combinée à une surface équivalente, fournit les prédictions les plus précises. L'étude souligne également que la hauteur de la poutre est le paramètre le plus influent sur le moment critique élastique, apportant une contribution importante à l'optimisation du dimensionnement en l'absence de normes spécifiques.

Rodrigues et al. [22] ont étudié le comportement de poutres métalliques non renforcées comportant des ouvertures ajourées de formes variées. Leur analyse met en évidence que les

poutres avec ouvertures circulaires présentent de meilleures performances en termes de résistance et de stabilité par rapport à celles dotées d'ouvertures carrées ou rectangulaires. Cette étude souligne l'importance de la géométrie des ouvertures dans l'optimisation du compromis entre légèreté et capacité portante dans la conception des poutres en acier.

Chung et al. [23] et **Chung & Lawson [24]** soulignent que les ouvertures d'âme atteignant jusqu'à 75 % de la hauteur de la poutre sont fréquemment requises pour les passages de services. Cependant, ces ouvertures peuvent réduire considérablement la capacité portante des poutres, en fonction de leur forme, taille et position, mettant en évidence la nécessité d'une conception soigneusement optimisée.

El-Dehemy [25] a étudié, à l'aide du logiciel ABAQUS, l'effet des ouvertures rectangulaires dans l'âme des poutres en acier de type IPE sur leur comportement structurel. L'analyse a montré que ces ouvertures entraînent une augmentation notable des déformations et une concentration des contraintes autour des bords. Les flèches ont augmenté de manière significative, en particulier dans les configurations à appuis articulés. Par ailleurs, la comparaison entre les analyses statiques et dynamiques a révélé que les **contraintes** dynamiques peuvent être plus de deux fois supérieures à celles en régime statique, ce qui démontre l'importance cruciale de considérer les effets dynamiques dans le dimensionnement des poutres ajourées.

Abbas, J. [26] a réalisé une étude expérimentale et paramétrique sur l'influence de la forme des ouvertures (circulaires, rectangulaires, hexagonales, etc.) et du rapport hauteur/largeur sur la capacité portante et les déformations des poutres en acier. Les résultats ont montré que les ouvertures circulaires offrent les meilleures performances en termes de résistance et de rigidité, tandis que les ouvertures rectangulaires provoquent des concentrations de contraintes critiques aux coins. Les ouvertures hexagonales présentent un compromis acceptable. L'étude souligne également que l'augmentation de la surface ou du nombre d'ouvertures diminue la capacité portante et accroît la flèche. Les simulations numériques ont confirmé les résultats expérimentaux avec une précision supérieure à 95 %, et il est recommandé d'utiliser des formes douces pour améliorer les performances structurales tout en facilitant le passage des réseaux techniques.

Zewudie et al. [27] ont analysé, à l'aide d'un modèle éléments finis non linéaire sous ABAQUS, le comportement des poutres en acier cintrées alvéolées soumises à une charge répartie. L'étude montre que le rapport hauteur/portée influe fortement sur la rigidité et l'instabilité, avec une configuration optimale identifiée à 0,35. Un rayon de courbure important améliore la résistance des arcs faiblement cintrés mais la réduit pour les arcs

profonds. Les ouvertures dans l'âme diminuent la rigidité et modifient les modes de ruine, tandis que les méthodes de dimensionnement actuelles surestiment la résistance au cisaillement, d'où la nécessité d'une adaptation des approches de calcul.

Befikadu et al. [20] ont étudié le flambement élasto-plastique de poutres arquées en acier comportant des ouvertures circulaires à travers une modélisation par éléments finis non linéaire. Ils montrent que l'augmentation du rapport flèche/travée améliore la résistance au flambement sous charge ponctuelle jusqu'à un certain seuil, mais la dégrade sous charge répartie. La présence d'ouvertures réduit la rigidité et modifie les modes de ruine. De plus, certaines formulations analytiques se sont révélées non conservatrices face aux contraintes de cisaillement dans l'âme, soulignant l'intérêt d'une modélisation numérique fiable pour évaluer correctement la stabilité.

1.10. Conclusion

Les poutres métalliques curvilignes à ouvertures d'âme offrent une solution innovante alliant légèreté, optimisation des matériaux et intégration technique. Elles permettent une réduction du poids propre et une meilleure répartition des contraintes, mais nécessitent une analyse approfondie en raison des effets de torsion et de flambement. L'utilisation de simulations et d'essais est essentielle pour garantir leur fiabilité. Ces structures présentent un fort potentiel dans l'ingénierie moderne, notamment pour les ouvrages architecturaux et industriels.

**CHAPITRE 2 APPROCHE
REGLEMENTAIRE DES
POUTRES METALLIQUES
COURBES PLEINES ET A
OUVERTURES D'AMES**

2.1. Introduction

La conception de poutres en acier à âme ouverte présente des défis importants en raison de leur comportement non linéaire et de leur sensibilité à la déformation, notamment sous de fortes charges ou à des températures élevées. Ces structures sont sujettes à des défaillances prématurées, telles que le flambement, le recuit localisé ou la perte de stabilité, ce qui affecte négativement leur capacité portante. Ces risques sont exacerbés par le faible module d'élasticité de l'acier à haute température et les erreurs de conception.

Pour répondre à ces problèmes, une approche d'analyse rigoureuse est proposée, conformément à l'Eurocode EC-3. L'étude examine le comportement des poutres sous charges ambiantes, en évaluant les contraintes locales, les moments internes et la capacité de retrait, ainsi que dans des conditions thermiques extrêmes, en tenant compte des effets thermomécaniques.

Cette approche nécessite une modélisation intégrée prenant en compte les interactions entre les ouvertures, les déformations géométriques, les charges thermiques et les charges mécaniques afin de prévenir les défaillances inattendues. Objectif : Étudier l'effet des températures élevées sur les propriétés thermiques et mécaniques. Ces différentes propriétés thermiques et mécaniques sont définies conformément à la partie 1-2 de l'Eurocode 3 [3].

2.2. Classification et Normes de conception de résistance au feu

Cette étude aborde les défis liés à la conception des poutres en acier cintrées à âme ajourée, qui se caractérisent par un comportement mécanique non linéaire et sont sujettes à des défaillances précoces, telles que le flambement local ou la perte de stabilité structurelle, en particulier sous l'effet combiné des sollicitations thermiques et mécaniques. Cela inclut la capacité de la poutre en acier à assurer sa **résistance structurelle**, c'est-à-dire à supporter les charges sans s'effondrer en cas d'incendie, ainsi que son **étanchéité** face à la propagation des flammes et des fumées, en empêchant l'infiltration du feu et des gaz chauds. Quant à l'**isolation thermique**, elle consiste à limiter le transfert de chaleur vers la face non exposée au feu. Ces critères sont utilisés pour évaluer l'efficacité des poutres face à l'incendie et garantir la sécurité structurelle des bâtiments. La méthodologie de conception s'appuie sur l'application de normes internationales spécifiques, telles que les spécifications de

l'Eurocode EC3 partie 1-2, ainsi que sur les recommandations du Centre technique industriel de la construction (CTICM) dans l'annexe technique N et les directives du Steel Construction Institute (SCI) contenues dans son manuel de référence P355.

2.3. Propriétés du matériau

2.3.1. Propriétés thermiques

- Chaleur spécifique

La capacité thermique spécifique de l'acier (C_a) est définie comme l'énergie thermique nécessaire pour élever la température d'un kilogramme d'acier d'un degré Kelvin. Selon l'Eurocode 3 Partie 1-2[28], cette valeur n'est pas constante et varie avec la température, augmentant avec la température. Elle est décrite par des équations et des courbes mathématiques (comme le montre la figure suivante). Ces données contribuent à comprendre le comportement de l'acier lors des fluctuations thermiques, notamment sa capacité à absorber ou à dissiper la chaleur, ce qui en fait un facteur essentiel dans l'analyse des performances des structures structurelles lorsqu'elles sont exposées à des conditions difficiles telles que le feu. Cette analyse permet de déterminer la résistance du matériau à la chaleur et de maintenir l'intégrité structurelle, soulignant l'importance de cette propriété dans les conceptions techniques qui visent à assurer la stabilité thermique et la durabilité structurelle dans des conditions d'urgence.

D'après l'Eurocode 3:

$$C_a = 2.22 \times 10^{-6} \times \theta_a^3 - 1.69 \times 10^{-3} \times \theta_a^2 + 7.73 \times 10^{-1} \times \theta_a + 425 \quad \text{si : } \theta_a \leq 600^\circ\text{C} \dots\dots\dots(1)$$

$$C_a = 626 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad \text{si : } 600^\circ\text{C} < \theta_a \leq 735^\circ\text{C} \dots(2)$$

$$C_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad \text{si : } 735^\circ\text{C} < \theta_a \leq 900^\circ\text{C} \dots\dots(3)$$

$$C_a = 650 \text{ J Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad \text{si : } 900^\circ\text{C} > \theta_a \dots\dots\dots(4)$$

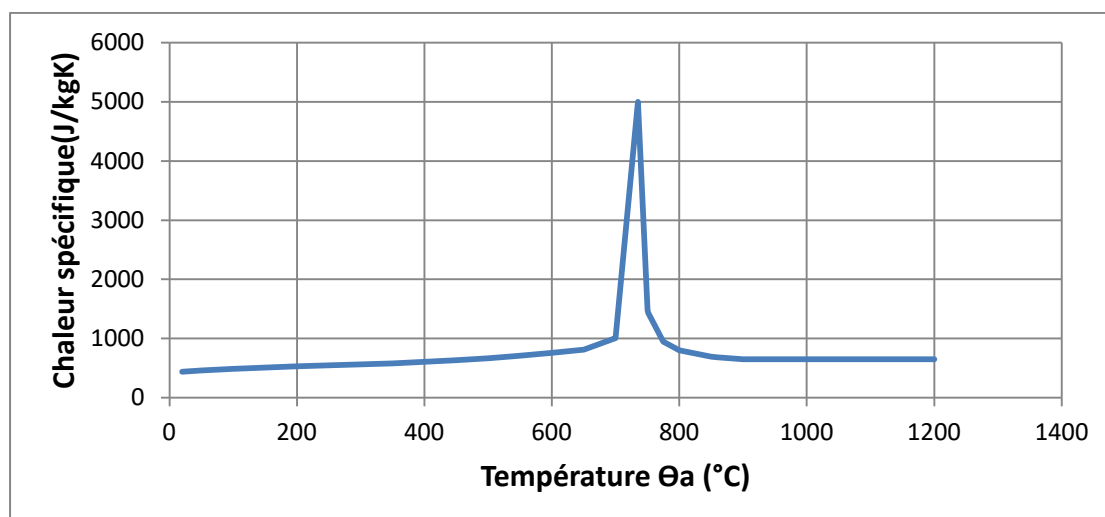


Figure 2-1 Chaleur spécifique de l'acier en fonction de la température

- **Conductivité thermique**

La conductivité thermique de l'acier (λ) est déterminée selon l'Eurocode 3 Partie 1-2 [3] et représente la capacité de l'acier à transmettre la chaleur à travers une épaisseur d'un mètre à une différence de température d'un Kelvin, et est mesurée en ($W/m \cdot K$). Cette valeur ne reste pas constante, mais dépend de la température de l'acier (θ_a), qui est généralement décrite par une courbe (comme indiqué sur la figure de référence). Ces données sont utilisées pour analyser l'efficacité du transfert de chaleur à travers les éléments structurels, en particulier dans des conditions extrêmes telles que les incendies, aidant les ingénieurs à concevoir des systèmes de protection thermique efficaces (tels que l'isolation ou les revêtements résistants au feu) et à optimiser les performances des structures pour garantir qu'elles peuvent résister à des températures élevées sans perdre en résistance ou en stabilité. La conductivité thermique de l'acier λ_a est déterminée selon l'Eurocode 3 partie 1-2 [3] à partir des éléments suivants :

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-3} \times \theta_a \quad \text{si } : \theta_a \leq 800^\circ\text{C} \dots \dots \dots (5)$$

$$\lambda_a = 27.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad \text{si } : \theta_a > 800^\circ\text{C} \dots \dots \dots (6)$$

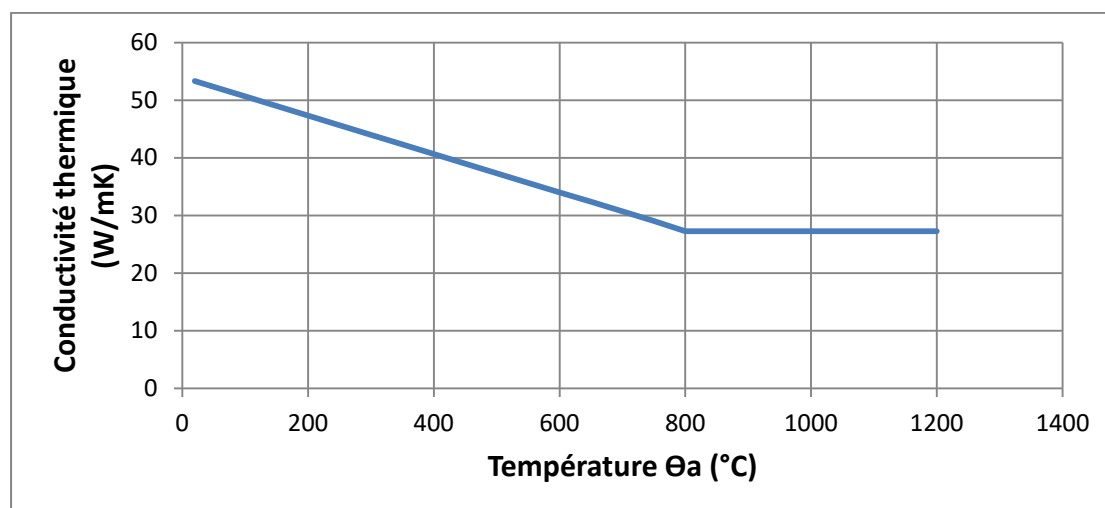


Figure 2-2 Conductivité thermique de l'acier en fonction de la température

- **Dilatation thermique :**

La dilatation thermique de l'acier ($\Delta l/l$) est l'augmentation relative de la longueur à mesure que la température augmente et est calculée via des équations d'allongement thermique liées à des plages de température spécifiques conformément à l'Eurocode 3 Partie 1-2 [3]. Le coefficient de dilatation n'est pas donné directement dans la spécification, mais est dérivé de ces équations qui reflètent le comportement de l'acier sous contrainte thermique. Ces données sont utilisées pour estimer les déformations thermiques (dilatation/contraction) des structures, notamment lors d'incendies ou de chargements dynamiques. Comprendre la dilatation thermique est essentiel pour garantir l'intégrité structurelle et éviter les effondrements dans des conditions extrêmes.

L'allongement thermique est déterminé comme suit :

$$\frac{\Delta l}{l} = 0.4 \times 10^{-8} \times \theta_a^2 + 1.2 \times 10^{-5} - 2.416 \times 10^{-4} \quad \text{si : } \theta_a \leq 650^\circ\text{C} \dots\dots(7)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 1.1 \times 10^{-2} \quad \text{si : } 650^\circ\text{C} < \theta_a \leq 860^\circ\text{C} \dots\dots(8)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 2 \times 10^{-5} \times \theta_a + 6.2 \times 10^{-3} \quad \text{si : } \theta_a > 860^\circ\text{C} \dots\dots(9)$$

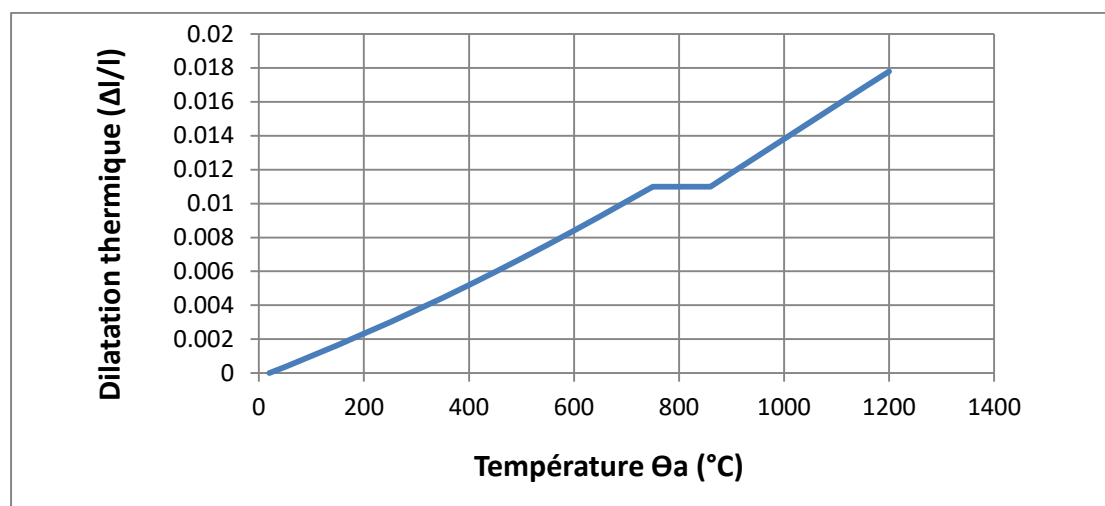


Figure 2-3 Dilatation thermique relative de l'acier en fonction de la température

2.3.2. Propriétés mécaniques de l'acier

Les températures élevées entraînent une détérioration significative des propriétés mécaniques de l'acier, qui perd environ la moitié de sa résistance à 600°C, selon l'Eurocode 3 Partie 1-2 [3], avec une baisse de ses propriétés de base telles que la limite d'élasticité et le module d'élasticité. Alors que l'acier formé à chaud conserve sa résistance jusqu'à 400 °C, l'acier formé à froid commence à perdre sa résistance à partir de 100 °C. Les facteurs de réduction adoptés dans les spécifications aident à identifier les changements thermiques et à guider la sélection de matériaux appropriés pour la conception de structures résistantes à la chaleur, telles que celles utilisées dans les installations critiques ou les environnements à haut risque. Cette compréhension est essentielle pour garantir la durabilité et la sécurité des structures, en particulier lorsqu'elles sont exposées à des conditions telles que les incendies.

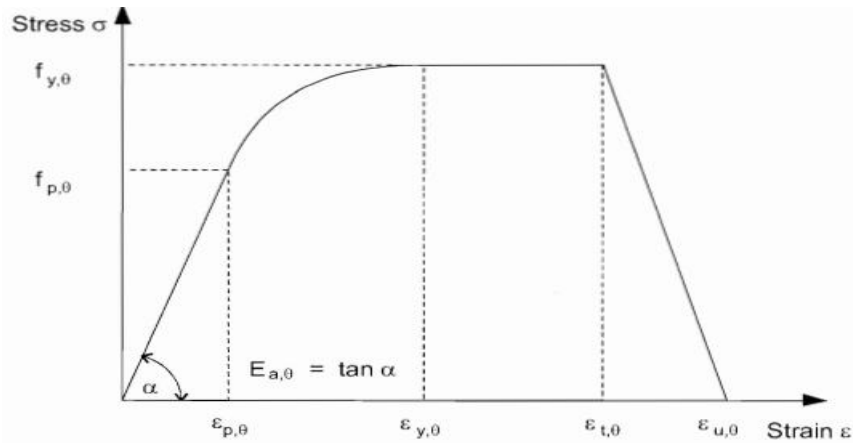


Figure 2-4 Diagramme de Relation contrainte-déformation de l'acier à des températures élevées [28]

Plage de déformation	Contrainte σ	Module tangent
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon \cdot E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} + c + (b/a) \cdot [a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon) / [a \cdot \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2}]$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0
$\varepsilon_{u,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{l,\theta}$	$f_{y,\theta} \cdot [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{u,\theta}) / (\varepsilon_{l,\theta} - \varepsilon_{u,\theta})]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{l,\theta}$	0,00	-

Figure 2-5 Relations contrainte-déformation en fonction de la température [28]

Avec :

- $\varepsilon_{p,\theta}$ déformation à la limite proportionnelle;
- $\varepsilon_{y,\theta}$ limite d'élasticité;
- $\varepsilon_{t,\theta}$ déformation limite pour la limite d'élasticité ;
- $\varepsilon_{u,\theta}$ Déformation limite

Tableau 2-1 Facteurs de réduction [28]

θ_a [°C]	<i>Facteur de réduction à température par rapport au valeur f_y, E_a à 20°C</i>		
	<i>Reduction factor for effective yield strength</i> $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	<i>Reduction factor for proportional limit</i> $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	<i>Reduction factor for the slope of the linear elastic range</i> $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20	1.000	1.000	1.000
100	1.000	1.000	1.000
200	1.000	0.807	0.900
300	1.000	0.613	0.800
400	1.000	0.420	0.700
500	0.780	0.360	0.600
600	0.470	0.180	0.310
700	0.230	0.075	0.130
800	0.110	0.050	0.090
900	0.060	0.0375	0.0675
1000	0.040	0.0250	0.0450
1100	0.020	0.0125	0.0225
1200	0.000	0.000	0.000

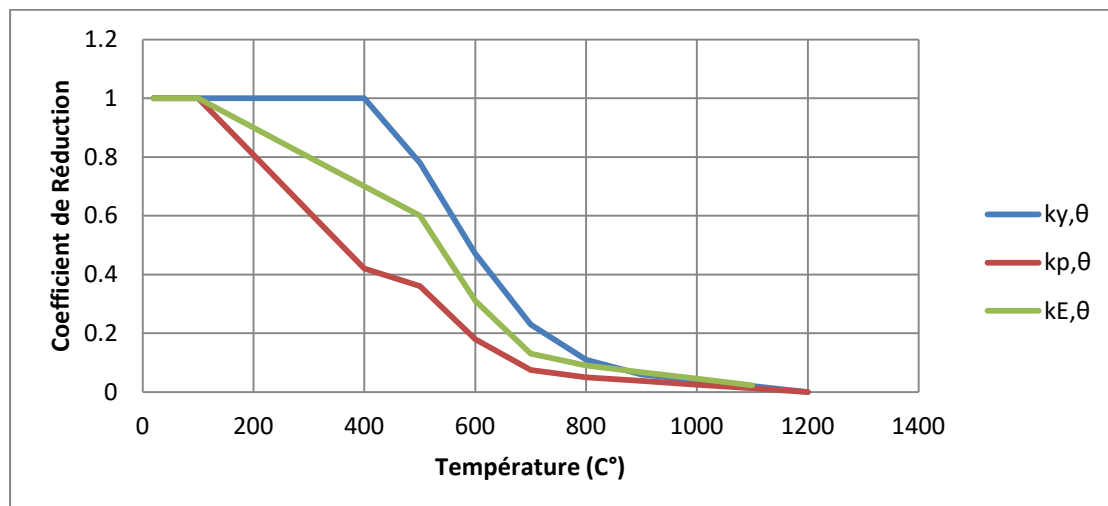


Figure 2-6 Coefficient de réduction de l'acier aux températures élevées

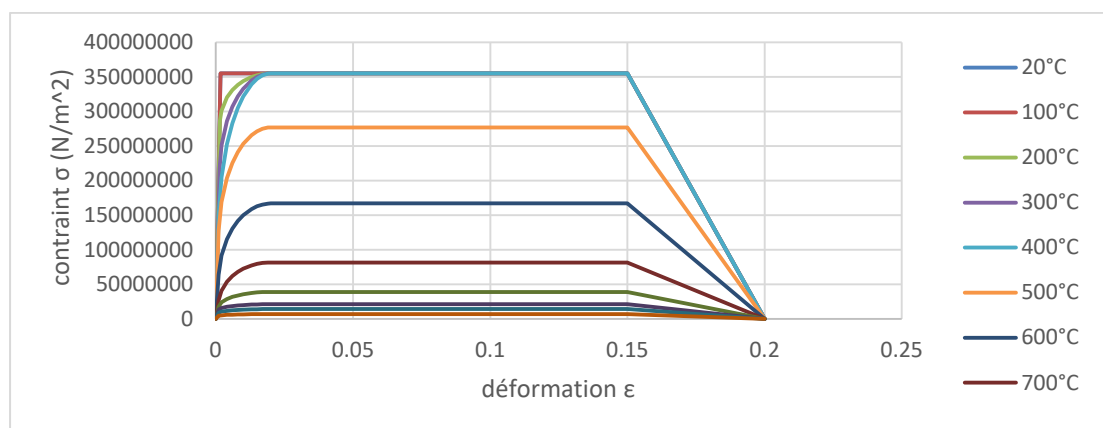


Figure 2-7 Relation contrainte-déformation pour l'acier S355 à des températures élevées

2.3.3. Protection

En raison de la faible résistance thermique des poutres en acier cintrées exposées à des températures élevées, elles sont recouvertes d'une couche d'isolation thermique afin de réduire l'effet de la chaleur. Cette couche agit comme une barrière qui ralentit le transfert de chaleur vers l'acier, contribuant ainsi à protéger ses propriétés mécaniques importantes, telles que la limite d'élasticité et la résistance à la traction, et prévenant ou réduisant les déformations susceptibles de se produire en cas d'incendie ou de températures élevées. Ainsi, les poutres restent solides et stables plus longtemps, améliorant ainsi leur sécurité et leur efficacité lors de la conception technique. L'isolant ajouté dans notre étude est du béton, placé sur la structure de la poutre. Son épaisseur est $((b/2)-(tw/2))$, et nous avons utilisé le SOLID70, qui possède une conductivité thermique tridimensionnelle. Cet élément contient huit nœuds, chacun ayant une température unique. Cet élément est utilisé dans l'analyse thermique tridimensionnelle, en régime permanent comme en régime transitoire. Il peut également compenser le flux de chaleur résultant du transfert de masse dans un champ de vitesse constante. Les propriétés du béton sont les suivantes.

Propriétés mécaniques de béton ordinaire:

Densité = 2300 kg/m³

Chaleur spécifique $C_p = 1000$

Conductivité thermique $\lambda_p = 1.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

2.4. Modèle de conception

Les poutres courbes sont généralement conçues sous la forme d'un arc circulaire (ou d'une portion de cercle) pour simplifier l'analyse géométrique. Trois paramètres clés sont définis :

- **Le rayon de courbure (R)** : distance entre le centre du cercle et l'axe neutre de la poutre (l'axe qui ne subit ni tension ni compression).
- **L'angle central total ($2\alpha_{\max}$)**: angle couvert par l'arc complet de la poutre, mesuré depuis le centre du cercle, où α_{\max} représente la moitié de cet angle.
- **La portée horizontale (L)** : distance horizontale entre les appuis (longueur effective de la poutre), liée au rayon de courbure et à l'angle central par la relation :

$$L=2R\sin (\alpha_{\max})$$

Ces paramètres permettent de décrire la géométrie de la poutre et de calculer les efforts internes (moments, efforts tranchants, etc.) en fonction de la position des sections courbes.

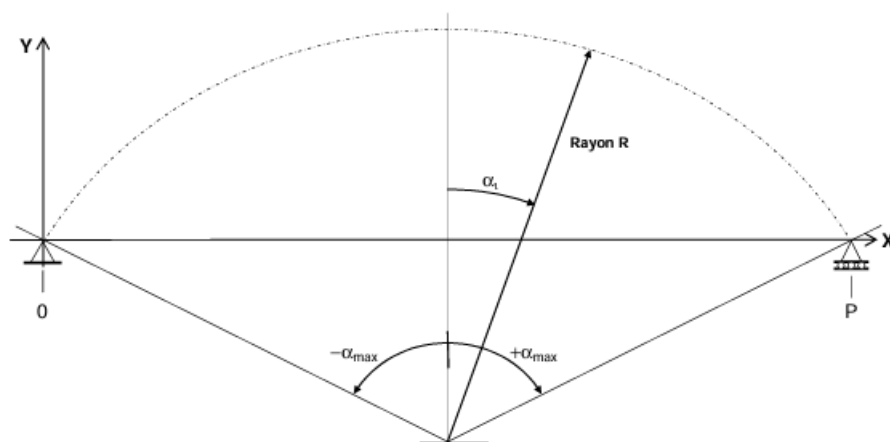


Figure 2-8 Repérage d'une section de poutre courbe

On en déduit les réactions d'appui verticales :

$$R_G = R_D = q \frac{L}{2}$$

Dans une section d'abscisse curviligne s_i , l'effort tranchant, l'effort normal et le moment fléchissant sont calculés comme ci-dessous :

$$V = [s_i - 0,5 L] q \cos \alpha$$

$$N = q \left(\frac{L}{2} - s_i \right) \sin \alpha_i$$

$$M = q \{ -0,5 L (1 - x_f) P + R s_i (\sin((\alpha + \alpha_{\max}) / 2) - \sin \alpha) \}$$

Avec :

$s_i = R(\alpha_{\max} - \alpha)$: abscisse curviligne de la section.

2.5. Résistance au droit d'une ouverture - Effet Vierendeel

Lorsqu'il y a une ouverture dans la poutre (comme une fenêtre ou une ouverture artificielle), elle perturbe la manière naturelle dont les forces de cisaillement sont transmises à travers la section, perturbant ainsi l'équilibre des forces internes. C'est ici qu'intervient le moment de Verendell, où le moment de flexion à l'ouverture est transformé en une force normale dans le cadre de la poutre. Cette force, en conjonction avec la force de cisaillement, induit une compression et une flexion locales dans les parties de la poutre adjacentes à l'ouverture, qui peuvent se transformer en une fissure oblique avec un angle d'environ 20 à 25° dans la plupart des cas. La méthode analytique décrite ici est basée sur celle appliquée dans le logiciel ACB+. Lorsqu'il y a une ouverture, les forces agissantes (force axiale (N_{Ed}), force de cisaillement (V_{Ed}) et moment de flexion (M_{Ed})) sont réparties entre la membrure supérieure et la membrure inférieure de la poutre comme suit [29]:

pour la membrure inférieure,

$$N_{m,Ed,sup} = N_{Ed} \frac{A_{0.inf}}{A_{.inf} + A_{.sup}} - \frac{M_{ED}}{Z_{g.sup} + a_0 + Z_{g.inf}} \dots \dots \dots (10)$$

$$V_{m,Ed,inf} = V_{Ed} \frac{A_{v..inf}}{A_{v.o.inf} + A_{v.0.sup}} \dots \dots \dots (11)$$

pour la membrure supérieure,

$$N_{m,Ed,sup} = N_{Ed} \frac{A_{.sup}}{A_{.inf} + A_{.sup}} + \frac{M_{ED}}{Z_{g.sup} + a_0 + Z_{g.inf}} \dots \dots \dots (12)$$

$$V_{m,Ed,sup} = N_{Ed} \frac{A_{v.sup}}{A_{v.inf} + A_{v.sup}} \dots \dots \dots (13)$$

avec :

- $\eta = 1 / (9,48 - 4,84 \alpha)$
- A, Av et Zg sont les caractéristiques des sections d'une membrure pour un angle d'inclinaison de 0°.
- A : aire de la section.
- Av : aire de cisaillement.
- ZG : position du centre de gravité.
- IY : moment d'inertie de flexion.

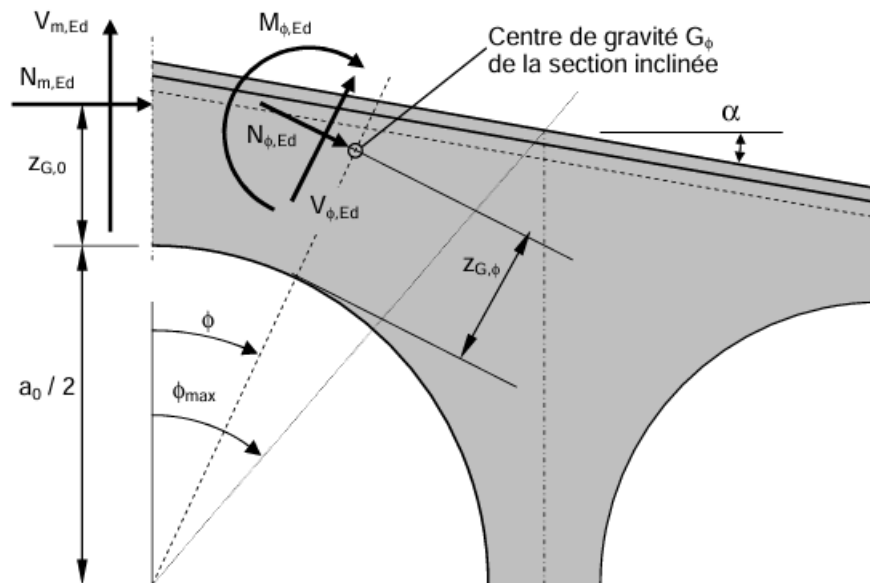


Figure 2-9 section inclinée d'un angle ϕ [29]

La résistance de chaque section inclinée d'un angle ϕ est vérifiée en faisant varier cet angle de $-\phi_{\max}$ à $+\phi_{\max}$ d'un incrément de 1° .

$$\phi_{\max} = \tan^{-1} \left(\frac{a_0 + w}{2 \cdot hm} \right) \dots \dots \dots (14)$$

La hauteur des poutres à hauteur variable h_ϕ pour la section en T inclinée d'un angle ϕ par rapport à la section verticale est la suivante :

$$h_\phi = \frac{Ht}{4 \cos \phi} \left(1 + \frac{\cos(\phi - \alpha)}{\cos(\phi + \alpha)} \right) - \frac{a_0}{2} \dots \dots \dots (15)$$

- a- α est l'angle de la semelle par rapport à l'horizontale ;
- ϕ est l'angle d'inclinaison de la section par rapport à la section droite ;
- H_t est la hauteur de la section au droit de l'ouverture.

L'épaisseur de la semelle à considérer dans le calcul des caractéristiques de la section inclinée est : $tf / \cos(\alpha + \phi)$.

2.6. Résistance au cisaillement du montant

Les calculs ACB+ ont montré que les poutres courbées avaient une épaisseur d'âme suffisante pour éviter l'instabilité de l'âme en position verticale (flexion), leur permettant d'atteindre le stade de ramollissement par cisaillement horizontal, vérifiant ainsi le critère de résistance comme critère de ramollissement.

$$\Gamma_{vh} = \frac{Vh:ed}{Vh:rd} \dots \dots \dots (16)$$

Avec : $V_{h,rd} = \frac{(w-tr)tw.fy}{\sqrt{3}\gamma mo}$

La force de cisaillement horizontale $V_{h,Ed}$ est calculée comme la différence entre les forces axiales agissant de chaque côté de la colonne, c'est-à-dire entre les côtés gauche et droit.

La valeur supérieure aux critères calculés est conservée pour le haut et le bas de la colonne.

Il convient de noter que la méthode de calcul de la force de cisaillement horizontale diffère de la méthode de calcul des forces de flambement. Dans le cas du flambement, on adopte une section horizontale équivalente qui prend en compte le changement du moment d'inertie (lorsqu'il s'agit d'une poutre à propriétés variables), tandis que dans le calcul de l'effort de cisaillement horizontal, cette approximation n'est pas utilisée, car elle est inutile. En conséquence, nous obtenons des forces axiales légèrement différentes aux sections i et $i+1$ dans les deux cas, mais cette différence est très faible et n'affecte pas significativement les résultats.

2.7. Action Thermique

Pour calculer la température des sections d'acier non protégées lors d'un incendie, une équation mathématique est utilisée qui montre l'augmentation de la température de la section sur des périodes de temps spécifiques en raison de son absorption de chaleur. Cette équation est basée sur l'hypothèse que la distribution de chaleur est uniforme sur toute la section transversale de l'élément en acier [3].

$$\Delta\theta_{a,t} = K_{sh} \frac{Am/V}{c_a \cdot \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad \dots\dots\dots(17)$$

Où :

- 2 K_{sh} est le facteur de correction pour l'effet d'ombre,
- 3 Am/V est le facteur de section pour les éléments en acier non protégés [m^{-1}]
- 4 Am est la surface de l'élément par unité de longueur [m^2/m]
- 5 V est le volume de l'élément par unité de longueur [m^3/m]
- 6 c_a est la chaleur spécifique de l'acier, de la section 3 [J/kgK]
- 7 $\dot{h}_{net,d}$ est la valeur de conception du flux de chaleur net par unité de surface [W/m^2]
- 8 Δt est l'intervalle de temps [secondes]
- 9 ρ_a est la masse unitaire de l'acier, de la section 3 [kg/m^3]

Pour calculer la température des sections d'acier protégées lors d'un incendie, on utilise l'équation mathématique suivante.

$$\Delta T_a = \frac{\frac{\lambda p}{d p}}{Ca \rho a} \frac{Ap}{V} \left(\frac{1}{1+\Phi/3} \right) (T_f - T_a) \Delta t - (e^{\Phi/10} - 1) \Delta T_f \dots \dots \dots (18)$$

Avec :

Ca : Chaleur spécifique de l'acier [J/kg K]

ρa : La masse volumique de l'acier [kg/m³].

Δt : Intervalle de temps [secondes]. Selon l'EC3, $\Delta t \leq 5$ s.

K_{sh} : est un paramètre de correction pour l'effet d'ombre et est défini à l'unité afin d'obtenir des résultats conservateurs. Dans des conditions d'incendie, l'équation pour la section I est fournie par[3] :

$$K_{sh} = 0,9 \frac{\left[\frac{A_m}{V} \right]_b}{\left[\frac{A_m}{V} \right]} \dots \dots \dots (19)$$

$[A_m/v]_b$: Indique la valeur de la boîte (BOX) du facteur de section.

$[A_m/V]$: est le facteur de section pour les éléments en acier non protégés.

Paramétriques	Model 1 (avec ouvert 3cot)	Model 2(avec ouvr 4cot)	Model 3(solide 3cot)	Model 4(solide 4cot)
Aire (m ²)	0.0155	0.0155	0.0131	0.0131
Périmètre (m)	2.014	2.014	1.672	1.672
Am/v	0.1218	0.1218	0.1317	0.12913
(Am /v)b	0.1591	0.1591	0.0910	0.1080
Ksh	1	1	0.6218	0.7325

Figure 2-10 Paramètres de section pour différents modèles de poutres

2.7.1. Facteur de massivité

Le facteur de section pour les poutres cellulaires est défini selon la norme européenne EC03 Partie 1-13 [30], sous l'hypothèse d'un échauffement uniforme de la température à travers la section en acier, selon la relation suivante :

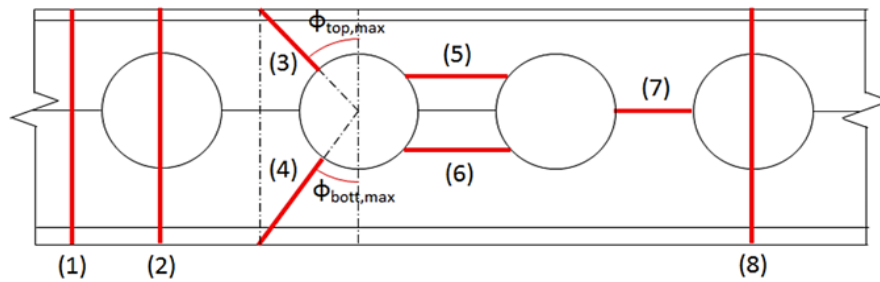


Figure 2-11 Sections affectées par les modes de défaillance potentiels d'un boîtier cellulaire [29].

Le flux de chaleur net dépend de deux principaux mécanismes de transfert d'énergie thermique : le rayonnement thermique et la convection thermique. Ce débit est calculé selon l'équation suivante [3]:

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,r} + \dot{h}_{net,c} \dots\dots\dots(20)$$

(a) Flux de chaleur par rayonnement

$$\dot{h}_{net,r} = 5,67 \times 10^{-8} \cdot 8 \cdot \Phi \cdot \epsilon_m \cdot \epsilon_f [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \dots\dots\dots(21)$$

(b) Flux de chaleur par convection

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \dots\dots\dots(22)$$

Et :

$5,67 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴]: la constante Stephan-Boltzmann.

$\epsilon_m = 0,7$: émissivité de la surface de l'élément qui dépend du type de matériau.

$\epsilon_f = 1$: émissivité du compartiment feu.

$\Phi = 1$: facteur de configuration qui dans beaucoup de cas et la valeur plus précise (EC1-1.2 Annexe G).

θ_g : température de l'environnement (gaz) [°C].

θ : température de la surface de l'élément [°C].

$\alpha_c = 25$ [W/m²K] : Coefficient de transfert thermique par convection.

La période critique commence lorsque la température de l'élément en acier ($\theta_{a,t}$) atteint la température critique ($\theta_{a,cr}$). Ce degré critique ($\theta_{a,cr}$) est déterminé à l'instant (t) en fonction du facteur d'utilisation (μ_0) de l'élément structurel, selon la relation :

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right) + 438 \dots\dots\dots(23)$$

Avec :

μ_0 : est le taux d'utilisation au temps $t = 0$, obtenu au moyen du :

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \Rightarrow \mu_0 = \eta_{fi} \dots \dots \dots (24)$$

η_{fi} : le facteur de réduction du niveau de chargement de calcul en situation d'incendie.

- Nous étudions actuellement l'exposition d'une poutre en acier courbée au feu sur trois ou quatre côtés, comme le montrent les images suivantes :

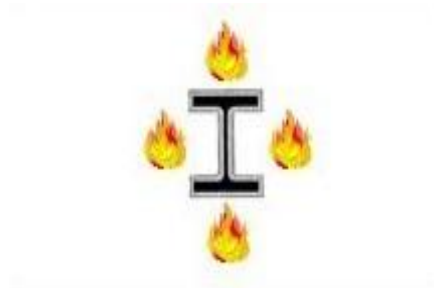


Figure 2-12 Poutre en acier courbée exposée au feu sur quatre côtés



Figure 2-13 Poutre en acier courbée exposée au feu sur trois côtés

La figure ci-dessous illustre l'évolution de la température d'un élément de structure en acier courbé au fil du temps.

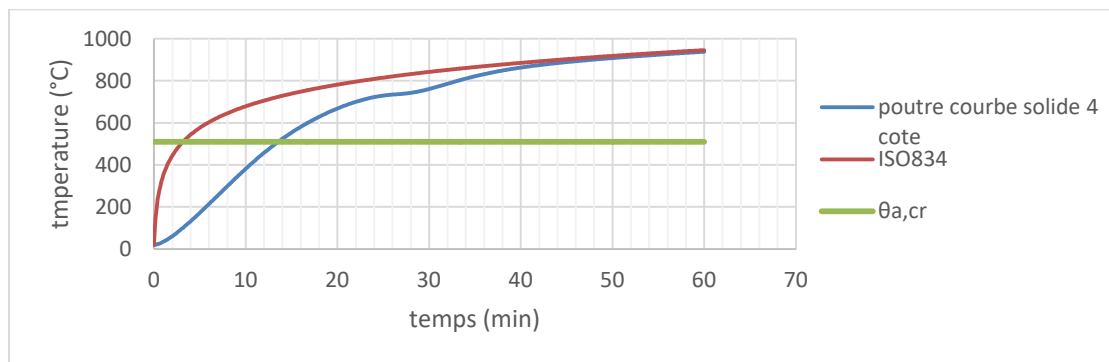


Figure 2-14 Évolution de la température en fonction du temps pour une poutre courbe solide exposé à quatre directions de feu

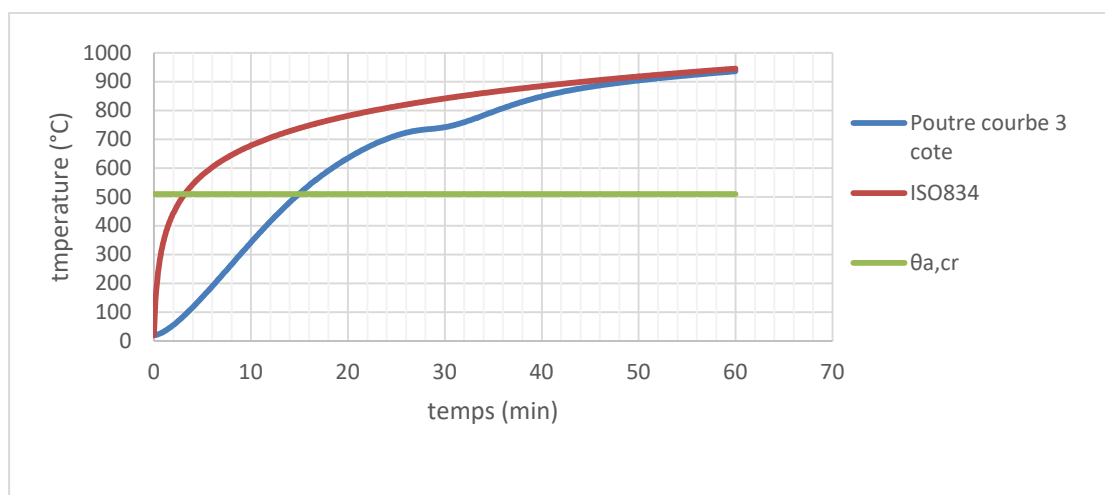


Figure 2-15 Évolution de la température en fonction du temps pour une poutre courbe solide exposé à trois directions de feu

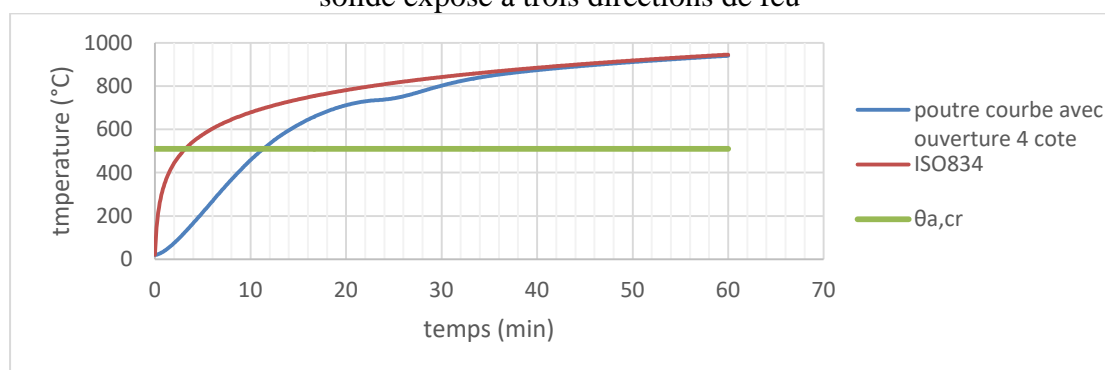


Figure 2-16 Évolution de la température en fonction du temps pour une poutre courbe avec ouverture exposé à quatre directions de feu

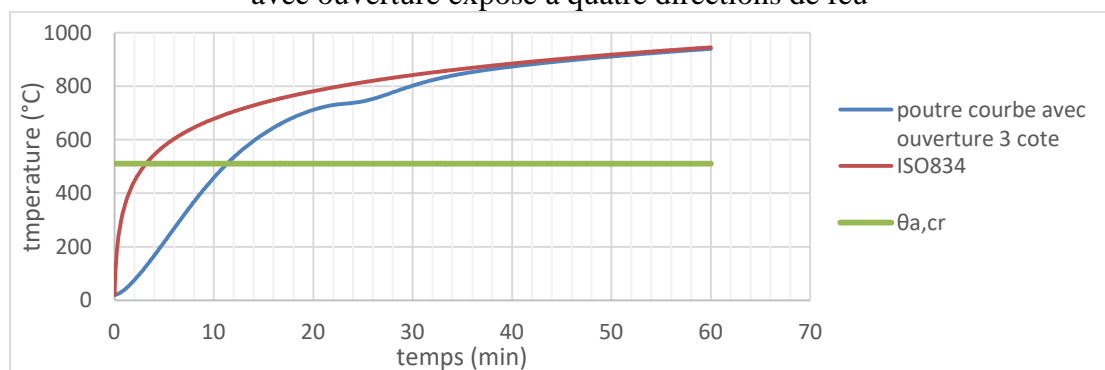


Figure 2-17 Évolution de la température en fonction du temps pour une poutre courbe avec ouverture exposé à trois directions de feu

2.8. Vérification de la résistance mécanique

La norme européenne EC03 Partie 1-2 [3] propose une méthodologie simplifiée pour vérifier la résistance au feu des éléments en acier, similaire à celle utilisée dans des conditions naturelles, prenant en compte la diminution des propriétés mécaniques de l'acier sous l'influence des températures élevées. Cette méthode est basée sur

l'ajustement des valeurs de limite d'élasticité (f_y, θ) et de module d'élasticité (E_a, θ) de l'acier à une température (θ_a), selon les relations données au chapitre I.6.1 de la norme.

Pour l'évaluation des sections transversales, les mêmes principes de conception sont utilisés à température normale, mais avec l'application d'un facteur de réduction spécifique aux conditions d'incendie.

$$\varepsilon_{fi} = 0.85 \left[\frac{235}{f_y} \right]^{0.5} \dots\dots\dots(25)$$

Lors de l'application de la clause aux conditions d'incendie, le facteur de réduction de la déflexion (χ) doit être remplacé par le facteur de réduction de la résistance au feu modifié (χ_{fi}) conformément à la norme européenne EN 1993-1-2

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \dots\dots\dots(26)$$

Avec :

$$\phi_{\theta} = \frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2]$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{e,\theta}}}$$

Les forces internes et les moments de conception sous feu, sont déterminés en effectuant une analyse structurelle complète de la structure, puis en recalculant leurs valeurs à température ambiante en utilisant les relations et les équations données dans la référence[3].

$$E_{fi,Ed} = \eta_{fi} \cdot E_{Ed} \dots\dots\dots(27)$$

E_{Ed} : la valeur de calcul de la force ou du moment propre au dimensionnement à température ambiante 20°C.

η_{fi} : le facteur de réduction du niveau de chargement de calcul en situation d'incendie.

$$\eta_{fi} = \frac{Gk + \psi_{1,1} Qk_{1,1}}{\gamma_g Gk + \gamma_{q,1} Qk_{1,1}} \dots\dots\dots(28)$$

Pour simplifier les calculs dans les bâtiments métalliques standard, la valeur du facteur de réduction du feu $\eta_{fi} = 0,65$ selon[3] .

2.9. Cas de poutres à plusieurs ouvertures

Le logiciel ACB+ (ArcelorMittal Castellated Beams Plus) qui est un outil gratuit conçu pour la conception et l'optimisation des poutres cellulaires en acier à plusieurs ouvertures, développé par le CTICM pour le compte d'ArcelorMittal, permet de déterminer les dimensions optimales des ouvertures (forme, diamètre, espacement) tout en assurant la conformité aux normes de sécurité et de performance, telles que l'Eurocode 3. ACB+ prend en compte les effets thermiques, y compris les situations d'incendie, et est particulièrement adapté aux poutres isostatiques reposant sur deux appuis simples, avec ou sans dalle de béton collaborant. Il constitue un outil précieux pour les ingénieurs souhaitant concevoir des structures en acier efficaces et conformes aux normes européennes.

2.10. Conclusion

L'étude analytique a été menée sur des poutres solides et poutres avec ouvertures exposées à des températures élevées. Ces températures entraînent une détérioration significative des propriétés mécaniques de l'acier (limite d'élasticité et module d'élasticité, par exemple), augmentant le risque de flambement ou de défaillance structurelle. La méthodologie s'est appuyée sur une modélisation intégrée des interactions entre déformations, ouvertures et charges thermiques, conformément à l'Eurocode 3, avec l'utilisation de couches isolantes (par exemple, une couche de protection en béton) pour ralentir le transfert de chaleur. La résistance des ponts a été testée en analysant les contraintes locales et les effets Verendel autour des ouvertures, afin d'optimiser la conception et de garantir l'intégrité structurelle dans des conditions extrêmes.

**CHAPITRE 3 SIMULATION
NUMERIQUE ET ANALYSE
THERMIQUE D'UNE POUTRE
COURBE**

3.1. Introduction

L'étude du comportement thermique des poutres cintrées en acier est importante en génie civil en raison de son impact direct sur les performances structurelles. Ces poutres se caractérisent par une répartition thermique inégale due à leur courbure, ce qui entraîne des variations de température sur la section transversale et, par conséquent, des contraintes thermiques internes pouvant affecter la stabilité de la poutre.

Lorsque les poutres cintrées en acier sont exposées à des températures élevées, comme lors d'un incendie, leurs propriétés mécaniques, telles que la résistance à la traction et la rigidité, diminuent, augmentant le risque de déformation permanente ou de perte de stabilité structurelle. De plus, une dilatation thermique inégale peut générer des forces internes affectant les points de connexion et les supports, ce qui nécessite une conception rigoureuse prenant en compte ces facteurs.

Par conséquent, l'analyse du comportement thermique des poutres cintrées en acier est un élément essentiel du processus de conception et nécessite l'utilisation de modèles d'analyse thermique avancés prenant en compte la répartition thermique et ses effets sur les performances structurelles de l'élément.

3.2. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) est une technique numérique permettant de transformer des systèmes complexes, décrits par des équations aux dérivées partielles ou intégrales, en un ensemble de petits éléments interconnectés, plus faciles à analyser mathématiquement. Dans les domaines de l'ingénierie, cette méthode est utilisée pour partitionner un domaine géométrique (tel qu'une structure ou un matériau) en un maillage d'éléments finis, transformant le problème physique complexe en un système d'équations algébriques linéaires qui peuvent être résolues à l'aide d'ordinateurs. Cette approche permet de modéliser des systèmes aux comportements non linéaires ou imprévisibles, tels que de grandes déformations ou des interactions multiphysiques, avec une grande précision, contribuant ainsi à la prédiction des performances des structures dans des conditions opérationnelles sophistiquées.

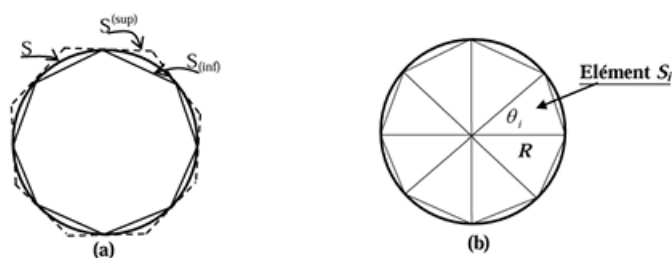


Figure 3-1 Exemple d'application de la MEF

Tout comme un polygone régulier se rapproche d'un cercle parfait lorsque le nombre de côtés augmente jusqu'à l'infini, un modèle d'éléments finis se rapproche d'une représentation optimale d'un système physique lorsque le nombre d'éléments se rapproche de l'infini. Étant donné qu'une représentation parfaite d'un système est pratiquement impossible, la méthode des éléments finis produit des solutions approximatives très précises qui simulent la solution exacte du problème étudié.

La méthode des éléments finis (MEF) vise à modéliser des phénomènes physiques, qu'ils soient structurels, thermiques ou de dynamique des fluides, en les transformant en un système d'équations mathématiques qui peuvent être résolues à l'aide de techniques d'analyse par éléments finis (AEF). Pour y parvenir, des logiciels spécialisés, tels que ANSYS, sont utilisés. Il fournit des interfaces visuelles avancées et diverses bibliothèques de composants, facilitant la simulation et l'analyse précises et efficaces d'interactions complexes. Ces outils s'appuient sur des algorithmes puissants pour équilibrer la précision de calcul avec les ressources disponibles, ce qui en fait une pierre angulaire de la conception technique moderne.

3.3. Présentation de logiciel ANSYS

ANSYS Mechanical APDL (Paramétrique Design Langage) [31]. Est un logiciel d'ingénierie multidisciplinaire utilisé pour simuler des phénomènes physiques complexes tels que les analyses structurelles, thermiques et dynamiques des fluides via la technique des éléments finis (FEA). Le processus d'analyse commence par l'identification de la nature du problème physique (mécanique, thermique, etc.), puis par la construction d'un modèle mathématique basé sur des équations différentielles pour représenter le système. Ensuite, les propriétés matérielles pertinentes (telles que le module d'élasticité ou la conductivité thermique) sont définies, le type d'élément de maillage approprié (solide, coque, poutre) est choisi et la résolution du maillage est spécifiée pour obtenir un équilibre entre précision et temps de calcul. Des charges

(telles que des forces ou de la chaleur) et des conditions aux limites (telles que des fixations) sont appliquées au modèle, et la stratégie de solution est déterminée en fonction de la nature de l'analyse, qu'elle soit linéaire ou non linéaire, stable ou transitoire, modulaire ou thermique. Enfin, des résultats tels que le déplacement, la contrainte, la déformation ou la distribution de température sont extraits, permettant l'analyse des performances et l'optimisation de la conception avant la mise en œuvre réelle, ce qui en fait un outil essentiel dans l'ingénierie compétitive moderne [32].

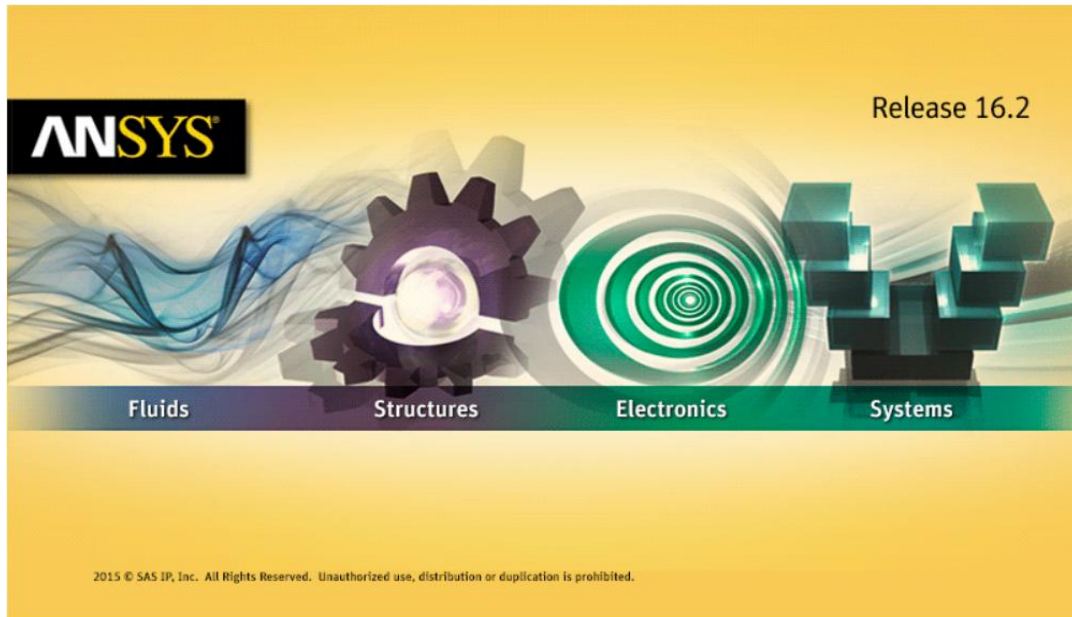


Figure 3-2 Logiciel ANSYS [32].

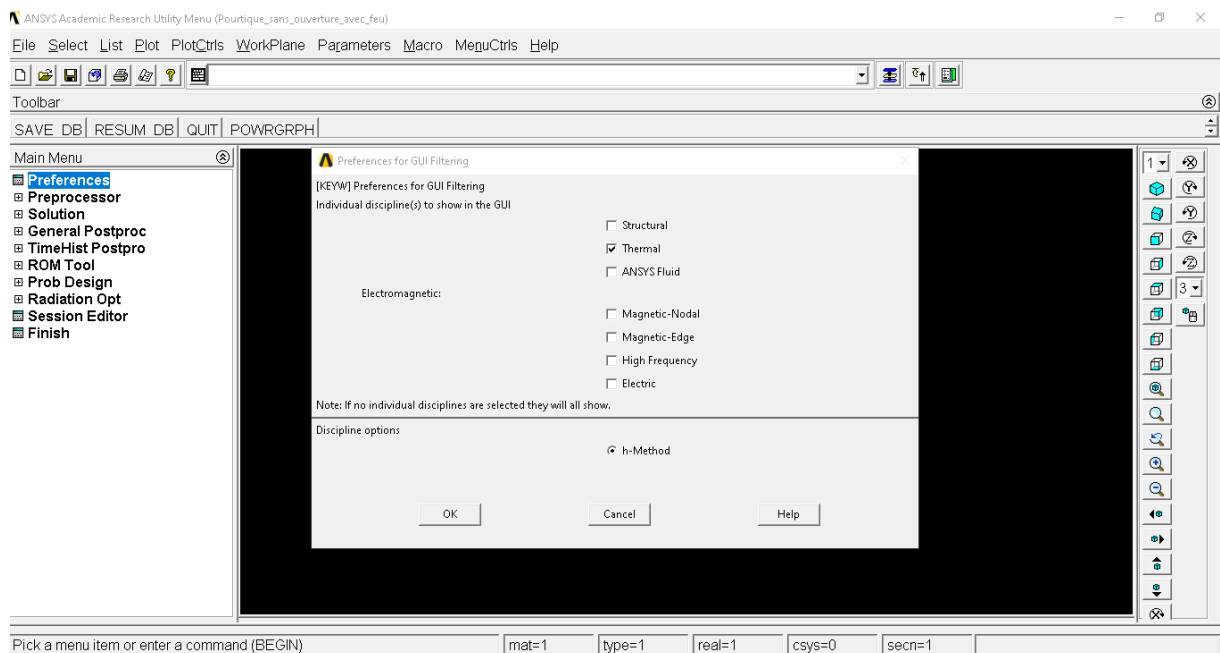


Figure 3-3 Définition du type d'analyse dans ANSYS [32].

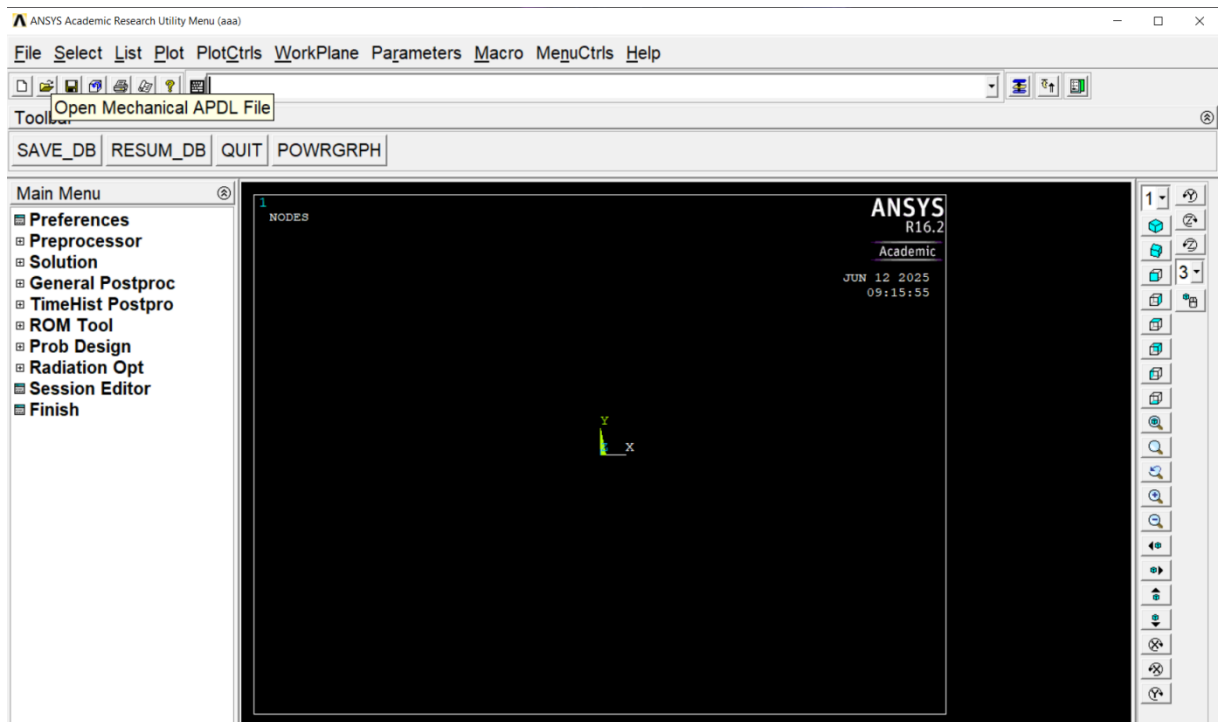


Figure 3-4 Présentation de face de travail dans ANSYS [32].

3.4. Cas d'étude

Cette étude vise à analyser le comportement thermique et mécanique de poutres cintrées en acier IPE600, protégées et non protégées, en configurations solides et cellulaires. La figure 3-4 illustre les propriétés géométriques de ces poutres. Chaque poutre mesure 15 mètres de long et 9 mètres de haut. Deux cas distincts ont été étudiés.

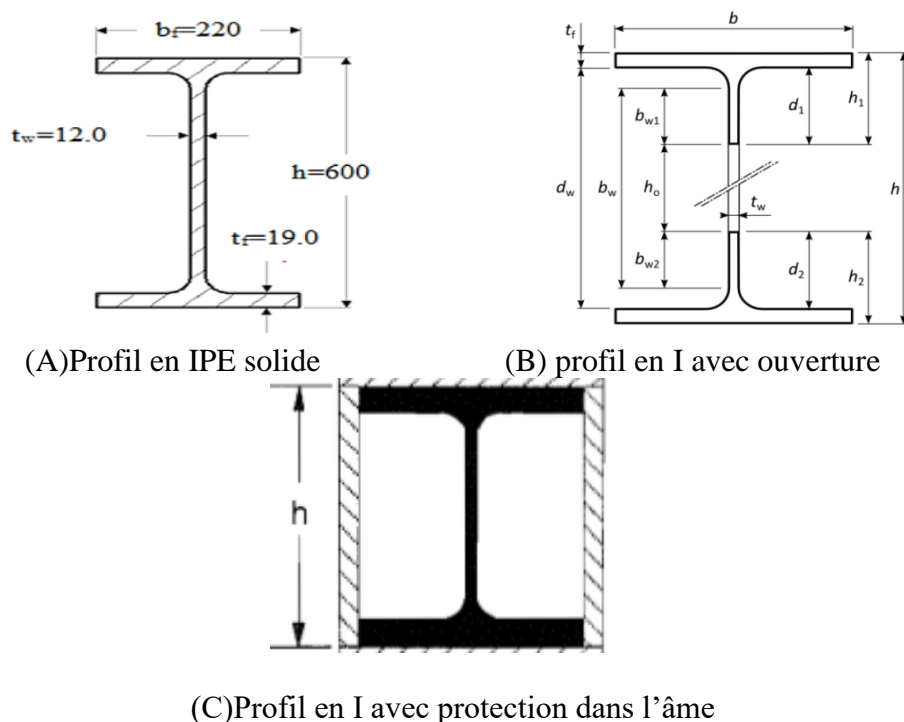


Figure 3-5 Les dimensions de la section transversal IPE600

Tableau 3-1 Les Caractéristiques géométriques des cas étudié

Poutre IPE 600	h (mm)	b (mm)	Tw (mm)	Tf (mm)	a ₀ (mm)
	600	220	12	19	200

3.4.1. Poutre courbe sans ouverture

Dans cette configuration, on étudie d'une poutre courbe IPE 600, de 15m de longueur, soumis à la courbe de feu normalisée ISO 834. On utilise les caractéristiques de la section issues des tables standards : la section IPE 600 possède une aire d'environ 15600 mm² et une hauteur de 600 mm, et une largeur de 220 mm et un poids d'environ 122 kg/m. Cette configuration de référence permet de comprendre l'impact direct du feu sur la distribution de la température à travers la section acier sans introduction de détails géométriques supplémentaires.

3.4.2. Poutre courbe avec ouverture

Dans cette poutre, trois ouvertures cellulaires ont été réalisées de manière symétrique sur toute sa longueur. Le rayon de ces ouvertures est de 0,2 m, et leur hauteur par rapport au centre est de 9 m. Elles sont également soumises à la courbe standard de résistance au feu ISO 834, ce qui est essentiel pour la conception de structures résistantes au feu. Cette étude permet d'évaluer les performances des éléments structurels exposés à des conditions d'incendie normalisées.

La poutre est exposée à un feu standard selon une exposition à trois et quatre côtés et selon deux méthodes de transfert de chaleur : par convection et par rayonnement.

3.5. Modèle thermique

3.5.1. Type d'élément

L'élément SHELL131 utilisé dans ANSYS est un élément de coque thermique 3D conçu pour modéliser le transfert de chaleur dans des structures minces ou d'épaisseur moyenne (telles que les isolants et les panneaux solaires). Il offre la possibilité de simuler la conduction, la convection et le rayonnement thermique, avec prise en charge de propriétés thermiques variables et de structures composites en couches. Il

est utilisé dans les analyses en régime permanent et transitoire, les interactions thermo structurelles et la distribution de température dans les systèmes d'ingénierie.

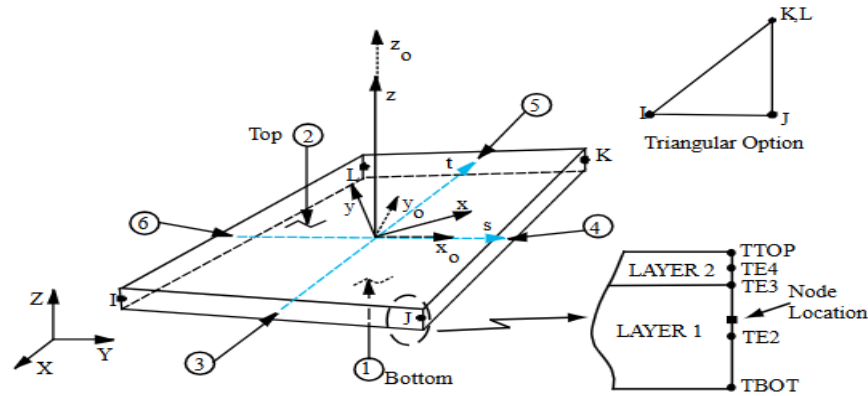


Figure 3-6 Géométrie SHELL131 [32]

3.5.2. Condition aux limites

Les poutres cellulaires en acier courbées ont été soumises à des conditions d'incendie simulées selon la courbe nominale ISO-834 (spécifiée dans la section I), où la température était représentée en fonction du temps appliquée uniformément à toutes les parties non protégées de la poutre.

Le transfert de chaleur dans ce modèle repose sur trois mécanismes principaux : le rayonnement avec un coefficient d'émissivité de $\epsilon=0,7$ pour la surface de l'acier, la convection avec un coefficient constant de $\alpha = 25$ [W/m²K] et la conduction thermique à travers le matériau de la poutre. Le modèle est conçu pour simuler des conditions réelles en supposant que les poutres ont quatre surfaces exposées, ce qui augmente la précision de la représentation de l'interaction entre la chaleur et la structure en acier dans des scénarios d'incendie extrêmes

3.5.3. Modélisation

A) Poutre courbe solide

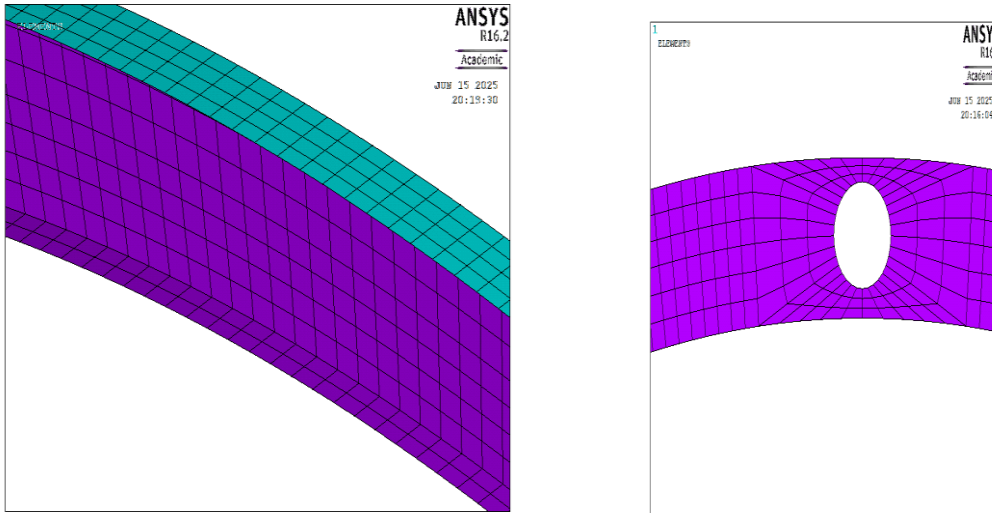


Figure 3-7 Poutre courbe sans ouverture : model EF en ANSYS

B) Poutre courbe avec ouverture

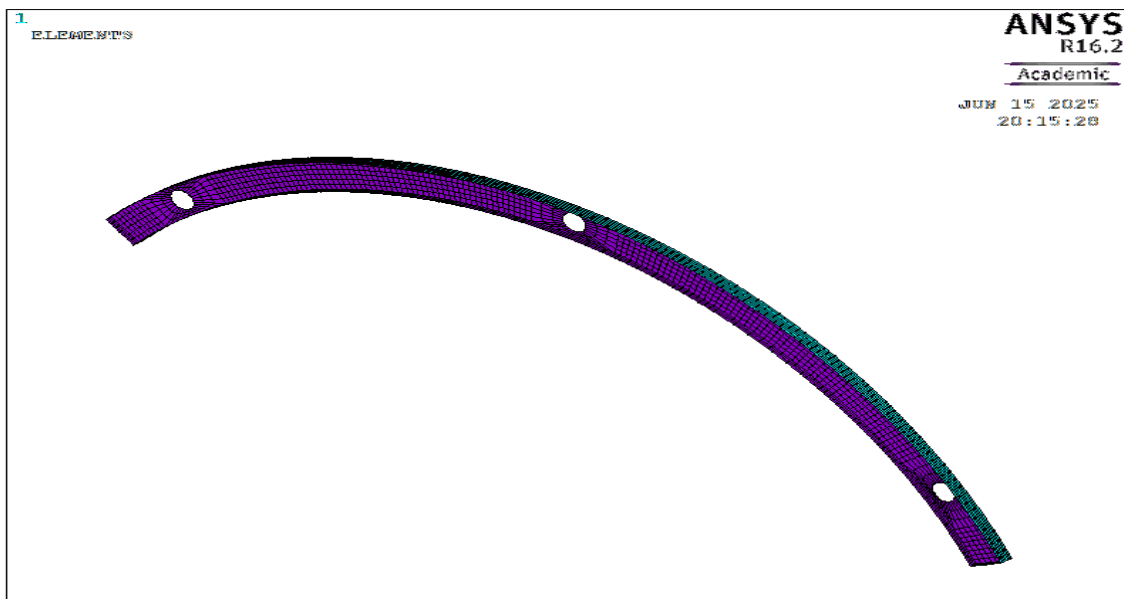


Figure 3-8 Poutre courbe avec ouverture : model EF en ANSYS

C) Poutre courbe solide avec protection

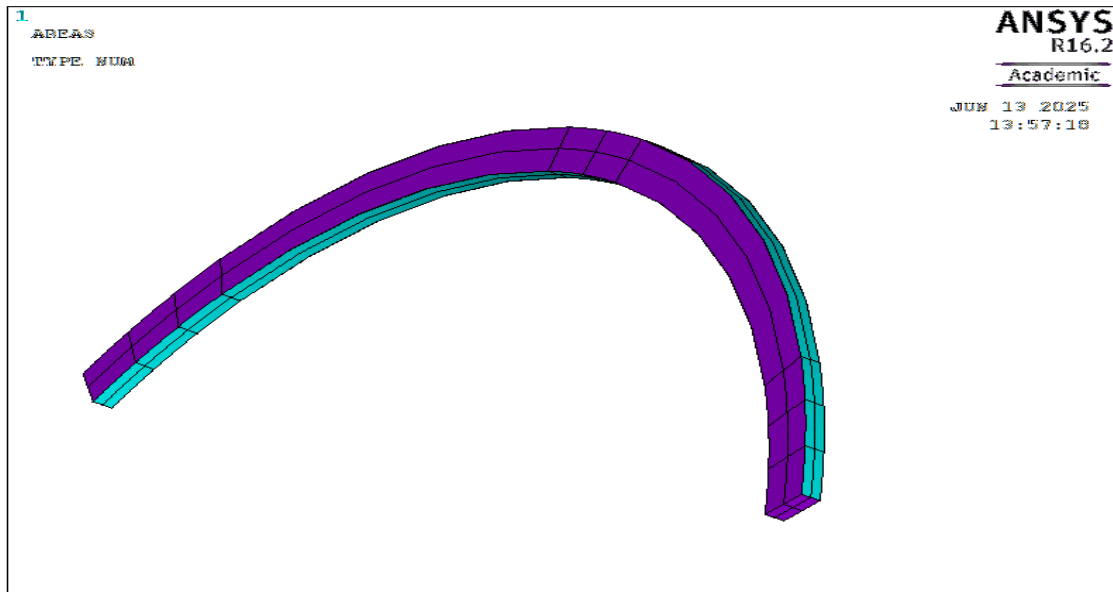


Figure 3-9 Poutre courbe solide avec protection : model EF en ANSYS

3.5.4. Application du feu en poutre courbe

A) Sans protection

1. La poutre courbe solide 4 cotés

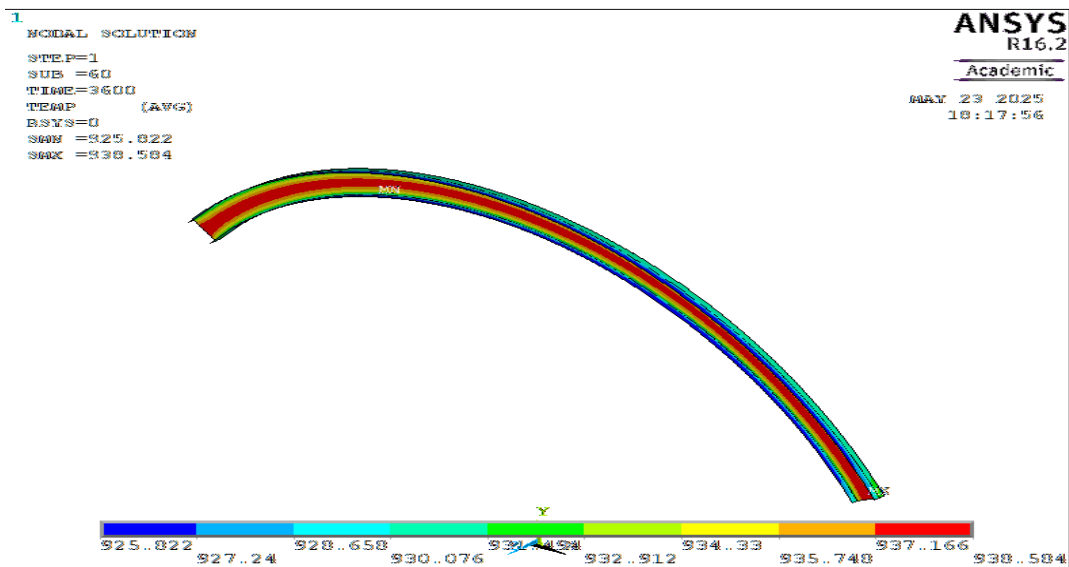


Figure 3-10 Répartition de la température dans la section solide R60 exposé sur 4 cotés - ANSYS

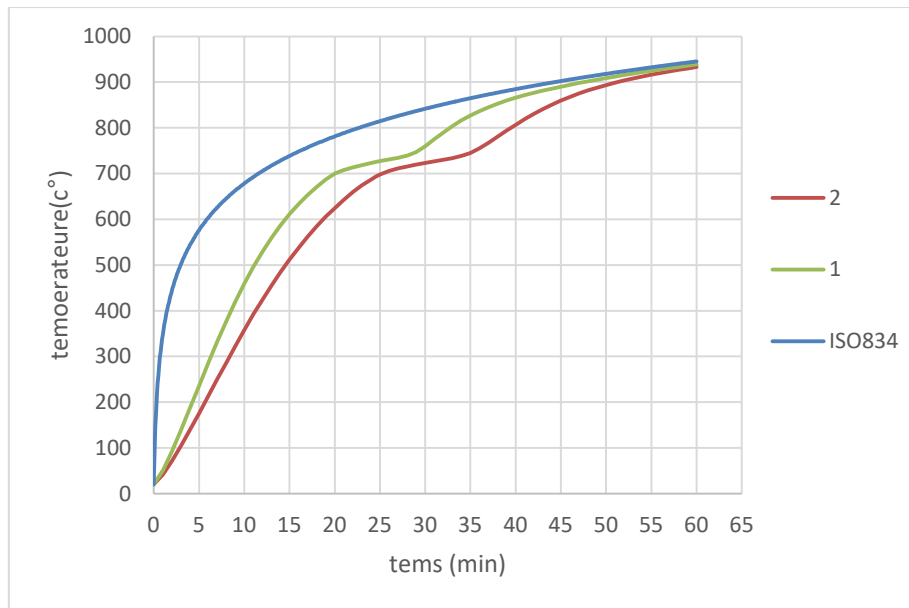


Figure 3-11 Évolution de la température en fonction du temps d'une poutre solide exposée sur quatre côtés - ANSYS

II. La poutre courbe solide 3 cotés

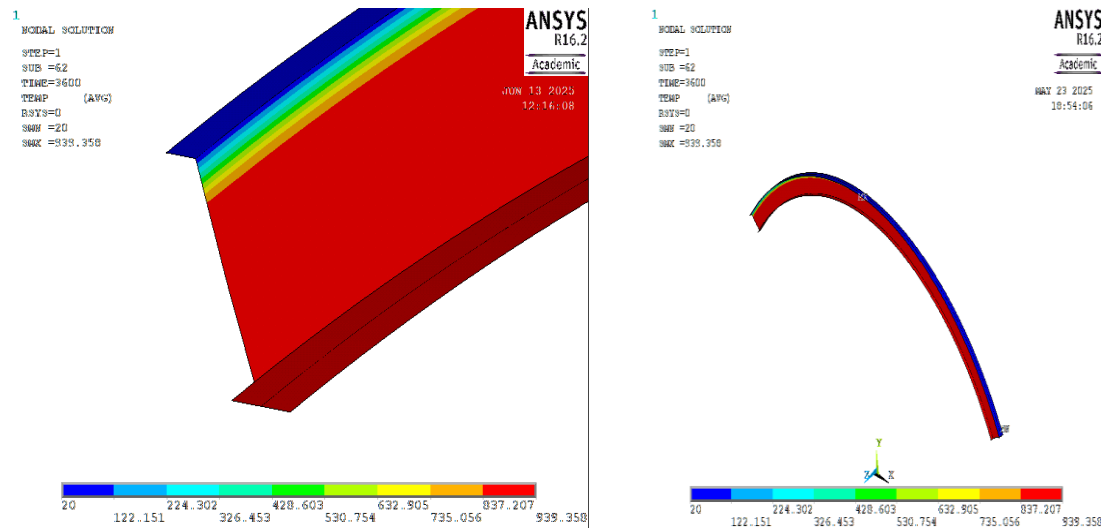


Figure 3-12 Répartition de la température dans la section solide R60 exposé sur 3 cotés

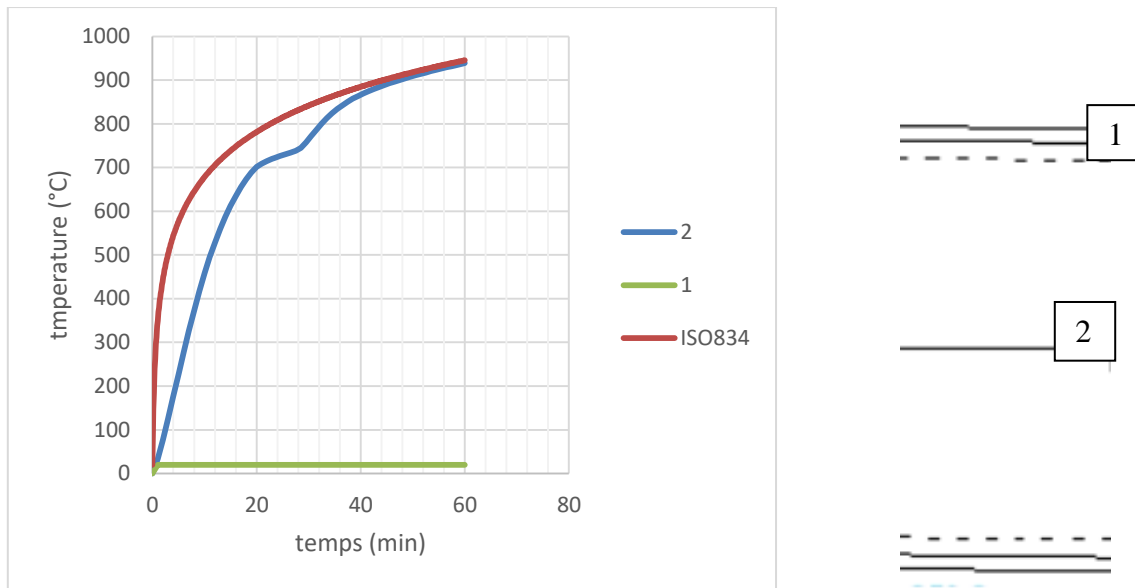


Figure 3-13 Évolution de la température en fonction du temps pour une poutre courbée solide à trois côtés à l'aide d'ANSYS

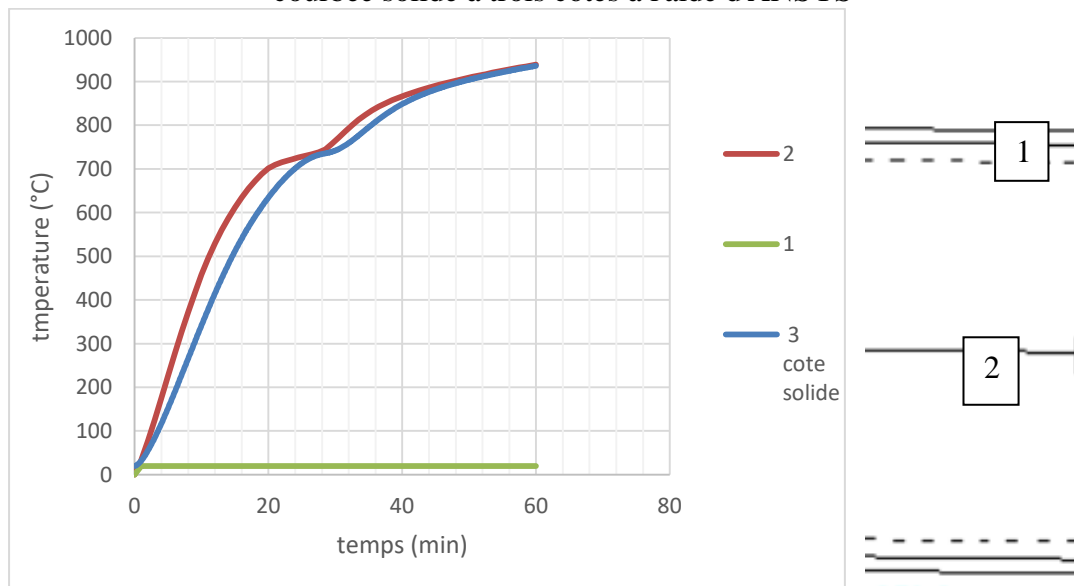


Figure 3-14 Évolution de la température en fonction du temps pour une poutre courbée solide à trois côtés - ANSYS et EC3

- **Analyse et interprétation des courbes**

La figure 3-15 montre que pour une durée d'exposition R60, la température au niveau de l'âme est plus fiable et (point 2) est plus élevée au niveau de la semelle atteignant 780C°, quant à la partie supérieure de semelle (point1), la température est restée constante à 20 C° car elle n'a pas été exposée à la chaleur.

III. La poutre courbe avec ouverture 4 cotés

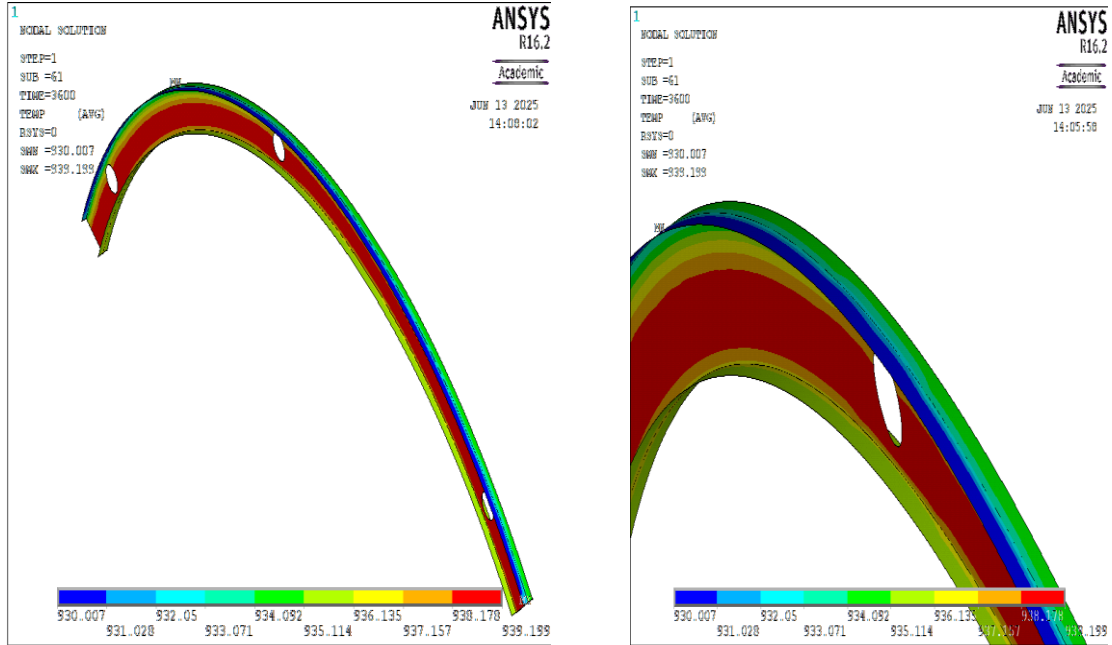


Figure 3-15 Répartition de la température dans la section avec ouverture R60 exposé sur 4 cotés ANSYS

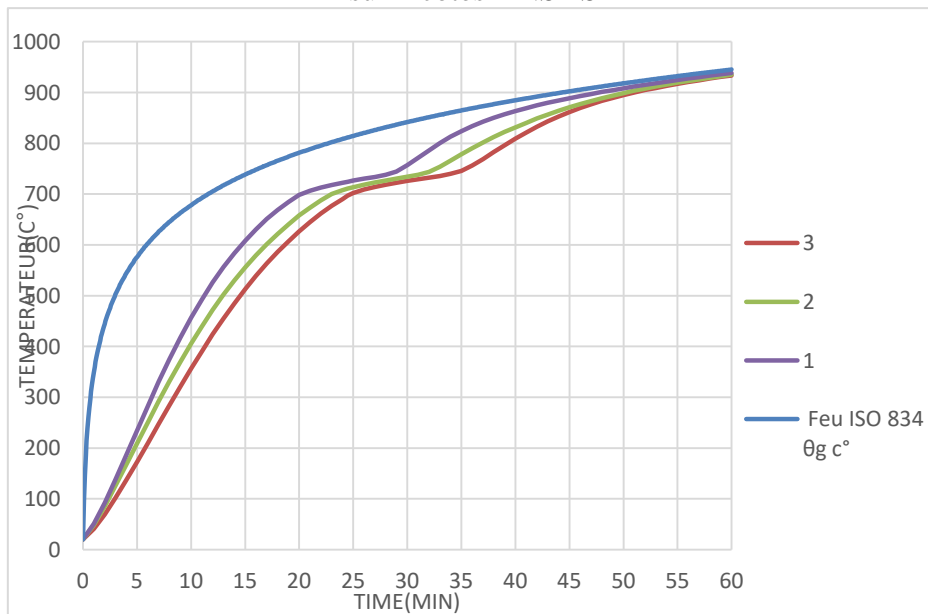


Figure 3-16 Évolution de la température en fonction du temps d'une poutre courbée solide à quatre côtés - ANSYS

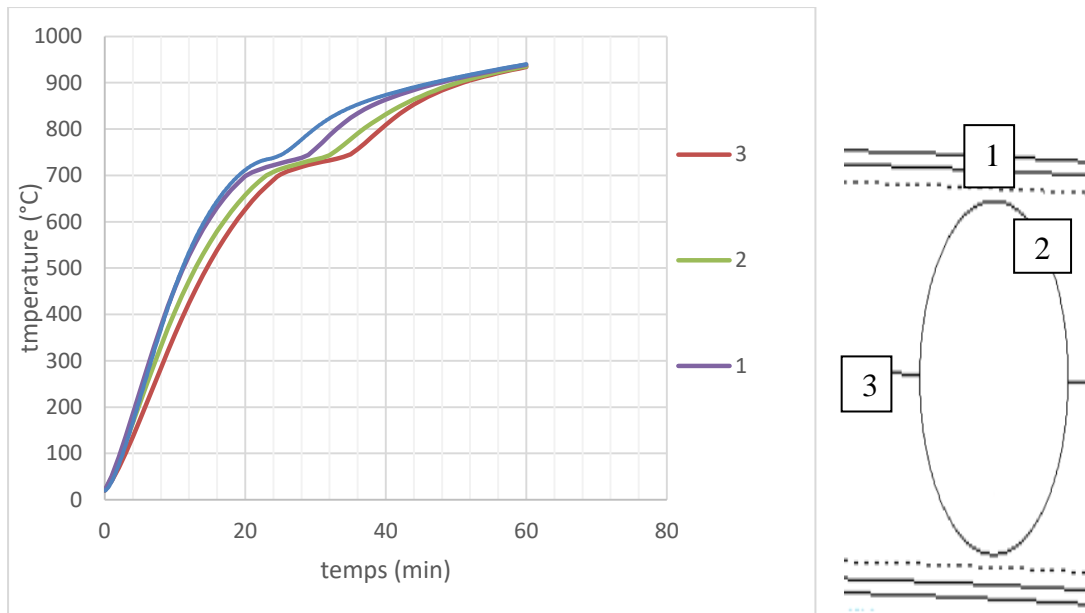


Figure 3-17 Évolution de la température en fonction du temps d'une poutre courbée solide à quatre côtés - ANSYS et EC3

- Analyse et interprétation des courbes

La figure 3-18 montre que pour une durée d'exposition R60, la température au niveau de l'âme est plus faible et (point 3) est plus élevée au niveau de la semelle atteignant environ 900C°.

IV. La poutre courbe avec ouverture 3 cotés

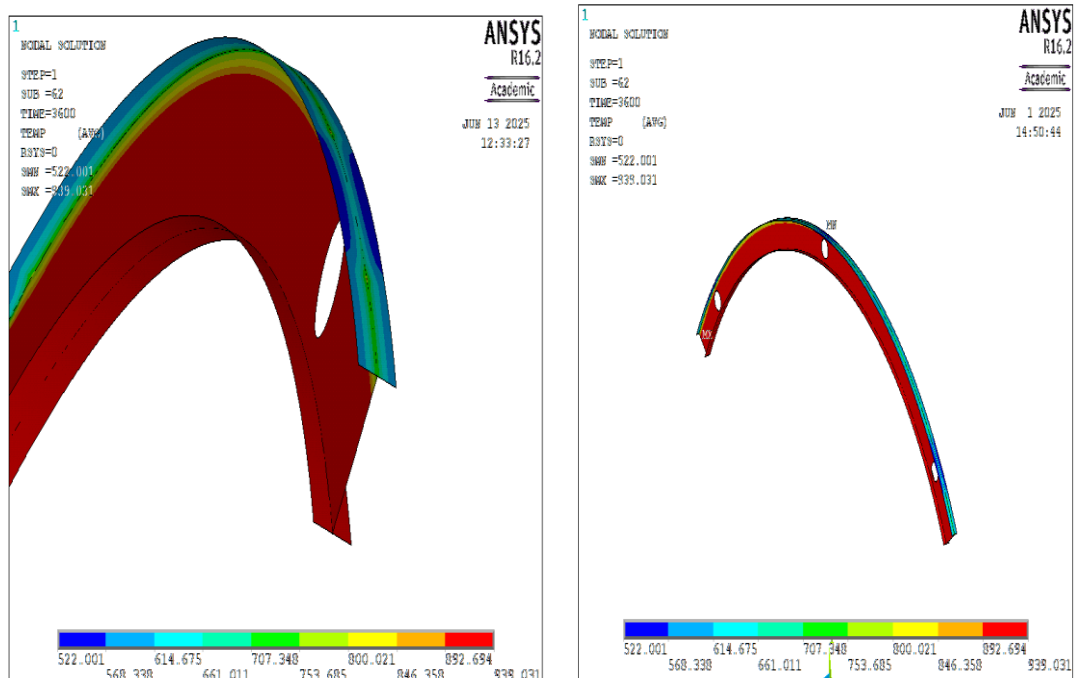


Figure 3-18 Répartition de la température dans la section avec ouverture R60 exposé sur 3 cotés - ANSYS

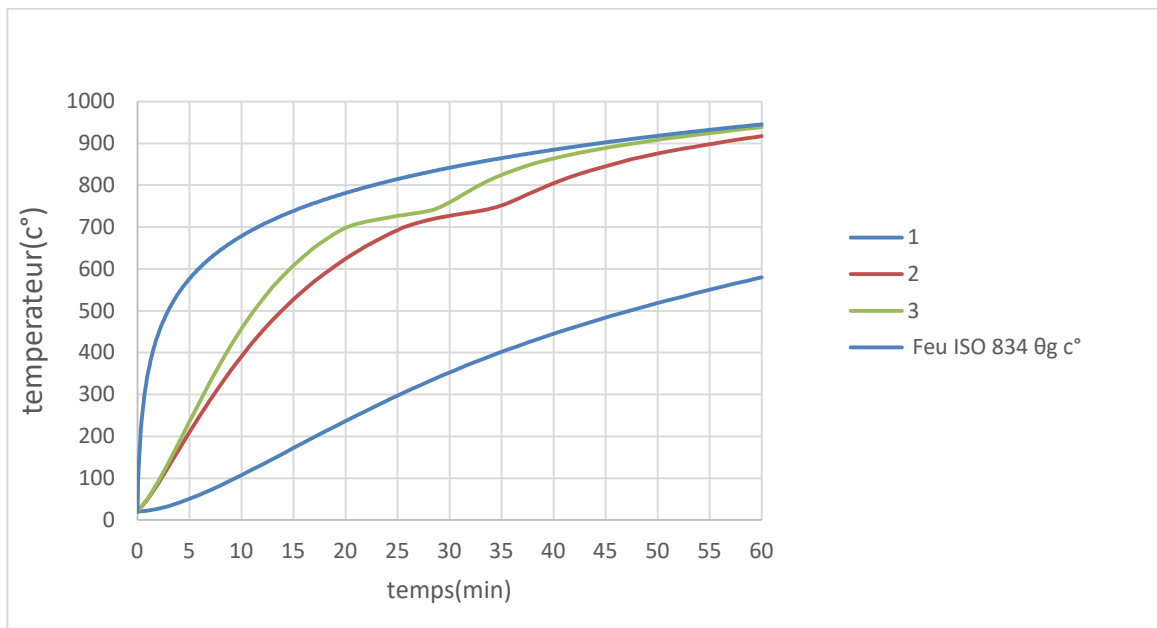


Figure 3-19 Evolution de température en fonction du temps dans différent nœuds de poutre courbe avec ouverture 3 cotés par ANSYS

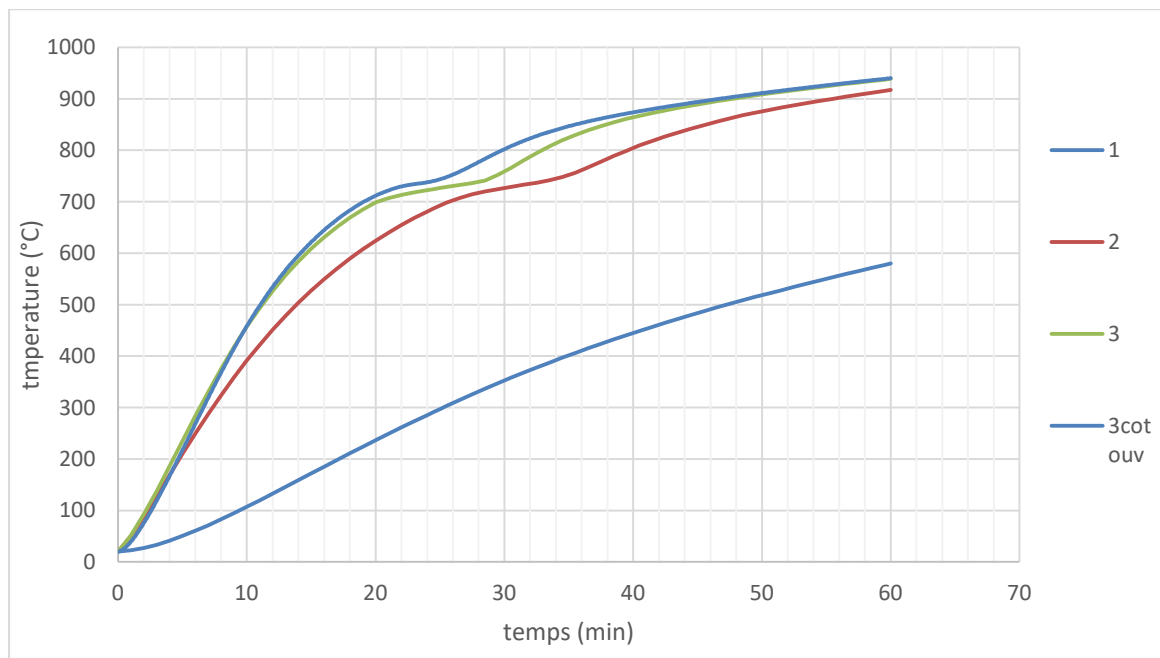


Figure 3-20 Évolution de la température en fonction du temps d'une poutre courbée solide sur trois côtés - ANSYS et EC3

- **Analyse et interprétation des courbes**

La poutre courbe avec ouverture 3 côtés (poutre courbe avec ouverture 3 cote) passe de 100 à 950 degrés Celsius en 70 minutes, ce qui indique un chauffage rapide dû à l'ouverture. La partie intérieure (800 degrés) et la partie supérieure (600 degrés) montrent un chauffage plus lent, tandis que la zone au-dessus de l'ouverture atteint 1000 degrés Celsius. L'ouverture à trois côtés augmente la chaleur par rapport aux parties intérieures, mais elle est moins intense que la zone directement au-dessus.

B) Avec protection

I. La poutre courbe sans ouverture 3 coté

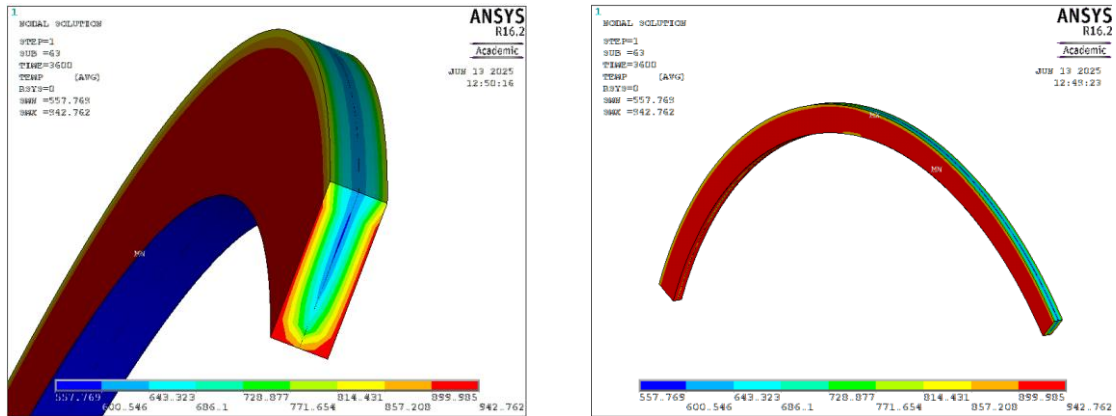


Figure 3-21 Répartition de la température dans la section solide R60 exposé sur 3 cotés - ANSYS

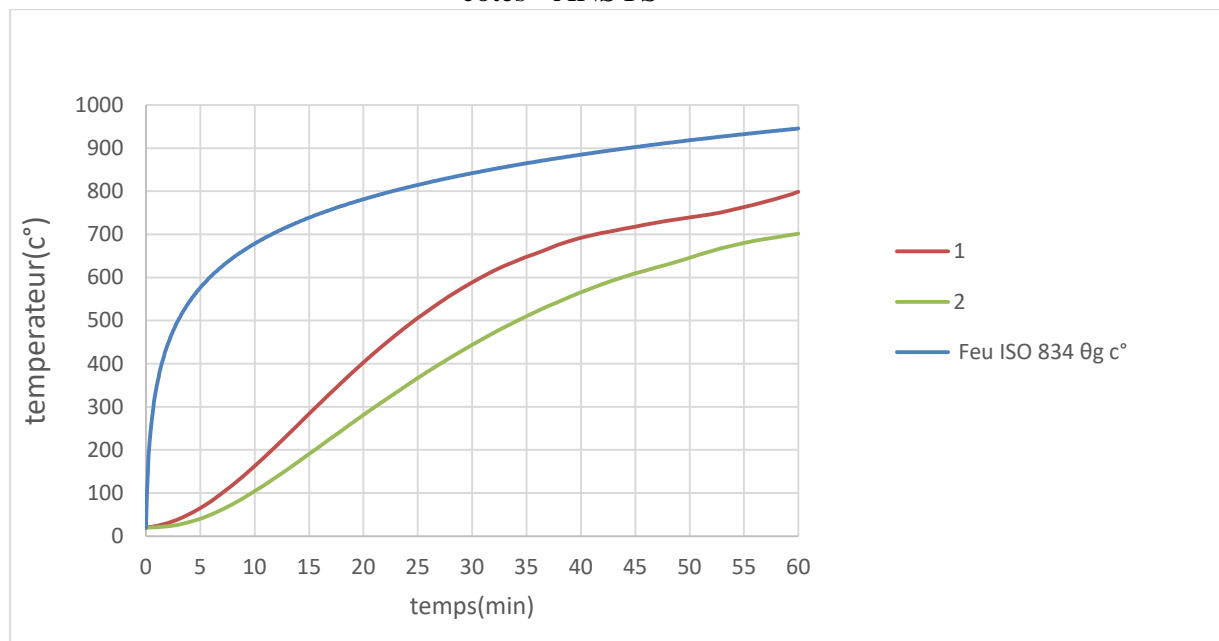


Figure 3-22 Evolution de température en fonction du temps dans différents nœuds de poutre courbe solide

- Analyse et interprétation des résultats

L'analyse a montré que les poutres en acier protégées sont plus résistantes au feu que les poutres non protégées. C'est ce que montre la courbe, car l'âme de la poutre n'a pas atteint la température maximale atteinte lors des expériences précédentes, où il s'était arrêté à 557 °C.

3.5.5. Description de la distribution thermique des poutres sans ouvertures

L'analyse thermique montre une distribution de température hétérogène dans les poutres d'acier cintrées (sans ouvertures). Les températures les plus élevées (jusqu'à 939 °C) sont concentrées dans les zones courbes et internes (en rouge), tandis que les sections droites ou froides enregistrent des températures plus basses (20-525 °C, en bleu), avec un gradient de température prononcé aux intersections et dans les courbes. Cette importante variation (jusqu'à 900 °C) entraîne une dilatation thermique inégale.

- **Réponse du modèle à la chaleur**

Une dilatation inégale (jusqu'à 900 °C) entraîne une déformation thermique rapide, avec des contraintes de cisaillement dans les zones de flexion provoquant des fissures superficielles et un flambement horizontal ou vertical. L'acier perd 90 % de sa capacité portante à 800 °C, ce qui fragilise gravement la structure et la rend vulnérable à un effondrement instantané sous la moindre charge supplémentaire.

3.5.6. Description de la distribution thermique des poutres avec ouvertures

Les résultats de simulation ANSYS montrent la distribution de température dans les poutres en acier cintrées avec ouvertures. La température la plus élevée (939 °C) est enregistrée dans les zones proches des fentes et des bords incurvés, tandis qu'elle diminue à 330-522 °C dans les parties éloignées. Il est à noter que les ouvertures ont contribué à une distribution thermique plus uniforme que les poutres sans ouvertures, mais elles n'ont pas empêché la formation de points chauds aux bords des ouvertures en raison de la concentration des contraintes thermiques, ce qui menace de fissuration

localisée et d'une perte de résistance de 90 % de l'acier lorsque la température dépasse 800 °C.

- **Réponse du modèle à la chaleur**

Les températures élevées (jusqu'à 939 °C) provoquent une dilatation inégale de la poutre en acier courbée, notamment autour des ouvertures, générant des contraintes critiques qui entraînent des fissures aux bords des ouvertures et le flambage des zones minces. Le danger est aggravé par le fait que l'acier perd 90 % de sa résistance à 800 °C, tandis que les ouvertures forment des points chauds sur leurs bords, malgré une répartition partielle de la chaleur. Ceci menace l'effondrement de la poutre si la conception des ouvertures n'est pas améliorée et que ses bords ne sont pas renforcés.

3.5.7. Description de la distribution thermique des poutres courbe sans avec protection en béton

L'efficacité du béton de protection thermique permet de ralentir considérablement la montée en température de l'acier. Ce matériau, grâce à sa masse thermique élevée et sa faible conductivité, agit comme une barrière efficace contre la chaleur. Ainsi, la protection en béton limite fortement les gradients thermiques entre l'âme et les semelles de la poutre. Durant les premières phases de l'exposition au feu, la température de l'acier reste bien en dessous de 600 °C, ce qui permet à la poutre de maintenir une grande partie de sa résistance mécanique pendant une période prolongée. Grâce à cette protection continue et enveloppante, l'âme et les semelles présentent une répartition thermique relativement uniforme.

3.6. Comparaison entre les résultats analytiques et numériques :

Les résultats thermiques indiquent que toutes les poutres en acier cintrées non protégées, qu'elles soient pleines ou munies d'ouvertures et quel que soit le nombre de faces exposées, présentent un comportement thermique proche de celui de la poutre de référence IPE600, atteignant une température moyenne supérieure à 900 °C après 60 minutes d'exposition. Il est observé que la présence d'ouvertures (notamment lorsqu'elles couvrent les quatre faces) accélère légèrement le transfert de chaleur,

soulignant leur rôle en tant que points favorisant la conduction thermique. Néanmoins, cet effet reste limité en l'absence de systèmes de protection efficaces.

En revanche, la poutre pleine protégée sur trois faces montre un comportement thermique nettement différent, maintenant une température inférieure à 700 °C même après 60 minutes, ce qui confirme l'efficacité des systèmes de protection thermique dans la réduction de la vitesse de montée en température et, par conséquent, dans le retard de la perte des propriétés mécaniques de l'acier.

Il en ressort que les normes de conception résistantes au feu doivent accorder une attention particulière à l'utilisation de protections thermiques, notamment dans les zones exposées à des températures élevées, et considérer les ouvertures comme des points de faiblesse thermique potentiels nécessitant un traitement spécifique lors de la conception.

3.7. Conclusion

L'analyse des résultats de la distribution thermique dans les poutres en acier courbes, qu'elles soient pourvues d'ouvertures ou non, montre que l'exposition à des températures élevées (atteignant environ 938 °C) provoque une dégradation significative des propriétés du matériau. Ce phénomène devient particulièrement critique au-delà de 600 °C, seuil à partir duquel l'acier peut perdre jusqu'à 50 % de sa résistance mécanique.

Pour les poutres sans ouvertures, on observe une concentration thermique au niveau des zones supérieures, ce qui augmente le risque de déformations et d'effondrement en raison d'un gradient de dilatation thermique non uniforme. En revanche, dans le cas des poutres comportant des ouvertures, ces dernières agissent comme des foyers de chaleur, engendrant une élévation locale de température pouvant atteindre environ 939,2 °C. Cette concentration thermique réduit la conductivité thermique locale et accélère la perte de résistance dans les zones adjacentes.

Cependant, dans le cas des poutres protégées par des systèmes de protection thermique, la température maximale est réduite à environ 557 °C, ce qui limite significativement les effets néfastes de la chaleur.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité, lors de la conception de poutres en acier destinées à des environnements exposés à de fortes chaleurs (comme les

incendies), d'adopter une disposition judicieuse des ouvertures, de renforcer l'isolation thermique autour de celles-ci et de limiter les gradients thermiques excessifs. L'utilisation de matériaux isolants ou de systèmes de refroidissement permettrait ainsi d'identifier et de maîtriser les zones critiques susceptibles de provoquer une défaillance structurelle grave.

**CHAPITRE 4 ANALYSE
MECANIQUE SOUS L'EFFET DE
HAUTES TEMPERATURES**

4.1. Introduction

Les poutres en acier courbées constituent des éléments structurels essentiels dans de nombreux projets de génie civil, grâce à leur capacité à supporter des charges complexes et à offrir une grande flexibilité de conception. Toutefois, ces poutres peuvent présenter des problèmes de stabilité et une perte de résistance sous l'effet de différentes sollicitations, ce qui nécessite une analyse mécanique approfondie pour mieux comprendre leur comportement structurel.

L'analyse mécanique représente un outil fondamental pour évaluer la réponse des poutres en acier courbées aux charges appliquées, en étudiant la répartition des contraintes et des déformations dans la section transversale, et en identifiant les zones critiques susceptibles de provoquer une défaillance. Cette analyse permet également d'optimiser la conception en tenant compte de facteurs tels que la forme de la poutre, le type de charge, la présence d'ouvertures et les conditions d'appui. Cette étude vise à réaliser une analyse mécanique complète des poutres en acier courbées afin de comprendre les facteurs influençant leur comportement et leur stabilité, et de formuler des recommandations de conception visant à améliorer leur performance et garantir leur sécurité dans les structures de génie civil.

4.2. Outil d'analyse: logiciel ANSYS

Dans cette étude, le logiciel ANSYS a été utilisé comme outil principal pour l'analyse mécanique. Grâce à ses capacités avancées de modélisation par éléments finis, ANSYS a permis de simuler avec précision le comportement des poutres en acier courbées, qu'elles soient pleines ou perforées, et d'analyser leur réponse sous différentes sollicitations mécaniques. Les simulations se sont particulièrement concentrées sur la répartition des contraintes et des déformations dans la poutre, en tenant compte des paramètres géométriques tels que la forme de la section, la position des ouvertures et la longueur de la poutre. Cette approche méthodique garantit la fiabilité et la précision des résultats obtenus, facilitant ainsi la compréhension des phénomènes critiques liés à la stabilité de ces éléments et contribuant à l'optimisation de leur conception dans les structures de génie civil.

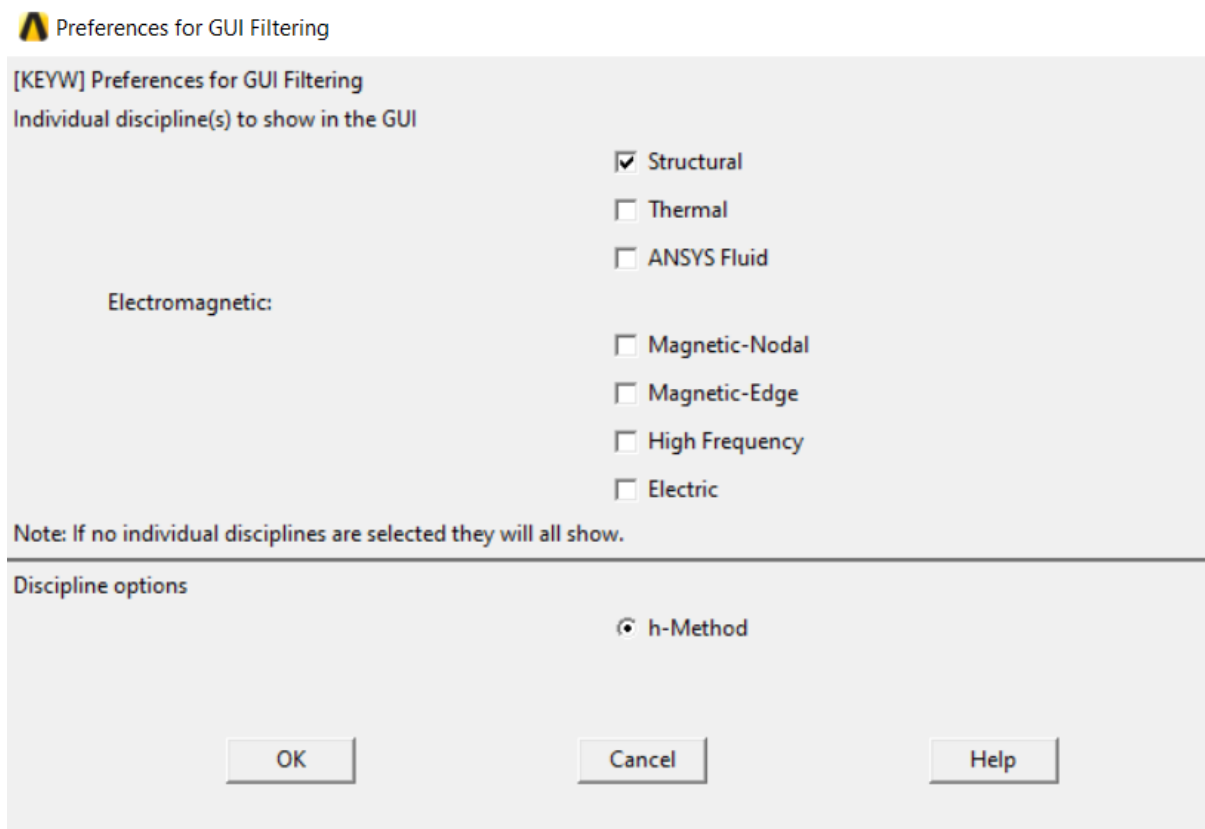


Figure 4-1 Face structural ANSYS

4.3. Type d'élément et les conditions aux limites

L'élément SHELL181, tridimensionnel à 4 nœuds et doté de six degrés de liberté (déplacements suivant x, y, z et rotations autour de ces axes), est employé dans diverses applications : systèmes linéaires, à grandes rotations, et/ou problèmes non linéaires à grandes déformations.

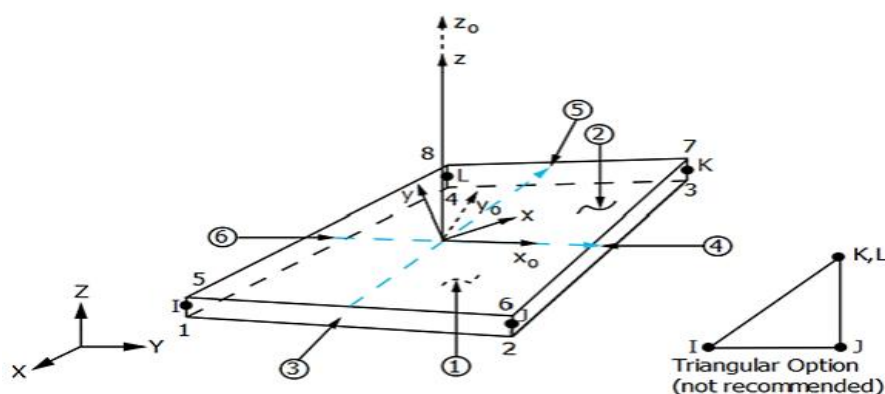


Figure 4-2 Géométrie SHELL181 [32]

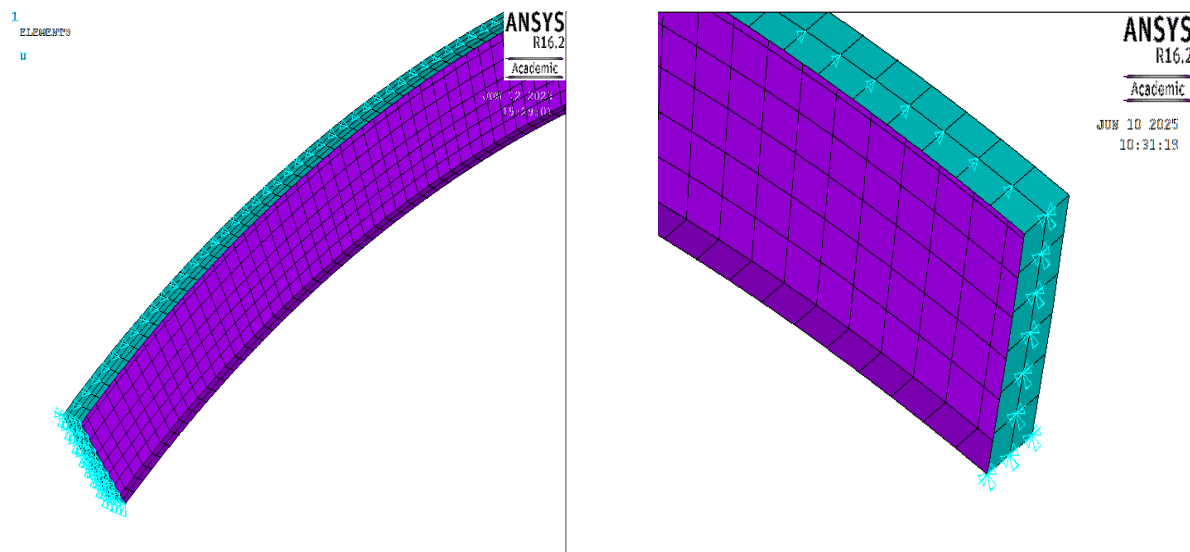


Figure 4-3 Les conditions limites pour Appui double

Pour les conditions aux limites de l'analyse mécanique : en appui double, toutes les composantes de déplacement (U_x , U_y , U_z) sont fixées à zéro (comme illustré) ; dans le cas d'un appui simple, seuls les déplacements horizontaux (U_x , U_y) sont contraints à zéro ; enfin, pour prévenir le déversement, le déplacement U_x au milieu du bord supérieur de la poutre courbe (sur toute sa longueur L) est maintenu à zéro, simulant l'effet stabilisateur du plancher[8].

L'imperfection géométrique a été tenu dans les simulations et analyse mécanique de l'imperfection géométrique $h/400$ selon la référence[33].

4.4. Analyse et interprétation des résultats

4.4.1. Déplacement la poutre à $T = 20C^\circ$

(a) Cas d'une Poutre courbe solide

La figure 4-4 montre l' évolution du déplacement en fonction de la charge pour la poutre courbe solide à $T = 20^\circ C$.

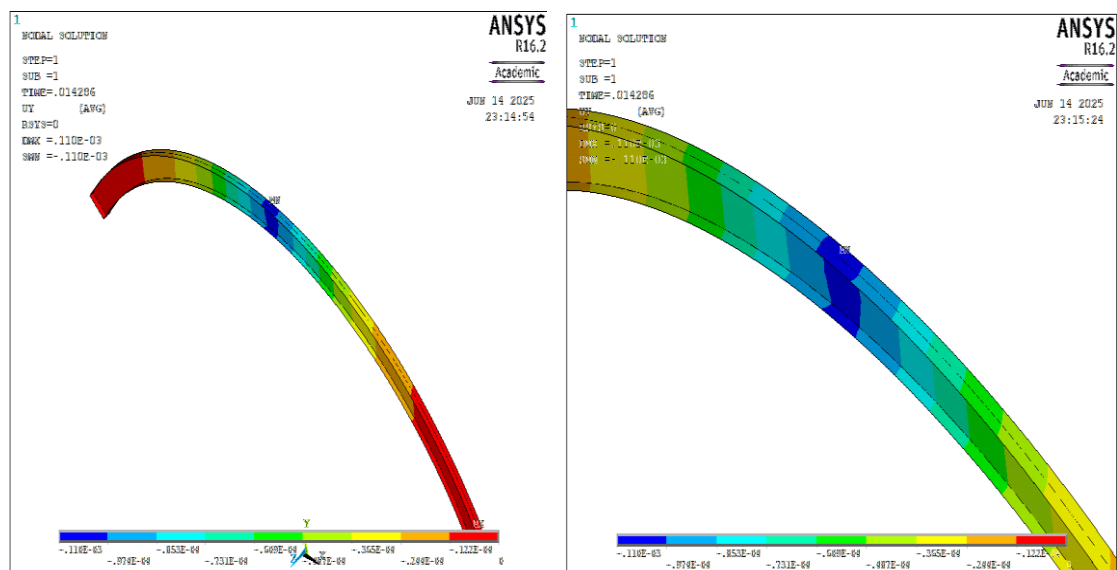


Figure 4-4 Déplacement de la poutre courbe solide à 20 C°

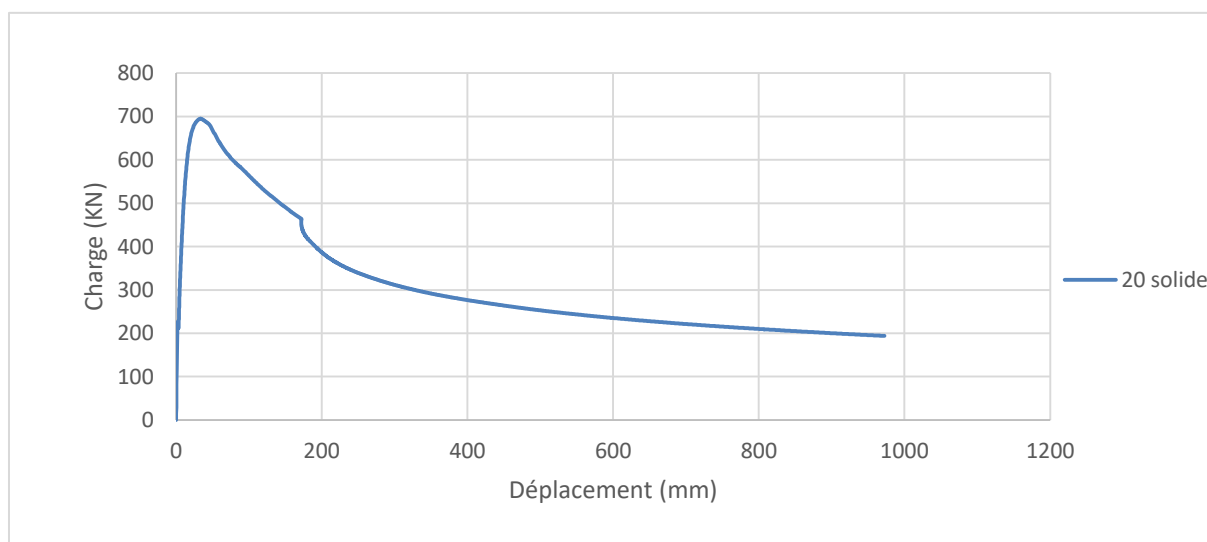


Figure 4-5 Variation du déplacement en fonction de charge –cas de la poutre solide à 20 C°

- **Analyse et interprétation des courbes**

La figure 4-5 montre l'évolution du déplacement en fonction de la charge pour la poutre courbe solide à $T = 20^{\circ}\text{C}$. Il est clair que la poutre solide, à 20°C , peut supporter une charge maximale d'environ 700 kN pour un faible déplacement (moins de 100 mm), démontrant sa grande résistance dans des conditions normales. À mesure que le déplacement augmente, la valeur diminue progressivement jusqu'à environ 200 kN pour 1 200 mm, indiquant une déformation progressive.

(b) Cas de la poutre courbe avec ouverture

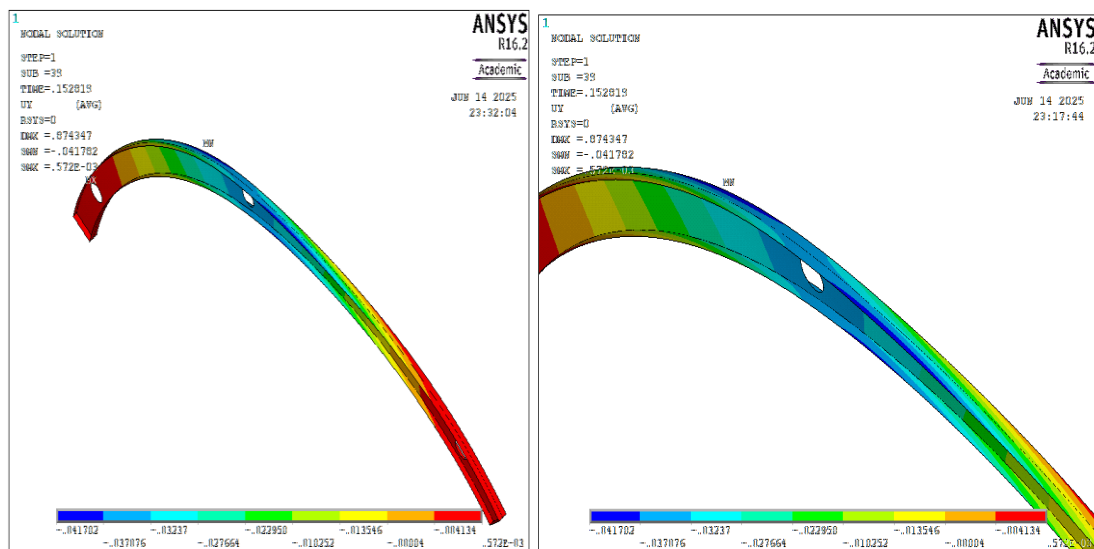


Figure 4-6 Déplacement de la poutre avec ouverture à 20 C°

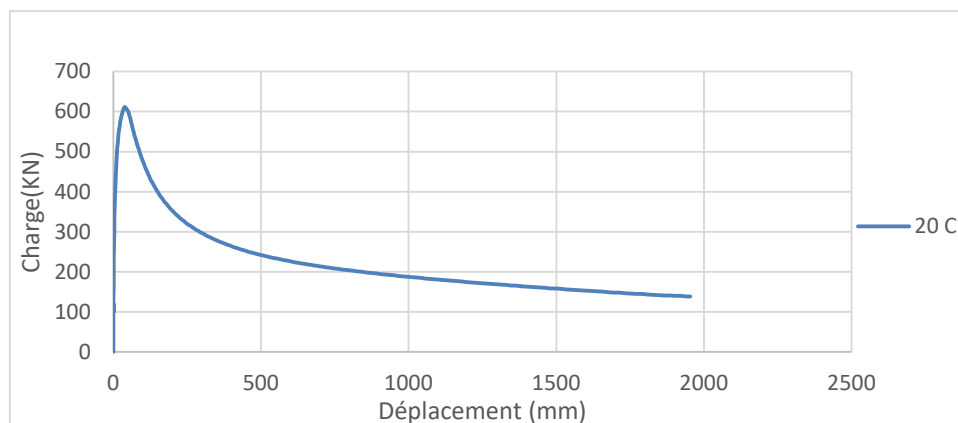


Figure 4-7 Variation du déplacement en fonction de charge –cas de la poutre avec ouverture à 20 C°

• **Analyse et interprétation des courbes**

La figure 4-7 illustre le déplacement en fonction de la charge pour une poutre courbée rigide à 20 °C. Il est clair que la poutre fendue résiste à une charge maximale d'environ 600 kN à 20 °C, ce qui est inférieur à celui d'une poutre rigide présentant un faible déplacement (moins de 500 mm), démontrant une bonne résistance initiale malgré la présence de fissures. À mesure que le déplacement augmente, la valeur diminue progressivement jusqu'à environ 100 kN à 2 500 mm, démontrant ainsi l'effet des fissures sur l'accélération de la déformation.

4.4.2. Déplacement la poutre à $T = 500C^{\circ}$

(a) Cas d'une Poutre courbe solide

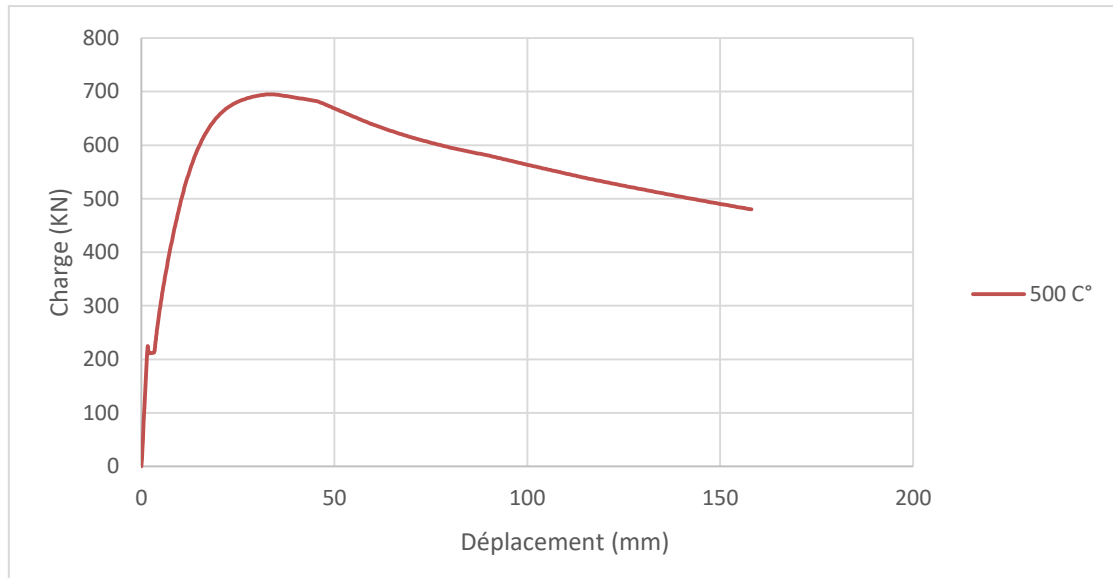


Figure 4-8 Variation du déplacement en fonction de charge –cas de la poutre solide à $500C^{\circ}$

- **Analyse et interprétation des courbes**

La figure 4-8 illustre le déplacement en fonction de la charge pour une poutre courbée rigide à $20^{\circ}C$. Il est clair que la poutre fendue résiste à une charge maximale d'environ 600 kN à $20^{\circ}C$, ce qui est inférieur à celui d'une poutre rigide présentant un faible déplacement (moins de 500 mm), démontrant une bonne résistance initiale malgré la présence de fissures. À mesure que le déplacement augmente, la valeur diminue progressivement jusqu'à environ 100 kN à 2500 mm, démontrant ainsi l'effet des fissures sur l'accélération de la déformation.

(b) Cas d'une Poutre courbe avec ouverture

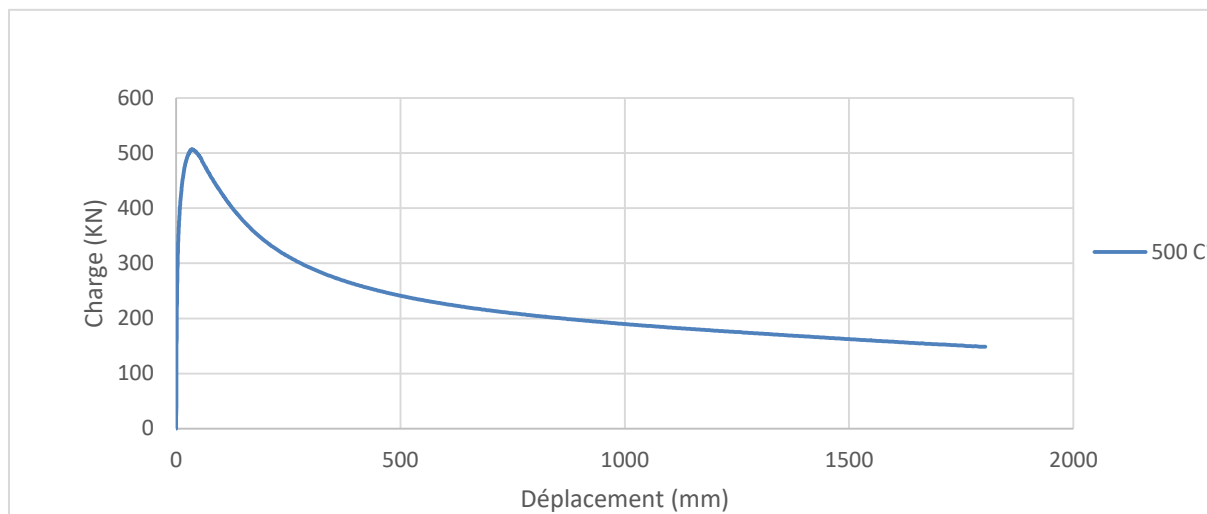


Figure 4-9 Variation du déplacement en fonction de charge –cas de la poutre avec ouverture à 500 C°

Analyse et interprétation des courbes

La courbe montre que la poutre avec ouverture à 500 °C résiste à une charge maximale d'environ 500 à 600 kN pour un faible déplacement (moins de 500 mm), ce qui reflète l'effet de la chaleur sur la réduction de la résistance par rapport aux conditions normales. À mesure que le déplacement augmente, la valeur diminue progressivement jusqu'à atteindre environ 100 kN à 2 000 mm, indiquant une déformation accélérée due aux ouvertures et à la température élevée.

4.4.3. Déplacement la poutre avec ouverture à T = 700 C°

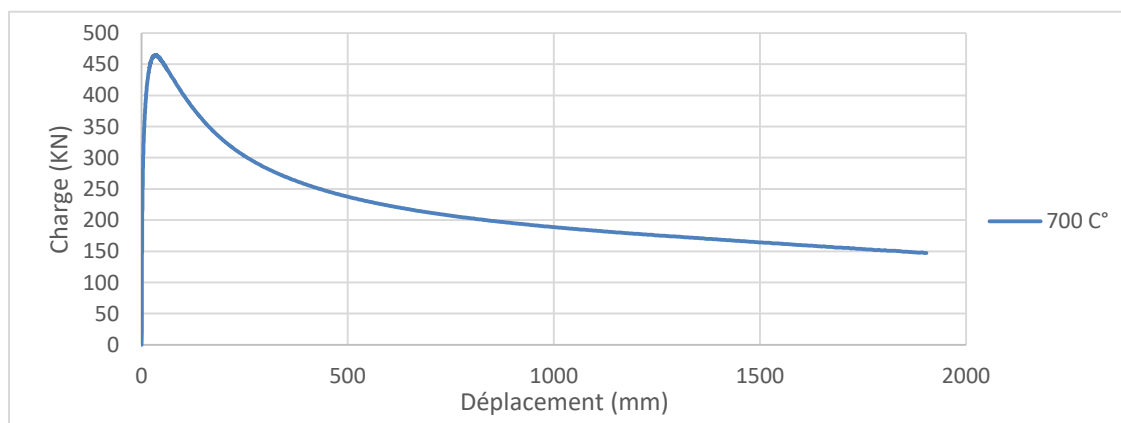


Figure 4-10 Diagramme de déplacement en fonction de charge pour les poutres courbe avec ouverture de 700 C°

- **Analyse et interprétation des courbes**

La courbe montre qu'une poutre avec ouverture à 700 °C résiste à une charge maximale d'environ 450 kN pour un faible déplacement (moins de 500 mm), ce qui reflète une diminution significative de la résistance due aux effets de la température élevée et des ouvertures. À mesure que le déplacement augmente, la valeur diminue progressivement jusqu'à atteindre environ 100-150 kN à 2 000 mm, ce qui indique une forte détérioration des propriétés mécaniques et une déformation accélérée. Cela nécessite une conception avancée utilisant des matériaux robustes et résistants au feu et un positionnement soigneusement planifié des ouvertures pour garantir la stabilité de la poutre.

4.5. Comparaison du déplacement à différentes températures

4.5.1. Cas de la poutre solide

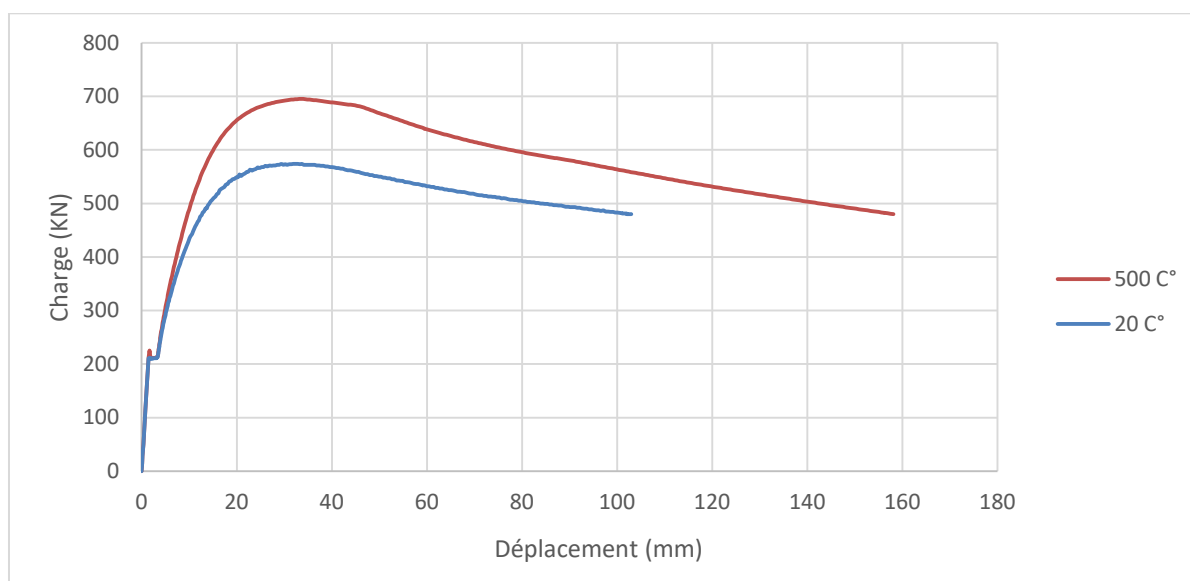


Figure 4-11 Diagramme de déplacement en fonction de charge pour les poutres courbe solide

- **Analyse et interprétation des courbes**

La courbe montre qu'à 20 °C, la poutre supporte la charge maximale (environ 700 kN) pour un faible déplacement (moins de 100 mm), puis diminue progressivement avec le déplacement, reflétant sa résistance élevée dans des conditions normales. À 500 °C, la valeur de charge maximale chute à environ 500 kN et diminue encore plus rapidement, indiquant une

détérioration des propriétés mécaniques due à la température élevée, se stabilisant à 200-300 KN pour les déplacements importants.

4.5.2. Cas de la poutre avec ouverture

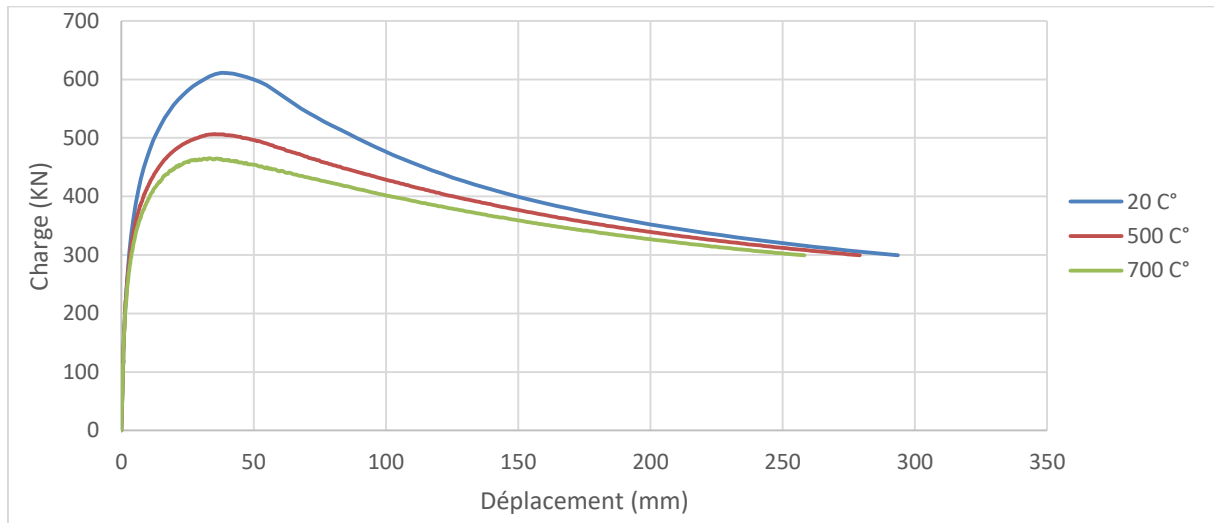


Figure 4-12 Diagramme de déplacement en fonction de charge pour les poutres courbe avec ouverture

- **Analyse et interprétation des courbes**

Les courbes montrent clairement que la température joue un rôle crucial dans la performance des poutres en acier. Elles montrent qu'à 20 °C, une poutre peut supporter une charge maximale (600-650 kN), contre 500 °C (500-550 kN) et 700 °C (400-450 kN). Sa capacité portante diminue significativement avec l'augmentation de la température. Une conception résistante au feu devient nécessaire à 500 °C, et encore plus importante à 700 °C, pour éviter un effondrement prématuré.

4.6. Les contraintes de Von Mises

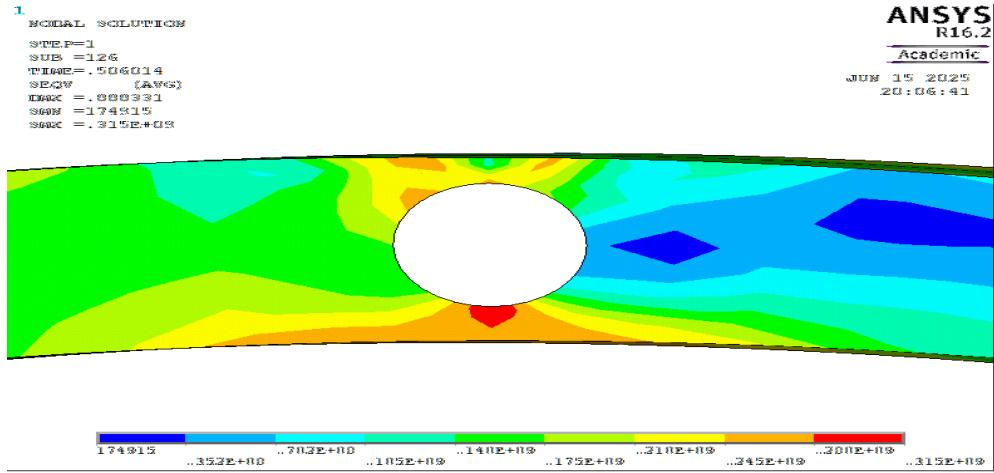


Figure 4-13 Les contraintes de Von Mises de la poutre courbe à 500°C

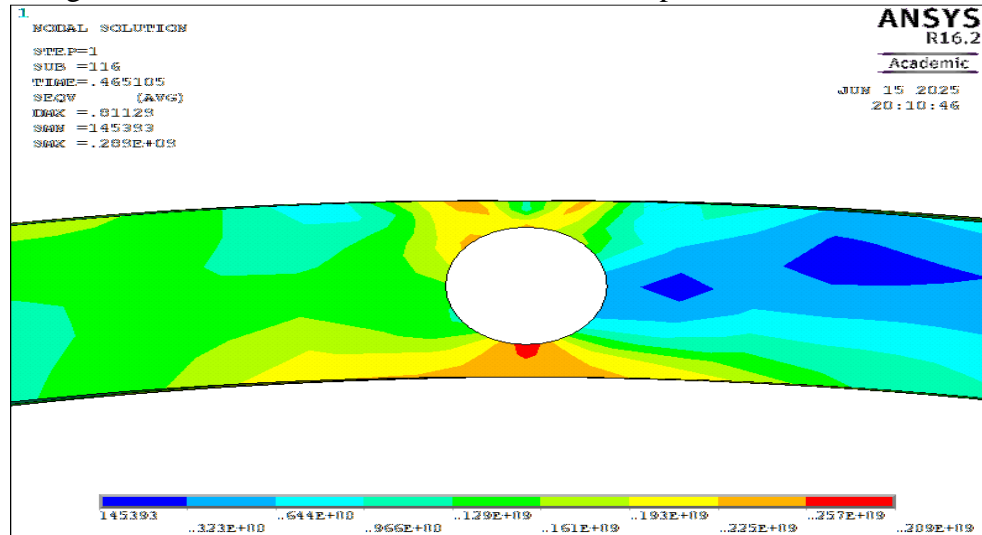


Figure 4-14 Les contraintes de Von Mises de la poutre courbe à 700°C

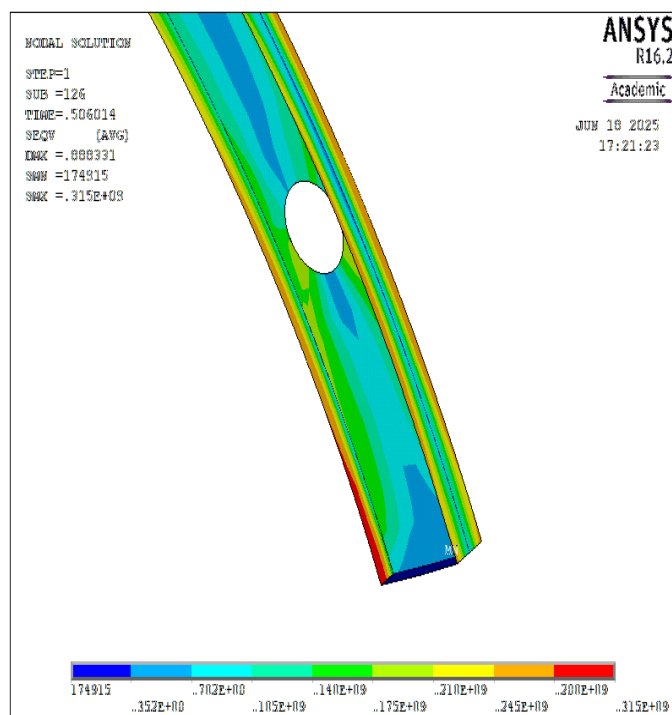


Figure 4-15 Les contraintes de Von Mises de la poutre courbe à 500°C°

4.7. Conclusion

En conclusion, l'analyse révèle que le comportement d'une poutre en acier dépend fortement de la température à laquelle elle est exposée. Elle présente des performances robustes et une capacité portante élevée à température normale (20 °C), supportant des charges allant jusqu'à 700 kN avant déformation plastique. Lorsque la température atteint 500 °C et 700 °C, sa capacité portante diminue progressivement jusqu'à 500-450 kN, respectivement, avec une déformation accélérée et une perte de rigidité. La présence d'ouvertures augmente l'effet thermique négatif, réduisant encore la capacité portante et nécessitant une conception minutieuse. Par conséquent, la protection incendie, telle que les revêtements isolants ou les panneaux résistants au feu, est devenue essentielle pour maintenir l'intégrité structurelle dans des conditions thermiques extrêmes. La répartition des ouvertures et l'évaluation des charges dynamiques doivent également être prises en compte pour garantir la stabilité. Enfin, l'importance d'une conception technique intégrée combinant résistance mécanique et protection thermique est soulignée pour garantir une durée de vie utile longue et sûre des poutres en acier.

CONCLUSION GENERALE

L'analyse du comportement des poutres en acier à profil courbé et à âme ajourée est complexe en condition normale et est connu par les vérifications de l'annexe N[29], l'EC3 partie 1-13 [30] et du guide de conception P355[15]. Cependant, leur exposition à des températures élevées en situation d'incendies, représente un défi majeur en raison de la diminution des propriétés mécaniques de l'acier, en particulier en présence d'ouvertures qui accélèrent le transfert de chaleur et affectent la stabilité structurelle.

On a étudié dans ce projet de fin d'étude le comportement thermique et mécanique des poutres en acier courbées à âme ouverte sous l'effet de températures élevées, en se concentrant sur l'évaluation de l'impact des ouvertures et des différentes températures, 20°C, 500°C, 700°C sur leur capacité portante.

On a développé des modèles numériques en éléments finis à l'aide du logiciel ANSYS qui permet de faire des simulations des poutres courbes solides et avec ouvertures pour des analyses thermiques et mécaniques.

L'analyse thermique en régime transitoire pour deux types d'expositions à savoir, sur trois et quatre faces, a permis de produire des profils de température à différents points de la section. Les résultats révèlent que les températures produites par les formulations de l'EC3 partie 1-2 restent un peu plus élevées par rapport à celles des modèles numériques ANSYS.

L'analyse mécanique révèle que le comportement d'une poutre en acier dépend fortement de la température à laquelle elle est exposée et que la performance en condition normale donne une capacité portante élevée à température normale (20 °C), supportant des charges allant jusqu'à 700 kN avant déformation plastique. Lorsque la température atteint 500 °C et 700 °C, sa capacité portante diminue progressivement jusqu'à 500-450 kN, respectivement.

L'adoption de la protection anti-incendie par le béton a permis une réduction de températures estimée à 350 C° pour une durée d'exposition R60.

On suggère comme travaux futurs l'étude de poutres courbes avec ouvertures multiples en condition normale et l'incorporation d'une protection par le matériau bois au niveau de l'âme.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Pi, Y.L., M.A. Bradford, and B. Uy, *In-plane stability of arches*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(1): p. 105-125.
2. CEN, *Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments*. COMITE EUROPEEN DENORMALISATION., 1993-1-1.
3. CEN, *Eurocode 3: Design of steel structures .part 1-2 : General rules . structures fire design 2004*, committee european de normalization bruxelles, belgium. p. 61.
4. *steelconstruction.info*. Available from :.
5. Steelwork, S.a.K.L., *AMP Castellated Beams*.
6. Amrous, H., N.M. Yossef, and M.H. El-Boghdadi, *Experimental study and structural analysis of tapered steel beams with cellular openings*. Engineering Structures, 2023. **288**: p. 116212.
7. beams, A.a.A., *A new generation of beams with large web openings*, ed. A. Europe2020.
8. chaima, d., *Comportement des Poutres Métalliques à Ouvertures d'Âme à Inertie Variable en Condition Normale et Incendie*, in *Faculté de Génie Civil et d'Architecture 2024*, chlef.
9. BENYETTOU ORIBI, S., B. LAMRI, and A. KADA, *Instability behaviour of steel beams with web openings under extreme fire conditions*, 2023.
10. Silva, J., P. Dalcanal, and L. Mesquita. *Numerical Analysis of Cellular Steel Beams Failure Modes in Fire Conditions*. in *Advances in Fire Safety Engineering*. 2020. Cham: Springer International Publishing.
11. Durif, S., A. Bouchaïr, and O. Vassart, *Validation of an analytical model for curved and tapered cellular beams at normal and fire conditions*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2013. **57**(1): p. 83-95.
13. Barros, R.C., et al. *Advanced numerical evaluation of nonlinear behavior of shallow and non-shallow planar steel arches in fire situation*. in *Structures*. 2025. Elsevier.
14. Kada, A., *Risques Naturels et Technologiques : Risque et l'Ingénierie de la Sécurité Incendie*, 2023, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Laboratoire LISICPE.
15. P355, *DESIGN OF COMPOSITE BEAM WITH LARGE OPENING*
16. *Protection incendie des structures acier*.
17. Lamri, B., et al., *Behavior of cellular beams protected with intumescent coatings*. Fire Research, 2017. **1**(1).
18. Toprac, A.A. and B. Cooke. *An experimental investigation of open-web beams*. 1959.
20. Befikadu, B., K. Zerfu, and E. Agon, *Numerical investigation of elastic-plastic buckling performance of circular arched cellular steel beam using nonlinear finite element analysis method*. Heliyon, 2024. **10**: p. e25292.
21. da Silva, L.V. and L.M. Mesquita, *Elastic lateral-torsional buckling of cellular beams*, in *Structures*2024, Elsevier. p. 106392.
22. Rodrigues, F., et al., *Finite Element Modelling of Steel Beams with Web Openings*. Vol. 06. 2014.
23. Chung, K.F., T.C.H. Liu, and A.C.H. Ko, *Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings*. Journal of Constructional Steel Research, 2001. **57**(5): p. 467-490.
24. Chung, K.F. and R.M. Lawson, *Simplified design of composite beams with large web openings to Eurocode 4*. Journal of Constructional Steel Research, 2001. **57**(2): p. 135-164.

25. El-Dehemy, H., *Static and Dynamic Analysis Web Opening of Steel Beams*. World Journal of Engineering and Technology, 2017. **05**: p. 275-285.
26. Abbas, J., *Behaviour of Steel I Beams with Web Openings*. Civil Engineering Journal, 2023. **9**: p. 596-617.
27. Zewudie, B.B., *Nonlinear Finite Element Analysis and Comparison of In-Plane Strength of Circular and Parabolic Arched I-Section Cellular Steel Beam*. Advances in Civil Engineering, 2022. **2022**(1): p. 4879164.
29. CTICM, *Recommandations pour le dimensionnement des poutres en acier avec ouvertures dans l'âme selon la NF EN 19932015*, Paris CTICM.
30. EC3, *EC3 PARTIE 1-13*.
32. ANSYS Academic research, release 16.2.
33. Guo, Z., et al., *Behaviour of a two-pinned steel arch at elevated temperatures*. Thin-Walled Structures, 2016. **107**: p. 248-256.