

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté à l'université 8 mai 1945 Guelma

Faculté des sciences et de la technologie

Département de génie civil et hydraulique

Spécialité : Génie Civil.

Option : STRUCTURES.

Présentée par : ALBADAREEN MOHEE ALDEEN.

**Contribution to the analysis of slender reinforced concrete columns
subjected to a thermal gradient**

Sous la direction du Professeur : GUENFOUD Mohamed.

Année de présentation : 2023 / 2024.

إهداء

أهدي ثمرة جهدي المتواضع وفرحتي إلى من وهبني الله نعمة وجودهم في حياتي، إلى من بذلاً وقدماً ما لا يمكن أن يرد، من لولاهم ما كنت ولن أكون، إلى أصحاب الكلمات التي سارت بي نحو النجاح، من ساندوا خطاي وأغدقوا دنياي نوراً وحباً.

إلى والدي الحبيب ومن أحمل إسمه بفخر، من أثر من يحب على ما يحب، أول الفضل في نجاحي وجعل رحلتي أسهل وأجمل.

إلى والدتي الحنونة حبيبة القلب وابتسامة الحياة، من لطالما كانت دعواتها عنوان دربي وسراجاً منيراً في طريقي.

إلى أخي الأكبر، من لم يتوانى عن تشجيعي، دعمي وتحفيزي.
إلى أخي الأصغر، من هو صديقي وقريب مني.
إلى وردتي الصغيرة، مهجة القلب وبسمة الدار.

شكراً لكم على كل ما قدمتم، فقد كنتم خير داعم لي في رحلتي.
عسى أن أكون وصلت إلى ما تحبون وبه تفخرون.

شكر وتقدير

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على أشرف الخلق والمرسلين سيدنا
محمد ابن عبد الله النبي الصادق الأمين أما بعد ...

أتوجه بجزيل الشكر والتقدير لأستاذي الفاضل البروفيسور: قنفوذ محمد لفضله
بالإشراف على إنجاز هذه المذكرة وسعة صدره وحرصه الكبير على ان يكون
هذا العمل في صورة كاملة لا يشوبه أي نقص، جعل الله ذلك في ميزان حسناته.

Résumé :

Dans ce mémoire, nous exposons une étude paramétrique de la résistance des poteaux en béton armé élancés soumis à un fort gradient thermique. L'analyse débute en effectuant une étude thermique, par la résolution des équations aux dérivées partielles du transfert de chaleur, afin de déterminer les températures dans chaque maille de discrétisation de la section des poteaux. Après avoir établi les températures, nous pouvons obtenir les caractéristiques physiques et mécaniques du béton et de l'acier pour chaque mailles et à chaque moment (où chaque température). La résistance des poteaux est ensuite analysée mécaniquement en utilisant la méthode des éléments finis, en prenant en considération l'effet du second ordre. Après cela, un certain nombre de poteaux en béton arme de section carrée, chargés axialement, et exposés à un feu normalisé (ISO 834) sur leurs quatre faces. A différents instants, les poteaux sont modélisés à l'aide du logiciel CIM'Feu afin de déterminer leur capacité d'endurance et de résistance, avant d'atteindre le point d'effondrement en raison de leur exposition à des températures élevées. Le comportement des poteaux au feu a été étudié sous l'influence de tous les facteurs et paramètres fondamentaux affectant la résistance de ces poteaux, tels que : l'effet de la géométrie, l'effet du taux d'armature, l'effet de l'enrobage, l'effet de la longueur de flambement, l'effet de la résistance caractéristique du béton, l'effet de la limite élastique des armatures, l'effet de la teneur en eau et l'effet de type de granulats. Grâce aux résultats obtenus, le concepteur de structure peut rapidement prendre des décisions concernant les dimensions des poteaux (section et hauteur) exposés au risque de feu, ainsi que leurs ferrailages.

Mots-clés : Incendie, méthode de différence finies, méthode de éléments fini, Résistance au feu, Flambement.

ملخص:

نقدم في هذه الأطروحة دراسة بارامترية لمقاومة الأعمدة الخرسانية المسلحة النحيلة المعرضة لتدرج حراري قوي. يبدأ التحليل بإجراء دراسة حرارية، وذلك من خلال حل المعادلات التفاضلية الجزئية لانتقال الحرارة، وذلك لتحديد درجات الحرارة في كل شبكة تقديرية لمقطع العمود. بعد تحديد درجات الحرارة يمكننا الحصول على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة والفولاذ لكل شبكة وفي كل لحظة (أو كل درجة حرارة). ومن ثم يتم تحليل قوة الأعمدة ميكانيكياً باستخدام طريقة العناصر المحدودة مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير الدرجة الثانية. بعد ذلك تم نمذجة عدد معين من الأعمدة الخرسانية المسلحة ذات المقطع المربع والمحملة محوريا والمعرضة للحريق المعياري (ISO 834) على أوجهها الأربعة، وفي أوقات مختلفة. يتم نمذجة الأعمدة باستخدام برنامج CIM'Feu لتحديد مدى تحملها وقدرتها على المقاومة، قبل أن تصل إلى نقطة الانهيار نتيجة تعرضها لدرجات حرارة عالية. تمت دراسة سلوك الأعمدة للحريق تحت تأثير كافة العوامل الأساسية والمتغيرات المؤثرة على مقاومة هذه الأعمدة مثل: تأثير ابعاد المقطع، نسبة التسليح، الغطاء، طول الانبعاج، القوة المميزة للخرسانة، حد المرونة للتسليح، المحتوى المائي نوع الركام. بفضل النتائج التي تم الحصول عليها، يستطيع مصمم الهيكل اتخاذ القرارات بسرعة فيما يتعلق بأبعاد الأعمدة (المقطع والارتفاع) المعرضة لخطر الحريق، وكذلك تعزيزها.

كلمات مفتاحية: حريق، طريقة الفروق المحدودة، طريقة العناصر المحدودة، مقاومة الحريق، انبعاج.

Abstract:

In this dissertation, we present a parametric study of the resistance of slender reinforced concrete columns subjected to a strong thermal gradient. The analysis begins by carrying out a thermal study, by solving the partial differential equations of heat transfer, in order to determine the temperatures in each discretization mesh of the column section. After establishing the temperatures, we can obtain the physical and mechanical characteristics of concrete and steel for each mesh and at each moment (or each temperature). The strength of the columns is then analyzed mechanically using the finite element method, taking into consideration the second order effect. After that, a certain number of reinforced concrete column of square section, loaded axially, and exposed to a normalized fire (ISO 834) on their four faces. At different times, the column are modeled using the CIM'Feu software in order to determine their endurance and resistance capacity, before reaching the point of collapse due to their exposure to high temperatures. The behavior of the columns to fire was studied under the influence of all the fundamental factors and parameters affecting the resistance of these columns, such as the section size, reinforcement rate, bedding of the reinforcing bars, buckling length, characteristic resistance of the concrete, the steel elastic limit, water content and aggregate type. The results obtained will help the structural designer to make quick decisions concerning the dimensions of the columns (section and height), which are exposed to the fire, as well as their reinforcement.

Keywords: Combustion, finite difference method, Finite element method, Fire resistance, Buckling.

TABLES DES MATIÈRES

Résume	3
TABLES DES MATIÈRES.....	6
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	10
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS	13
INTRODUCTION GENERALE	15

Chapitre 01 : GENERALITES CONCERNANT LE FEU.

INTRODUCTION :	18
1.1 Les principaux critères de protection contre les incendies	18
1.2 Définition de feu et d'incendie :.....	18
1.3 Évolution d'un incendie :	18
1.3.1 Le triangle du feu :	18
1.3.2 Le développement d'un incendie :	19
1.4 Modélisation et étude numérique des incendies :.....	20
1.5 Méthodes de Prévention et de protection :.....	25
1.6 Actions du feu sur les structures :	27
1.6.1 Action mécaniques :	27
1.6.2 Action thermiques :	28
1.7 Comportement des matériaux à haute température :.....	28
1.7.1 Cas du Béton :	28
1.7.1.1 Résistance du Béton ordinaire :.....	28
1.7.1.2 Déformation du béton :	29
1.7.1.3 Dilatation thermique du béton :.....	30
1.7.1.4 Chaleur spécifique du béton :.....	31
1.7.1.5 Conductivité thermique du béton :.....	32
1.7.2 Cas de l'Acier :.....	32
1.7.2.1 Résistance de l'acier :	32
1.7.2.2 Déformation de l'acier :	33
1.7.2.3 Dilatation thermique de l'acier :.....	34
1.7.2.4 Chaleur spécifique de l'acier :.....	34
1.7.2.5 Conductivité thermique de l'acier :	35

CONCLUSION :	35
Références:	36

Chapitre 02 : LES MODELES D'ETUDE DES POTEAUX EN SITUATION DE FEU.

INTRODUCTION :	38
2.1 Modèles de transfert de chaleur :	38
2.1.1 Rappel sur le principe de transfert de chaleur :	38
2.1.2 Equation de la transmission de la chaleur :	38
2.1.3 Flux de chaleur :	39
2.1.4 Transmission de la chaleur par convection :	39
2.1.5 Transmission de la chaleur par rayonnement :	40
2.1.6 Formulation par différences finies :	40
2.1.6.1 Rappel de la méthode des différences finies :	40
2.1.6.2 Formulation basée sur l'échange de chaleur entre les mailles :	41
2.1.6.3 Formulation en différence finies :	42
2.2 Modèles mécaniques en situation d'incendie :	44
2.2.1 Informations générales concernant le comportement mécanique des structures en cas d'incendie :	44
2.3 Comportement des poteaux en béton armé en cas de feu :	46
2.3.1 Approches simplifiées de calcul :	46
1. La méthode A :	46
2. La méthode B :	48
3. Méthodes avancées de calcul :	49
CONCLUSION :	49
Références :	50

Chapitre 03 : LE LOGICIEL CIM'FEU EC2.

INTRODUCTION :	52
3.1 Hypothèse de calcul :	53
3.2 Les avantages de l'utilisation de CIM'Feu EC2 :	53
3.3 CIM'Feu EC2	53
3.4 Mécanisme et méthode de fonctionnement du programme :	54
3.5 Limites d'emploi du logiciel – Simplifications admises – Astuces d'utilisation :	54
3.6 Calcul des poteaux rectangulaires :	55

3.6.1	Méthode de justification :	55
	Références :	56

Chapitre 04 : ANALYSE DES RESULTATS.

	INTRODUCTION :	58
4.1	Effet de la géométrie.....	59
4.1.1	But :	59
4.1.2	Description :	59
4.1.3	Caractéristiques des poteaux :	59
4.1.4	Étude des résultats :	60
4.1.5	Conclusion :	61
4.2	Effet du taux d'armatures.	62
4.2.1	But :	62
4.2.2	Description :	62
4.2.3	Caractéristique :	62
4.2.4	Étude des résultats :	63
4.2.5	Conclusion :	64
4.3	Effet de l'enrobage.	65
4.3.1	But :	65
4.3.2	Description :	65
4.3.3	Caractéristique :	65
4.3.4	Étude des résultats :	66
4.3.5	Conclusion :	68
4.4	Effet de la longueur de flambement.	69
4.4.1	But :	69
4.4.2	Description :	69
4.4.3	Caractéristique :	69
4.4.4	Étude des résultats :	70
4.4.5	Conclusion :	71
4.5	Effet de la résistance caractéristique du béton.	72
4.5.1	But :	72
4.5.2	Description :	72
4.5.3	Caractéristiques des poteaux :	72
4.5.4	Étude des résultats :	73

4.5.5	Conclusion :	74
4.6	Effet de la limite élastique des armatures.	75
4.6.1	But :	75
4.6.2	Description :	75
4.6.3	Caractéristique :	75
4.6.4	Étude de résultat :	76
4.6.5	Conclusion :	77
4.7	Effet de la teneur en eau.	78
4.7.1	But :	78
4.7.2	Description :	78
4.7.3	Caractéristique :	78
4.7.4	Étude de résultat :	79
4.7.5	Conclusion :	80
4.8	Effet de type de granulats.	81
4.8.1	But :	81
4.8.2	Description :	81
4.8.3	Caractéristique :	81
4.8.4	Étude de résultat :	82
4.8.5	Conclusion :	83
	Références:	84
	CONCLUSION GENERALE :	85
	LISTE DES ANNEXES :	86

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Chapitre 01 :

Figure 1.1 : Triangle du feu.-----	19
Figure 1.2 : Phases de développement d'un incendie.-----	20
Figure 1.3 : Courbe nominale du feu conventionnel ISO834.-----	21
Figure 1.4 : Courbe du feu hydrocarbure.-----	22
Figure 1.5 : Courbe feu extérieur.-----	23
Figure 1.6 : Courbe paramétrique d'un feu de comportement.-----	24
Figure 1.7 : Exemple de feu naturel.-----	25
Figure 1.8 : Exemples d'appareils de protection active.-----	26
Figure 1.9 : Changement de résistance du béton selon la température θ et le type de granulats.-----	29
Figure 1.10 : Modèle mathématique de la relation contrainte-déformation du béton en compression aux températures élevées.-----	29
Figure 1.11 : Dilatation thermique totale du béton.-----	31
Figure 1.12 Chaleur spécifique $C_p(\theta)$ en fonction de la température pour 3 teneurs en eau différentes.-----	31
Figure 1.13 : Conductivité thermique du béton.-----	32
Figure 1.14 : Facteur $K_s(\theta)$ de réduction de la résistance caractéristique (f_{yk}) des armatures.-----	33
Figure 1.15 : La relation contrainte-déformation.-----	33
Figure 1.16 : Dilatation thermique de l'acier.-----	34
Figure 1.17 : Chaleur spécifique de l'acier au carbone.-----	35
Figure 1.18 : Conductivité thermique de l'acier au carbone.-----	35
Table 1.1 : Valeurs (température – temps) pour la courbe ISO834.-----	21
Table 1.2 : Valeurs (température – temps) pour le feu hydrocarbure.-----	22
Table 1.3 : Valeurs (température – temps) pour le feu extérieur.-----	23
Table 1.4 : Valeurs (température – temps) pour le feu paramétrique.-----	24
Table 1.5 : Valeurs des facteurs ψ pour les bâtiments.-----	27
Table 1.6 : Valeurs des paramètres $f_{c,\theta}$, $\varepsilon_{cl,\theta}$ pour béton.-----	30

Chapitre 02 :

Figure 2. 1: Discrétisation de la section en éléments discrets.	41
Figure 2. 2 : organigramme de résistance au feu.	44
Figure 2. 3 : Différentes approches d'analyse pour le comportement mécanique des structures en situation d'incendie.	45
Figure 2. 4 : Analyse mécanique par éléments et analyse globale d'une structure sous l'influence d'un feu.	45

Figure 2. 5: Les effets du second ordre et la réduction des caractéristiques mécaniques du béton et aciers.....	48
---	----

Table 2. 1 : Résistance au feu des poteaux en béton armé à section rectangulaire ou circulaire (EN 1992-1-2 : Tab.5.2b).....	48
--	----

Chapitre 03 :

Figure 3. 1 : Interface du logiciel CIM'Feu.....	52
Figure 3. 2 : Les types d'éléments étudiés par le CIM'Feu.	54
Figure 3. 3 : Les Deux modes de saisie des armatures.....	54
Figure 3. 4 : section d'un poteau.....	55
Figure 3. 5 : Relation effort axial et moment de courbure.....	55
Figure 3. 6 : Le diagramme contrainte-déformation.....	56

Chapitre 04 :

Figure 4. 1 : Deux poteaux en situation d'incendie.....	58
Figure 4. 2 : Un poteau en béton arme soumise à un effort de 100N/Cm à une température de 1000°C.	58
Figure 4. 3 : La résistance au feu des poteaux dans le temps.	60
Figure 4. 4 : L'effet de différentes dimensions des poteaux sur la capacité de ces poteaux à résister au feu dans avec 30 min.	61
Figure 4. 5 : La résistance au feu des poteaux dans le temps.	63
Figure 4. 6 : L'effet de différents diamètres de barres d'armature sur la capacité des poteaux à résister au feu pour 30 min.	64
Figure 4. 7 : La résistance au feu des poteaux dans le temps.	66
Figure 4. 8 : L'effet de différents emplacements des barres d'armature sur la capacité des poteaux à résister au feu.	67
Figure 4. 9 : L'effet de différents emplacements des barres d'armature sur la capacité des poteaux à résister au feu.	67
Figure 4. 10 : L'effet de différents emplacements des barres d'armature sur la capacité des poteaux à résister au feu.	68
Figure 4. 11 : La résistance au feu des poteaux dans le temps.....	70
Figure 4. 12 : Résistance au feu pour différentes longueurs de flambement des poteaux pendant une période de 30 min.	71
Figure 4. 13 : La résistance au feu du poteau dans le temps.	73
Figure 4. 14 : L'effet de différents types des résistances caractéristique du béton sur la résistance des poteaux au feu avec 30 min.....	74
Figure 4. 15 : La résistance au feu du poteau dans le temps.	76
Figure 4. 16 : L'effet des deux limites élastiques des armatures sur la résistance au feu du poteau avec 30 min.....	77
Figure 4. 17 : La résistance au feu du poteau dans le temps.	79

Figure 4. 18 : L'effet du la teneur en eau sur la résistance au feu du poteau avec 30 min. ----	80
Figure 4. 19 : La résistance au feu des poteaux dans le temps. -----	82
Figure 4. 20 : L'effet du la type de granulâtes sur la résistance au feu des poteaux avec 30 min. -----	83
Table 4. 1 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique.-----	59
Table 4. 2 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la largeur de la section. ----	60
Table 4. 3 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique.-----	62
Table 4. 4 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la section d'armature. ----	63
Table 4. 5 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique.-----	65
Table 4. 6 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de l'enrobage. -----	66
Table 4. 7 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique.-----	69
Table 4. 8 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la longueur de flambement. -----	70
Table 4. 9 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique.-----	72
Table 4. 10 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la résistance caractéristique du béton. -----	73
Table 4. 11 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique. -----	75
Table 4. 12 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la nuance des armatures.-	76
Table 4. 13 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique. -----	78
Table 4. 14 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la teneur en eau.-----	79
Table 4. 15 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique. -----	81
Table 4. 16 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de type de granulats.-----	82

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS :

- **Er** : L'enrobage.
- **N** : L'effort normal.
- **t** : Temps en minutes.
- **T** : Température en [K].
- **As** : Section d'armature.
- **ρ** : Masse volumique [kg/m^3].
- **Lf** : Longueur de flambement.
- **C** : Chaleur spécifique [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$].
- **B** : Largeur de la section de poteau.
- **Q** : Chaleur interne générée [W/m^3].
- **Ys** : La limite élastique des armatures.
- **Yc** : La résistance caractéristique du béton.
- **hc** : Le coefficient de convection [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$].
- **λ** : Conductivité thermique du milieu considéré [W/mK].
- **σ** : La constante de Boltzmann [$5 \cdot 68 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$].
- **a** : Distance de l'axe des Barres d'acier longitudinales au parement.
- **ω** : Le rapport mécanique d'armatures à température normale.
- **Θ_g** : Température des gaz dans le coKN.m rtiment en C° .
- **Ed** : Effet de calcul des actions à température normale.
- **Ed_{fi}** : Effet de calcul des actions en situation d'incendie.
- **E_{a, θ}** : Pente du domaine élastique linéaire.
- **G_{k,i}** : Valeur caractéristique des actions permanentes.
- **Q_{k,1}** : Action variable principale caractéristique.
- **Q_{k,i}** : Valeur caractéristique des actions variables d'accoKN.m gnement.
- **$\psi_{1,1}$** : Facteur pour valeur fréquente d'une action variable.
- **$\psi_{2,1}$** : Facteur pour valeurs quasi-permanentes des actions variables.
- **$\psi_{2,j}$** : Coefficient de pondération pour la valeur quasi-permanente d'une action variable.
- **f_{c, θ}** : La résistance à la compression.
- **f_{y, θ}** : Limite d'élasticité efficace.
- **f_{p, θ}** : Limite de proportionnalité.
- **f_{yk}** : La résistance caractéristique des armatures.

- $\epsilon_{p,\theta}$: Déformation à la limite de proportionnalité.
- $\epsilon_{y,\theta}$: Déformation plastique.
- $\epsilon_{t,\theta}$: Déformation limite en élasticité.
- $\epsilon_{u,\theta}$: Déformation ultime.
- ϵ_p : L'émissivité relative globale entre le milieu ambiant et la paroi de l'élément.
- $\epsilon_{e1,\theta}$: La déformation.
- $C_p(\theta)$: Chaleur spécifique.
- $K_s(\theta)$: Facteur de réduction.
- Δx_i : La discrétisation spatiale suivant x .
- $\frac{\partial T}{\partial n}$: La dérivée normale de la température.
- μ_{fi} : Niveau de chargement de calcul en situation d'incendie.
- $\eta_{fi,t}$: Le niveau de chargement pour la situation d'incendie .
- $\ell_{o,fi}$: La longueur efficace d'un poteau en condition d'incendie.
- $\gamma_{Q,1}$: Le facteur partiel pour l'action variable principale 1.
- α_{cc} : Le facteur de résistance à la compression.

INTRODUCTION GENERALE

Durant leur période de fonctionnement, les éléments structurels sont exposés à de nombreuses conditions qui diffèrent des considérations de conception, ce qui entraîne un impact sur leur résistance, leur endurance et leur persévérance. De grands efforts ont été déployés dans de nombreuses recherches pour étudier le comportement des éléments exposés au feu. Quant aux poteaux, même s'ils ne constituent qu'un petit pourcentage de la taille et des éléments de la structure, ils peuvent être considérés comme le cœur de structure, car ils jouent un rôle essentiel dans sa stabilité.

Les incendies sont l'une des catastrophes auxquelles font face les éléments structurels, y compris les poteaux. Car leur exposition au feu, malgré leur grande résistance et leur dureté, affaiblit les caractéristiques mécaniques des matériaux qui les constituent, entraînant un écaillage progressif de leurs couches jusqu'à ce que le point d'effondrement soit atteint. A ce moment, le bâtiment ou la structure s'effondre, entraînant de graves dommages matériels et, pire encore, des pertes de vies humaines.

La température à l'intérieur de la section de béton est considérablement inférieure à la température de surface en raison du faible coefficient de diffusion de la chaleur. Par conséquent, l'écaillage est limité aux couches superficielles du béton, à moins que l'incendie ne dure plusieurs heures, ce qui entraîne une diminution des caractéristiques physiques et mécaniques du béton et de l'acier.

Le but de cette étude concerne une contribution à l'analyse des poteaux en béton armé élancés soumis à un gradient thermique. Le mémoire est constitué de : des résumés, une introduction générale, quatre chapitres et une conclusion générale.

Chapitre 01 : Ce chapitre couvre des informations générales relatives aux incendies et aux feux, à leurs formes et à la manière dont ils se forment, ainsi qu'aux voies et moyens de protection lorsqu'ils se produisent et à la réduction de leurs risques. Il explique également le comportement du béton et de l'acier après avoir été exposés au feu (sous l'influence de températures élevées).

Chapitre 02 : Ce chapitre aborde le flux de chaleur et des méthodes de transfert entre les milieux continus, puis discute en détail de la méthode des différences finies et du mécanisme de son application aux sections de poteaux. Il étudie ensuite le comportement mécanique et

thermique de la structure et des poteaux en béton armé lorsqu'ils sont exposés au feu en cas d'incendie.

Chapitre 03 : Ce chapitre explique de manière simplifiée le logiciel CIM'Feu et ses avantages, ainsi que son mécanisme, ses hypothèses de calcul, son principe de fonctionnement et son rôle dans la réalisation des études de résistance des poteaux.

Chapitre 04 : Dans ce chapitre, le comportement mécanique et thermique de 34 poteaux en béton armé est étudié par prédiction numérique de leur comportement à différentes périodes à l'aide du logiciel CIM'Feu et conformément à la réglementation Eurocode 2.

Le présent travail a fait l'objet de deux communications. La première est acceptée au 12th international conference on applied analysis and mathematical modelling, 19-23 July, 2024, Istanbul, Turkey.

La deuxième est en cours pour ISCMCE-2024, 4th International Symposium on Construction Management and Civil Engineering, Novembre 04-05, 2024 Skikda, Alegria.

Ce manuscrit se termine par une conclusion général synthétisant les principaux résultats issus de cette modélisation.

CHAPITRE 1

GENERALITES CONCERNANT LE FEU.

INTRODUCTION :

Chaque année, des millions de personnes perdent la vie en raison des incendies, ainsi que des dommages matériels importants sont constatés. Les buts de la sécurité contre les incendies [1] sont de garantir une protection efficace contre les dangers d'incendie pour les individus et les biens, et plus spécifiquement, ils portent sur :

- La préservation des bâtiments voisins.
- La préservation de l'intégrité de la structure.
- La préservation de la vie des services d'urgence.
- La préservation des vies des résidents et/ou des occupants de l'édifice.

1.1 Les principaux critères de la protection contre les incendies sont :

- Prévenir la diffusion du feu.
- Limiter la progression de l'incendie.
- Faciliter l'action du personnel des pompiers.
- Garantir une évacuation rapide des personnes en toute sécurité.

1.2 Définition de feu et d'incendie :

Un feu c'est une combustion. Il est présent dans des fours et des chaudières sous forme de combustion régulée. En ce qui concerne l'incendie, il est un feu non maîtrisé, ni dans le temps, ni dans l'espace. La caractéristique d'un incendie est de pouvoir s'étendre rapidement et d'occasionner des dégâts généralement importants [2].

1.3Évolution d'un incendie :

1.3.1 Le triangle du feu :

Le triangle [3] du feu est un modèle simple pour comprendre les éléments nécessaires pour la plupart des combustions et incendies. Pour qu'un feu (une combustion) prenne naissance, trois conditions doivent être réunies simultanément :

- **Présence d'un combustible** : Il s'agit de la matière qui est susceptible de brûler. Ce peut être un solide (bois, papier) formant des braises, un liquide (diesel, essence) ou solide liquéfiable, un gaz (propane, butane, gaz naturel), un métal ou des huiles de cuisson.
- **Présence d'un carburant** : il est la combinaison qui permet avec un autre corps la combustion : l'oxygène, le chlorate. la plupart du temps, il s'agit de l'air ambiant et plus particulièrement de l'un de ses composants (le dioxygène).
- **source d'inflammation** : l'énergie minimum nécessaire au démarrage de la combustion. (une flamme, un arc électrique, une étincelle). On peut souvent représenter

ces trois éléments graphiques sous la forme d'un triangle connu sous le nom de triangle du feu.

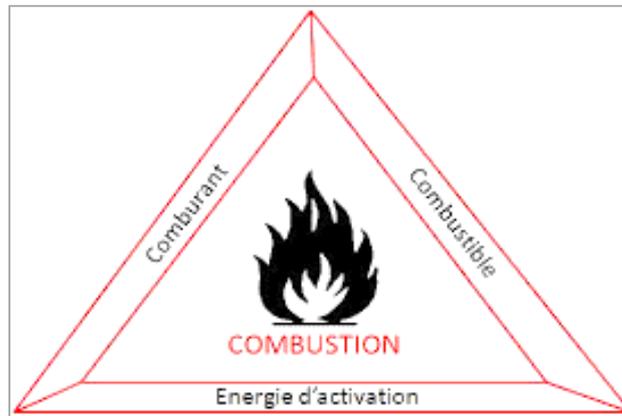


Figure 1.1 : Triangle du feu.

1.3.2 Le développement d'un incendie :

Un feu comprend une période de développement où la température augmente, puis une période de décroissance où cette température baisse [3]. La **fig.1.2** présente les caractéristiques d'un incendie réel, qui incluent :

1. Une phase couvant :

Un feu qui couve à une température basse ambiante, avec une durée souvent difficile à déterminer.

2. Une phase de croissance appelée [pré-flashover], (feu localisé) :

La durée de cette étape est essentiellement dépend des caractéristiques du combustible. Le feu demeure localisé jusqu'à ce qu'il y ait probablement une généralisation du feu.

3. Un [flashover], (feu généralisé) :

C'est un feu étendu. En général, cette étape est très courte.

4. Une phase de [post flashover] :

Cette étape est celle d'un incendie généralisé dont la durée varie en fonction de la charge calorifique et de la ventilation.

5. Une phase décroissante :

La violence du feu décroît avec la disparition progressive du combustible.

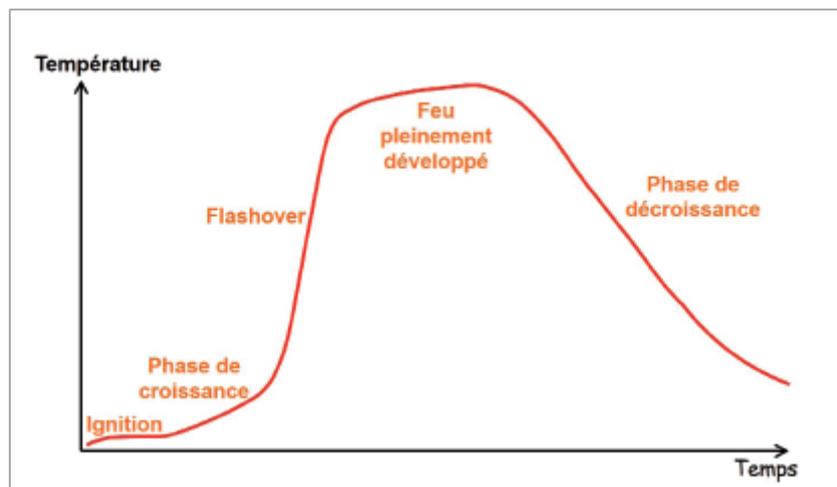


Figure 1.2 : Phases de développement d'un incendie.

1.4 Modélisation et étude numérique des incendies :

On peut représenter un incendie de la manière la plus simple en utilisant des courbes nominales, c'est-à-dire une relation de variation de la température des gaz au fil du temps [4]. Les courbes les plus couramment utilisées ont été établies à partir de l'expérience sur des feux réels, Ils sont les suivants :

1. Le feu ISO834 normalisée :

Le feu conventionnel se distingue par une augmentation continue de la température ambiante au fil du temps. En laboratoire généralement, on utilise une courbe logarithmique pour représenter le feu. La durée de résistance au feu n'est pas une mesure précise de la durée réelle pendant laquelle une composante (un élément structurel) de bâtiment est résistant à un incendie. Elle sert de coKN.m raison pour déterminer la raideur d'un incendie auquel la composante peut faire face.

La courbe standard ISO834 est représentée par, voir **Tab.1.1** et **fig.1.3** :

$$\theta_g = 20 + 345 * \log_{10}(8t + 1) \quad (1.1)$$

Ou :

θ_g : Température des gaz dans le coKN.m rtiment en $^{\circ}\text{C}$.

t : Temps en minutes.

Temps (min)	Température (C°)
0	20
5	576.4104306
10	678.4273315
15	738.5609528
30	841.7958797
60	945.3400513
90	1005.987666
120	1049.039569
180	1109.739073
240	1152.816941
300	1186.235295
360	1213.542424

Table 1.1 : Valeurs (température – temps) pour la courbe ISO834.

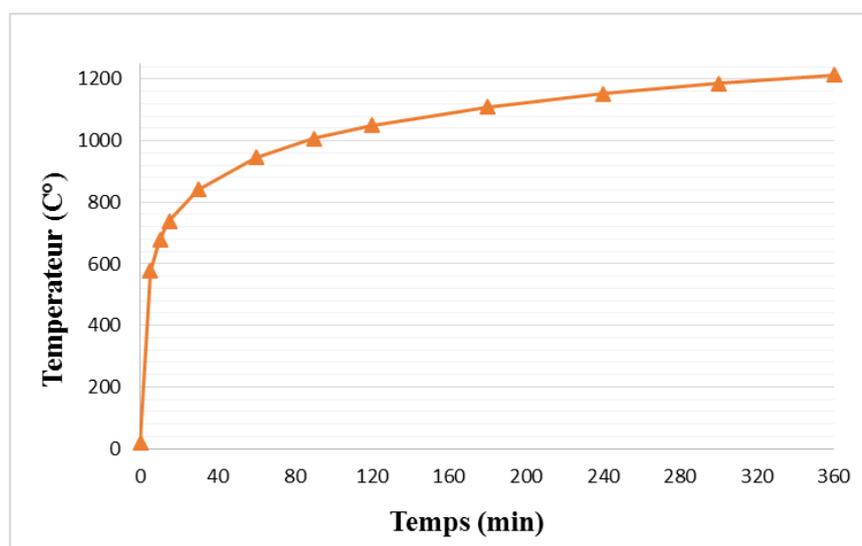


Figure 1.3 : Courbe nominale du feu conventionnel ISO834.

2. Feu hydrocarbure :

Créé dans les années 70 par la société pétrolière Mobil, il montre une hausse de température très rapide, de 900 °C dans les 5 premières minutes et un plateau à 1100 °C pour la suite du temps. L'objectif de l'étude était de développer une méthode de test concernant l'évaluation des matériaux de protection vis-à-vis des feux dans les complexes pétroliers. La courbe température-temps des feux hydrocarbures est représentée par l'équation (2), le Tab.1.2 et la fig.1.4 :

$$\theta_g = 20 + 1080 * (1 - 0.325 * e^{-0.167t} - 0.675 * e^{-2.5t}) \quad (1.2)$$

Temps (min)	Température (C°)
0	20
5	947.7073403
10	1033.92528
15	1071.331865
30	1097.658513
60	1099.98438
90	1099.999896
120	1099.999999
180	1100
240	1100
300	1100
360	1100

Table 1.2 : Valeurs (température – temps) pour le feu hydrocarbure.

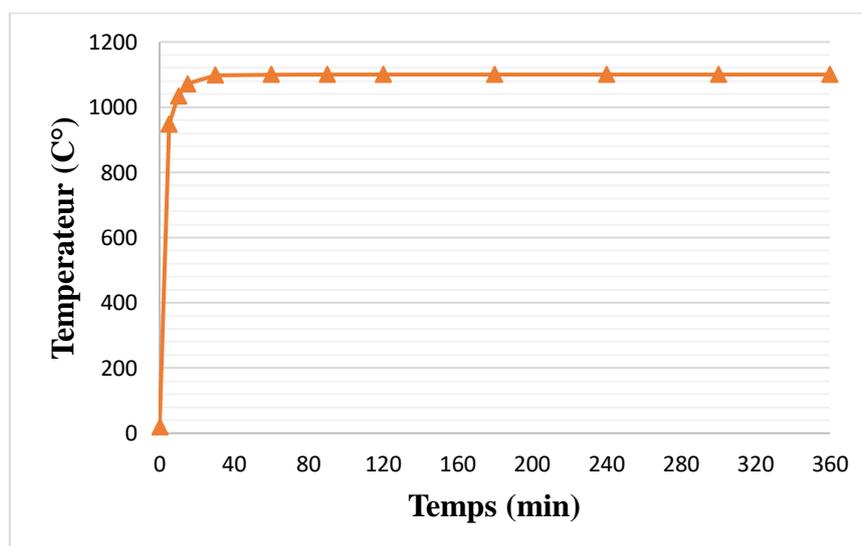


Figure 1.4 : Courbe du feu hydrocarbure.

3. Feu extérieur :

Quand on étudie la résistance au feu d'une structure à l'extérieur, les températures des matériaux du bâtiment seront plus proches des températures d'incendie correspondantes, cela permet d'utiliser une courbe d'incendie connue par courbe « d'incendie extérieur ». La courbe de feu extérieure présente un plafond de température de 680 C°, ce qui est nettement inférieur à la courbe ISO834. Elle est directement appliquée de l'intérieur du coKN.m rtiment sollicitée au feu en question ou à un coKN.m rtiment situé au-dessous ou à côté de la face sollicitée par le feu. L'équation suivante, le **Tab.1.3** et le **fig.1.5** montrent l'évolution de feu extérieur :

$$\theta_g = 20 + 660 * (1 - 0.687 * e^{-0.32t} - 0.313 * e^{-3.8t}) \quad (1.3)$$

Temps (min)	Température (C°)
0	20
5	588.4560797
10	661.5176015
15	676.2684681
30	679.9692904
60	679.9999979
90	680
120	680
180	680
240	680
300	680
360	680

Table 1.3 : Valeurs (température – temps) pour le feu extérieur.

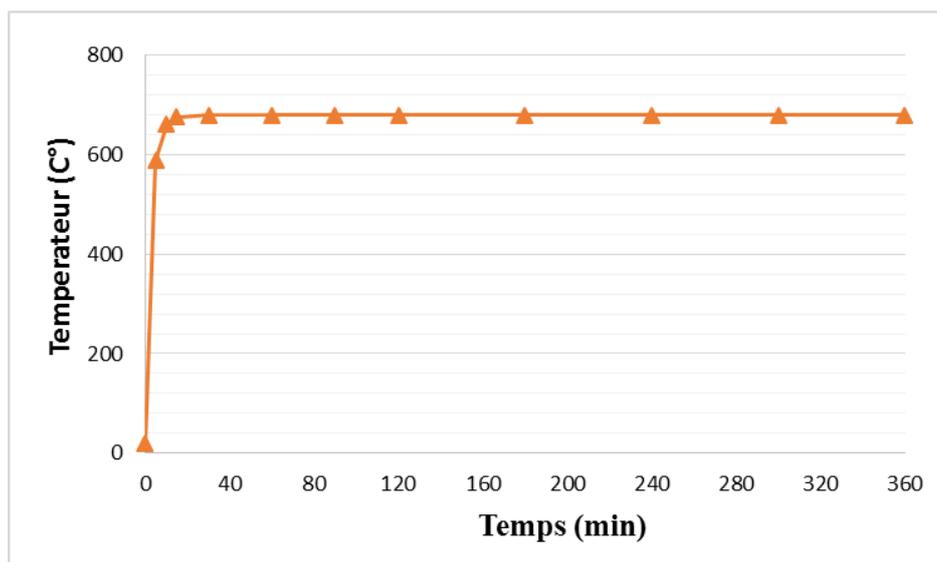


Figure 1.5 : Courbe feu extérieur.

4. Feu paramétrique :

Les feux paramétriques sont une méthode facile pour tenir en considération d'importants phénomènes physiques qui peuvent avoir un impact sur la progression d'un incendie dans un bâtiment. Comme les feux précédents, ils consistent en la détermination d'une courbe température-temps, mais ces courbes prennent en compte certains paramètres visant à rendre certains aspects de la réalité idéalisés. L'hypothèse des feux paramétriques est que la température est uniforme dans le bâtiment. Ce qui limite leur champ d'application aux conditions de [flashover] dans des bâtiments de dimensions moyennes. Cependant, ils représentent un pas important vers la prise en compte de la nature d'un feu par rapport aux feux

ISO834. La courbe température-temps des feux paramétriques est représentée par l'équation, le **Tab.1.4** et la **fig.1.6** :

$$\theta_g = 20 + 1325 * (1 - 0.324 * e^{-0.2t} - 0.204 * e^{-0.2t} - 0.472 * e^{-19t}) \quad (1.4)$$

Temps (min)	Température (C°)
0	645.4
5	1187.069356
10	1286.900563
15	1323.626412
30	1343.935872
60	1344.997362
90	1344.999993
120	1345
180	1345
240	1345
300	1345
360	1345

Table 1.4 : Valeurs (température – temps) pour le feu paramétrique.

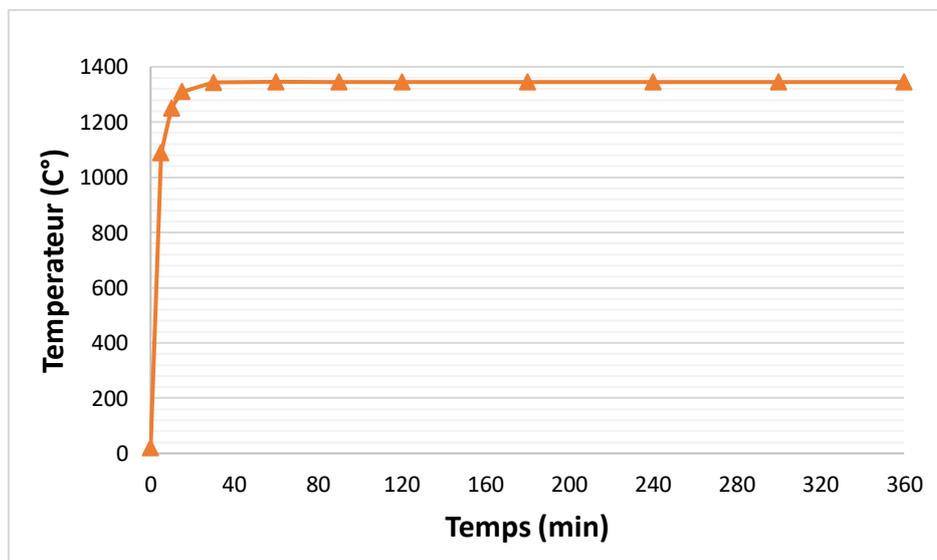


Figure 1.6 : Courbe paramétrique d'un feu de coKN.m rtiment.

5. Feu réel :

Il a pour but la détermination des courbes températures naturelle-temps pour un coKN.m rtiment particulier. Si l'approche basée sur la performance est appliquée, on vérifie la capacité portante ou la capacité de coKN.m rtimentage en alternative à la méthode mentionnant les

classes en utilisant la courbe naturelle température-temps. Cette courbe naturelle température-temps se détermine par les modèles suivant comme suit **Fig.1.7** :

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

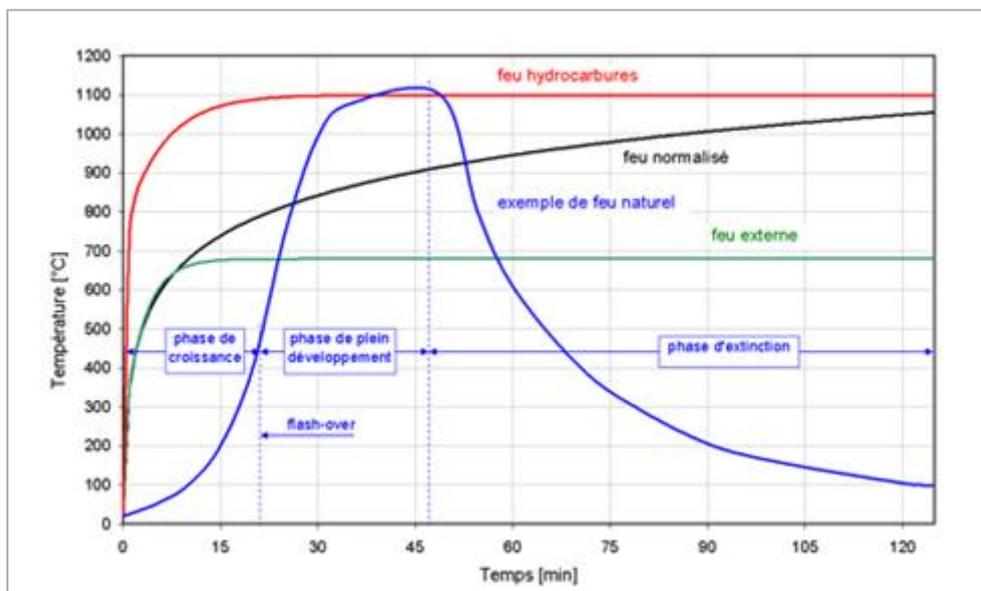


Figure 1.7 : Exemple de feu naturel.

1.5 Méthodes de Prévention et de protection :

Il y a toujours un risque d'incendie car il est impossible d'utiliser uniquement des produits incombustibles dans les bâtiments. Il est donc capital de respecter et de mettre en place des mesures et des méthodes de prévention appropriées [5], ainsi que de les prendre en compte dans la conception du bâtiment, pour réduire et maîtriser le risque d'incendie.

La protection contre l'incendie se subdivise en deux catégories :

- **La Prévention active :**

Les premières protections sont dites "actives" lorsqu'elles utilisent des équipements dynamiques tels que la détection, les alarmes, le désenfumage et les sprinklers, ou lorsqu'elles impliquent l'intervention humaine pour éteindre le début d'incendie (**RIA : Robinet d'Incendie Arme**). Le but de cette approche de prévention est de faciliter l'évacuation des individus et de faciliter l'intervention rapide des secours. Le feu doit être détecté rapidement afin d'être combattu de manière efficace. Il est essentiel que toutes les mesures de protection actives soient performantes lors des deux premières phases de développement du feu.

Nous exposons quelques appareils de protection active :

- Les sprinklers, un réseau d'extinction automatique.
- Les détecteurs de fumée, de chaleur ou de flammes par action sonore.
- Les instructions de sécurité et de balisage permettent de faciliter l'évacuation des occupants.
- Les moyens de lutte, tels que les extincteurs ou les RIA, permettent d'attaquer immédiatement le feu.
- Le système de désenfumage évacue les fumées toxiques, facilite l'évacuation des occupants sans dommages et l'intervention des secours.



Figure 1.8 : Exemples d'appareils de protection active.

- **La Prévention passive :**

La protection passive englobe les mesures prises afin de réduire les conséquences destructrices du feu, comme :

- Capacité des matériaux ou des dispositifs coupe-feu et pare-flammes à résister au feu et l'emploi de matériaux avec différentes réactions ou résistances au feu.
- Conception offrant une résistance au feu conformément aux réglementations.

1.6 Actions du feu sur les structures :

1.6.1 Action mécaniques :

En situation d'incendie, les charges mécaniques appliquées aux structures peuvent être obtenues en utilisant les formules suivantes [6] :

$$\sum_{i \geq 1} G_{K,i} + (\Psi_{1,1} \text{ ou } \Psi_{2,1}) Q_{K,1} + \sum_{j \geq 2} \Psi_{2,j} Q_{K,j} \quad (1.5)$$

Où :

$G_{k,i}$: Valeur caractéristique des actions permanentes.

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

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

$\Psi_{1,1}$: Facteur pour valeur fréquente d'une action variable.

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

$\Psi_{2,j}$: Coefficient de pondération pour la valeur quasi-permanente d'une action variable.

Les valeurs recommandées de $\Psi_{1,1}$ et $\Psi_{2,1}$ sont données dans le tableau suivant :

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

Table 1.5 : Valeurs des facteurs ψ pour les bâtiments.

Le niveau de chargement pour la situation d'incendie $\eta_{fi,t}$ est une autre notion fréquemment employée dans les méthodes de calcul des Eurocodes, qui se définit comme :

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{d,fi}}{E_d} \quad (1.6)$$

Avec :

E_d : Effet de calcul des actions à température normale.

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

$$\eta_{fi,t} = G_K + \Psi_{fi,1} Q_{k,1} / \gamma_G G_K + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \quad (1.7)$$

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

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

1.6.2 Action thermiques :

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

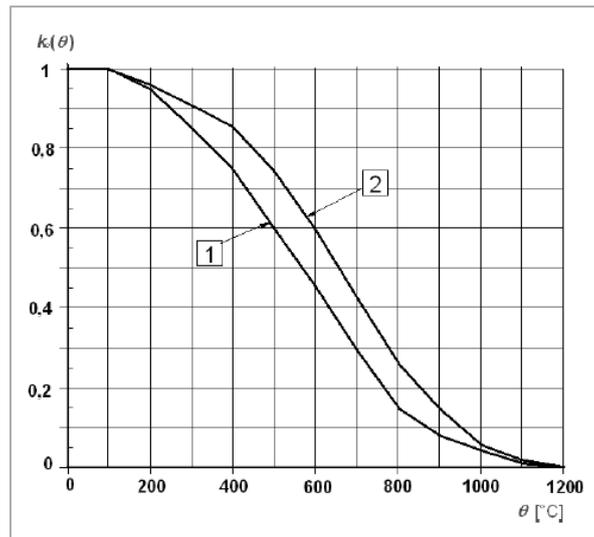
- les modèles de zones.
- les courbes nominales.
- les courbes paramétriques.
- les modèles **CFD** (Computational Fluid Dynamics).

1.7 Comportement des matériaux à haute température :

1.7.1 Cas du Béton :

1.7.1.1 Résistance du Béton ordinaire :

En général, le béton est composé de **60 % à 80 %** de granulats (calcaires ou siliceux) en masse. Selon la **fig.1.9**, on observe une diminution du facteur de réduction de la résistance caractéristique du béton siliceux par rapport au béton à base de calcaire, ce qui indique que la résistance du béton siliceux est inférieure à celle du béton à base de calcaire.



Courbe 1 : béton de densité normale réalisé avec des granulats siliceux.

Courbe 2 : béton de densité normale réalisé avec des granulats calcaires.

Figure 1.9 : Changement de résistance du béton selon la température θ et le type de granulats.

1.7.1.2 Déformation du béton :

Les caractéristiques de résistance et de déformation du béton sous contrainte uni axiale à températures élevées sont déterminées en utilisant la relation contrainte-déformation présentée dans la **fig.1.10**.

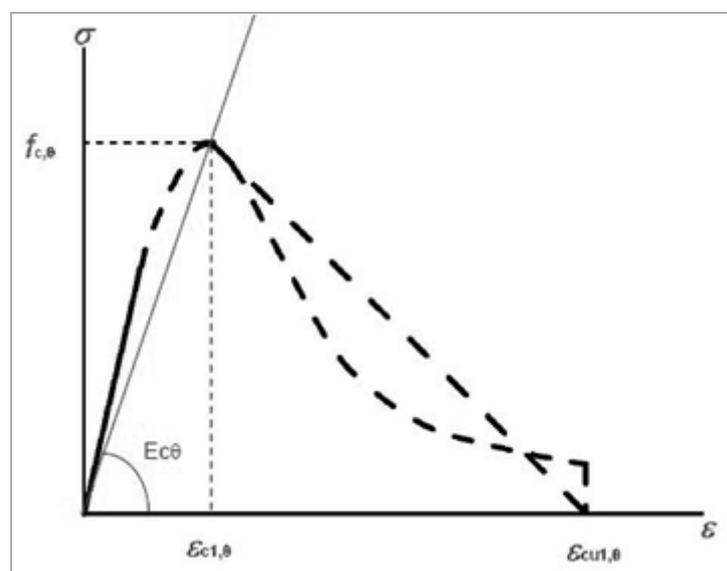


Figure 1.10 : Modèle mathématique de la relation contrainte-déformation du béton en compression aux températures élevées.

La relation contrainte-déformation est définie par deux paramètres :

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

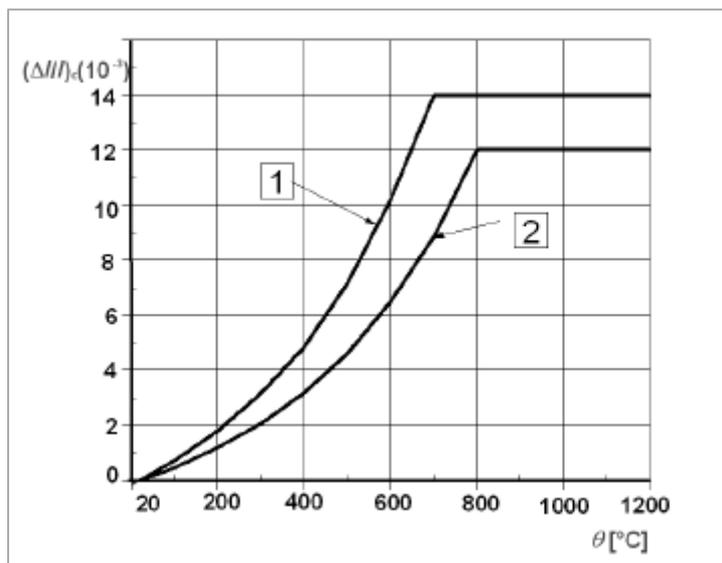
Le **Tab.1.6** présente les valeurs de chacun de ces paramètres en fonction des températures du béton. Il est faisable d'utiliser une interpolation linéaire pour les valeurs de température intermédiaires.

Température du béton (θ)	Granulats siliceux			Granulats calcaires		
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
[C°]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-	0,00	-	-

Table 1.6 : Valeurs des paramètres $f_{c,\theta}$, $\epsilon_{c1,\theta}$ pour béton.

1.7.1.3 Dilatation thermique du béton :

La **fig.1.11** présente la déformation thermique $\epsilon_{c(\theta)}$ du béton en fonction de la température.



Courbe 1 : granulats siliceux.

Courbe 2 : granulats calcaires.

Figure 1.11 : Dilatation thermique totale du béton.

Selon la **fig.1.11**, le béton à granulats calcaires se dilate lentement progressivement avec l'augmentation de la température, jusqu'à atteindre **800 C°**, où la dilatation reste constante malgré l'augmentation de la température.

1.7.1.4 Chaleur spécifique du béton :

De la même manière, il en est de même pour le béton siliceux, mais avec un allongement qui atteint le niveau de **14. 10⁻³** puis se stabilise. La **fig.1.12** montre comment la chaleur spécifique $c_p(\theta)$ du béton varie en fonction de la température et de la teneur en eau.

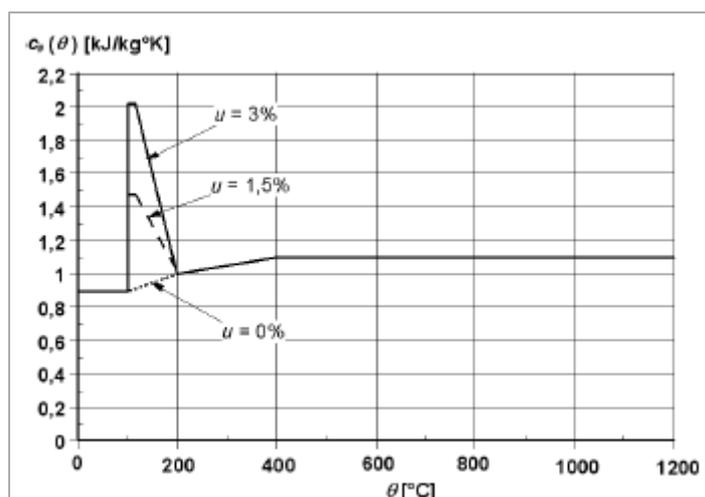
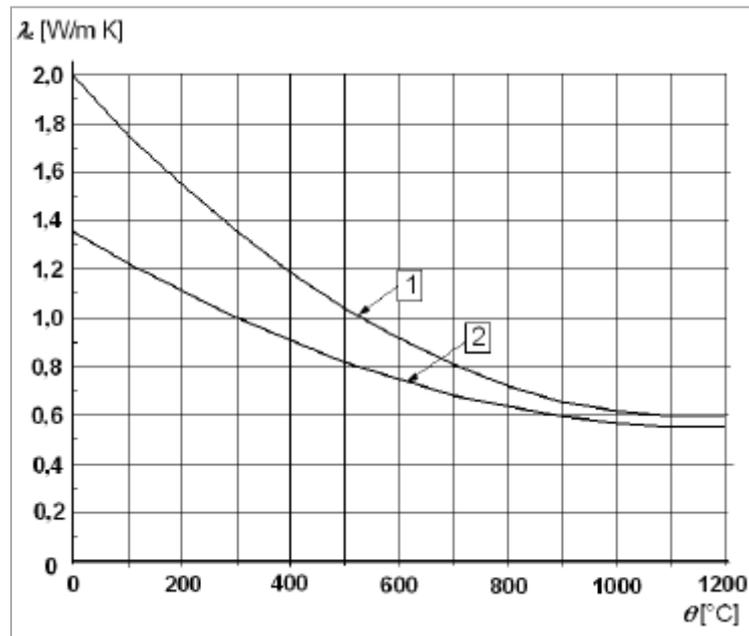


Figure 1.12 Chaleur spécifique $C_p(\theta)$ en fonction de la température pour 3 teneurs en eau différentes.

Le pic observé entre **100** et **200 °C** correspond à la température requise pour évaporer l'eau présente dans le béton. Ensuite, la chaleur spécifique s'accroît linéairement jusqu'à atteindre **1,5 kJ/kg C°** à **400C°**, où elle se stabilise.

1.7.1.5 Conductivité thermique du béton :

La **fig.1.13** montre comment les limites supérieure et inférieure de **conductivité thermique λ_c** du béton varient en fonction de **la température θ (C°)**.



Courbe 1 : Limite supérieure.

Courbe 2 : Limite inférieure.

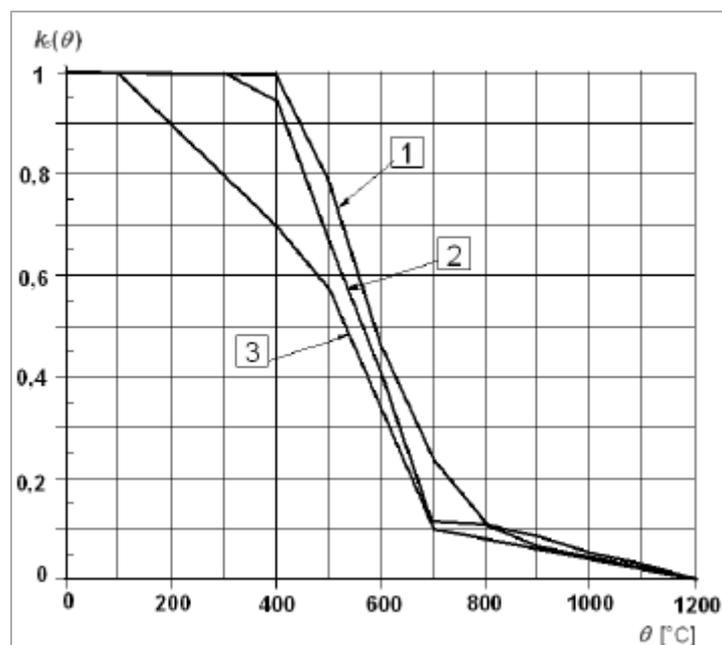
Figure 1.13 : Conductivité thermique du béton.

On a obtenu la limite inférieure de la conductivité thermique en coKN.m rant des températures mesurées lors d'essais au feu sur diverses structures en béton. La limite inférieure donne des températures plus réalistes pour les structures en béton que la limite supérieure obtenue lors d'essais sur des structures composites en acier/béton. Les courbes de conductivité thermique montrent que les bétons de calcaire ont une conductivité thermique inférieure d'environ **20 %** à celle des bétons de siliceux à température de **20 C°**.

1.7.2 Cas de l'Acier :

1.7.2.1 Résistance de l'acier :

La **fig.1.14** présente le facteur de réduction de la résistance caractéristique de l'acier de béton armé en fonction de la température θ . Selon le type d'acier (laminé à chaud ou à froid) et en fonction de l'allongement des aciers, ce facteur diffère.



Courbe 1 : armatures tendues (acier laminé à chaud) pour des déformations $\varepsilon_{s,fi} \geq 2 \%$.

Courbe 2 : armatures tendues (acier formé à froid) pour des déformations $\varepsilon_{s,fi} \geq 2 \%$.

Courbe 3 : armatures comprimées ou armatures tendues pour des déformations $\varepsilon_{s,fi} < 2 \%$.

Figure 1.14 : Facteur $K_s(\theta)$ de réduction de la résistance caractéristique (f_{yk}) des armatures.

La différence entre les courbes 1, 2 et 3 est liée au fait que les résultats expérimentaux montrent que le palier de plasticité des aciers disparaît à chaud, et que donc le facteur $K_s(\theta)$ dépend de L'allongement à la rupture. En ce qui concerne la résistance de l'acier de précontrainte, la diminution de résistance est bien plus rapide.

1.7.2.2 Déformation de l'acier :

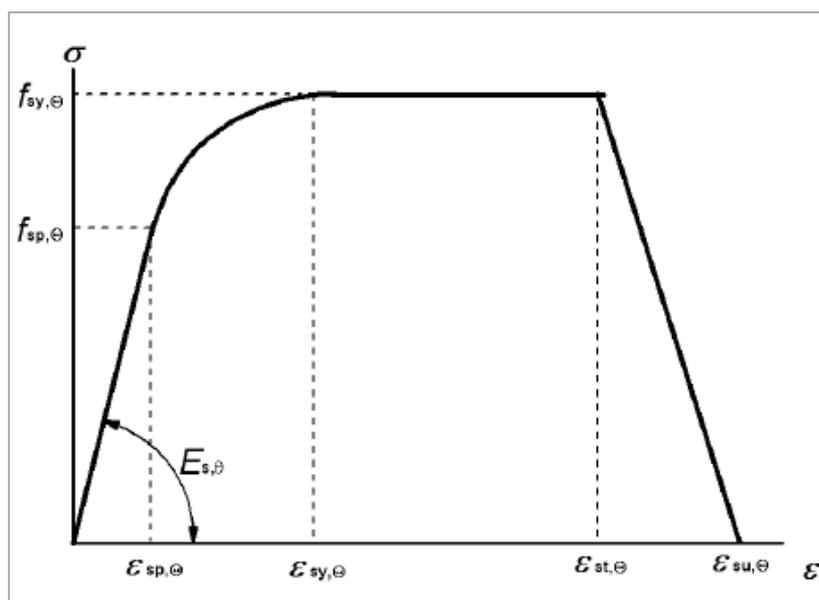


Figure 1.15 : La relation contrainte-déformation.

Les paramètres suivants définissent la relation entre la contrainte et la déformation qui régissent le comportement mécanique :

$f_{y,\theta}$: Limite d'élasticité efficace.

$f_{p,\theta}$: Limite de proportionnalité.

$E_{a,\theta}$: Pente du domaine élastique linéaire.

$\epsilon_{p,\theta}$: Déformation à la limite de proportionnalité.

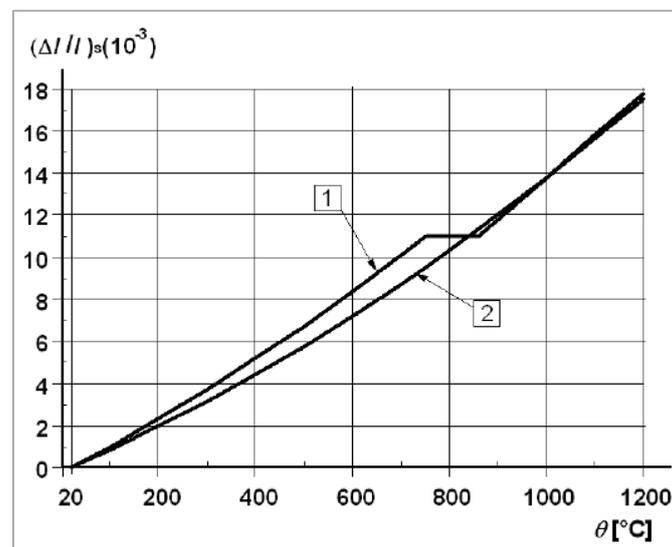
$\epsilon_{y,\theta}$: Déformation plastique.

$\epsilon_{t,\theta}$: Déformation limite en élasticité.

$\epsilon_{u,\theta}$: Déformation ultime.

1.7.2.3 Dilatation thermique de l'acier :

La **fig.1.15** présente la variation de la dilatation thermique $\epsilon_s(\theta)$ en fonction de la température.



Courbe 1 : acier de béton armé.

Courbe 2 : acier de précontrainte.

Figure 1.16 : Dilatation thermique de l'acier.

Il est observé une baisse de la conductivité thermique avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre une valeur de 800 C°, où elle montre un palier.

1.7.2.4 Chaleur spécifique de l'acier :

L'Eurocode 2 ne définit pas les caractéristiques thermiques de l'acier. Elles ne sont généralement pas nécessaires, à moins que le pourcentage d'acier soit important. Les valeurs présentées dans l'Eurocode 3 peuvent être consultées.

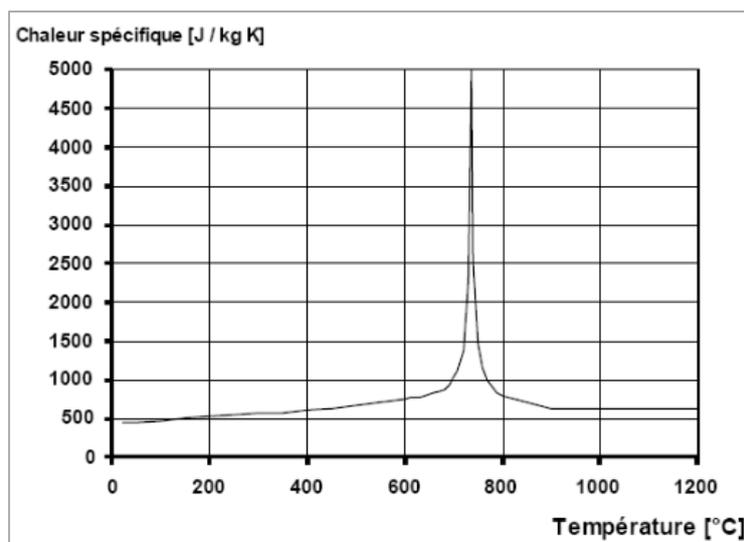


Figure 1.17 : Chaleur spécifique de l'acier au carbone.

1.7.2.5 Conductivité thermique de l'acier :

La variation de la conductivité thermique λ_s de l'acier en fonction de la température est illustrée sur la **fig.1.17** :

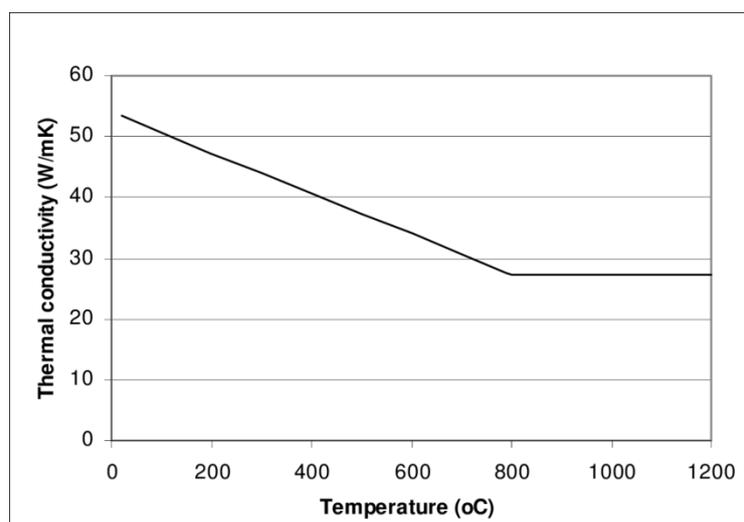


Figure 1.18 : Conductivité thermique de l'acier au carbone.

CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux aspects généraux du feu, leur déroulement et évolution, ainsi que les diverses types de modélisation des incendies. Nous avons exposé de manière détaillée et claire les diverses mesures nécessaires pour soutenir les éléments de structure lors d'un incendie, ainsi que les caractéristiques des matériaux en béton et en acier à des températures élevées.

Références:

- [1] DAS, AKHIL KUMAR, (2014), "PRINCIPLES OF FIRE SAFETY ENGINEERING", PHI LEARNING PVT. LTD, (ISBN: 9789389347241 ,9389347246)
- [2] JEAN-CLAUDE MARTIN, (1996), "INCENDIES ET EXPLOSIONS D'ATMOSPHERE", PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES, (ISBN: 9782889150397 , 2889150399)
- [3] CRISTOPHE RENAUD (2014), "SÉCURITÉ INCENDIE ET CONSTRUCTION MÉTALLIQUE", CTICM - CENTRE TECHNIQUE INDUSTRIEL DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE, (ISBN: 978-2-902720-42-2).
- [4] AYOUB NASR (2012), "MODELISATION ET ETUDE NUMERIQUE DES INCENDIES", EDITIONS UNIVERSITAIRES EUROPEENNES, (ISBN: 9783841794659 ,3841794653).
- [5] Collectif CSTB (2004), "GUIDES SÉCURITÉ INCENDIE", CSTB, (EAN13 9782868913173).
- [6] NORME EUROPEENNE (FRANÇAISE.), (2005), "EUROCODE 2: CALCUL DES STRUCTURES EN BETON, PARTIE 1-2: REGLES GENERALES — CALCUL DU COMPORTEMENT AU FEU", FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR), (ICS: 13.220.50; 91.010.30; 91.080.40).

CHAPITRE 2

LES MODELES D'ETUDE DES
POTEAUX EN SITUATION DE
FEU.

INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous exposons les divers principes de transfert de chaleur, ainsi que des informations générales sur le comportement mécanique des structures exposées au feu. On prend en compte les diverses approches de calcul des structures dans l'Eurocode. Ainsi, notre attention s'est portée sur les poteaux en béton armé, tout en exposant en détail les principes des méthodes de résolution mécanique de ces éléments en cas d'incendie.

2.1 Modèles de transfert de chaleur :**2.1.1 Rappel sur le principe de transfert de chaleur :**

Trois types de transfert de chaleur sont identifiés : la conduction, la convection et le rayonnement. Les échanges à la surface des éléments se font principalement par convection et rayonnement. En ce qui concerne l'acier, un matériau homogène, la chaleur ne se déplace que par conduction. Le béton est un matériau hétérogène, ce qui rend l'échange de chaleur plus complexe. On prend en considération les trois phénomènes (rayonnement, convection et conduction) [1] ; tout en mettant le point sur le phénomène de conduction.

2.1.2 Equation de la transmission de la chaleur :

Le transfert de chaleur par conduction dans les éléments de structure exposés au feu est régi par l'équation différentielle qui repose sur l'équation de Fourier [2]. Dans un système cartésien, l'écriture de cette équation donne :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

Ou :

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

ρ : Masse volumique [kg/m³].

C : Chaleur spécifique [J/kg.K].

T : Température en [K].

t : Temps en [s].

Q : Chaleur interne générée [W/m³].

On ne peut résoudre cette équation que si on connaît les conditions initiales et les conditions aux limites. Les conditions initiales pour l'incendie sont la distribution des températures avant l'analyse (température ambiante avant l'incendie). Il est possible de déterminer les conditions

aux limites pour chaque surface de l'élément analysé. Sur la frontière extérieure elles peuvent être différentes (température imposée ou flux imposé).

Dans notre étude, cela correspond au flux de chaleur net en surface exposée au feu de l'objet analysé. Ce flux est exprimé à partir de la valeur de la température des gaz chauds.

2.1.3 Flux de chaleur :

La relation de Fourier donne la quantité de chaleur dq [W] qui, pendant l'intervalle de temps Δt [s], traverse selon sa normale la surface dS d'un milieu homogène et isotrope, sous l'effet d'un champ de température non uniforme.

$$dq = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} d_s \Delta t \quad (2.2)$$

Ou :

$\frac{\partial T}{\partial n}$: est la dérivée normale de la température.

λ : est la conductivité du milieu considéré [W/mK].

Le signe négatif signifie que la chaleur se propage dans le sens opposé au gradient de température. **L'équation (2.3)** s'applique à un élément d'épaisseur limité par deux faces parallèles pour des températures T_1 et T_2 :

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} S \Delta t = \frac{\lambda}{\Delta x} \Delta t S (T_1 - T_2) \quad (2.3)$$

Si la paroi est composée de plusieurs plaques accolées, fabriquées à partir de matériaux différents, d'épaisseurs différentes et de conductivités thermiques différentes, la quantité de flux qui traverse ces plaques est :

$$q = \frac{1}{\sum_i \frac{\Delta x_i}{\lambda_i}} \Delta t S (T_1 - T_2) \quad (2.4)$$

2.1.4 Transmission de la chaleur par convection :

La convection est régie par le transport de la chaleur par un fluide en mouvement. Elle suppose que le flux de chaleur net sur un élément de surface soit proportionnel à la différence de température entre le milieu ambiant T_f et la température de la surface T_s . Ce phénomène peut

être illustrée par la relation suivante en prenant en compte la conductivité thermique du matériau considéré.

$$\mathbf{q} = \lambda(\mathbf{T}) \left. \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{n}} \right|_s = \mathbf{h}_c [\mathbf{T}_f - \mathbf{T}_s] \quad (2.5)$$

Ou :

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

2.1.5 Transmission de la chaleur par rayonnement :

La transmission de la chaleur par rayonnement suit la loi de Stefan-Boltzmann [3]. La quantité de chaleur qui traverse l'élément de surface est proportionnel à la différence des puissances quatrième des températures absolues des surfaces qui échange le rayonnement. Ce phénomène se manifeste à travers la relation qui suit :

$$\mathbf{q} = \lambda(\mathbf{T}) \left. \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{n}} \right|_s = \epsilon_p \sigma [\mathbf{T}_f^4 - \mathbf{T}_s^4] \quad (2.6)$$

Ou :

σ : est la constante de Boltzmann ($5 \cdot 68 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$).

ϵ_p : est l'émissivité relative globale entre le milieu ambiant et la paroi de l'élément, ce paramètre dépend de la géométrie de l'enceinte et du solide étudié, de leur distance et de leur émissivité notée respectivement ϵ_s et ϵ_f . L'émissivité globale est :

$$\epsilon_p = \epsilon_s \epsilon_f \quad (2.7)$$

2.1.6 Formulation par différences finies :

2.1.6.1 Rappel de la méthode des différences finies :

Dans cette méthode (MDF [4]), nous cherchons à approcher en un certain nombre de points les températures à l'instant $(\mathbf{t} + \Delta \mathbf{t})$ en fonction des températures à l'instant \mathbf{t} . L'équation locale du transfert de la chaleur et les conditions aux limites sont transformées en un système d'équations aux différences finies (simulation d'une différentielle à une petite variation de la grandeur physique pendant une petite variation de temps), dont les inconnues sont les températures aux points considérés. La discrétisation est obtenue en découpant la section

étudiée par un maillage de forme et de dimension adaptée et en divisant le temps en intervalles élémentaires successifs Δt .

2.1.6.2 Formulation basée sur le l'échange de chaleur entre les mailles

rectangulaires :

Nous nous situons dans le cas général d'un élément composé de divers matériaux et divisé en un maillage rectangulaire non uniforme. Chaque maille, représentée par ses indices de position **i** et **j**, est caractérisée par les paramètres suivants :

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

Nous ne considérons que les paramètres de chaque maille, tels que la température et la conductivité thermique, sont caractérisés par leur valeur au centre de la maille.

Soit une maille (**i, j**) dont le centre est noté (**0**) comme indiquée sur **la fig.2.1**. Le bilan thermique de cet élément pendant l'intervalle de temps Δt s'effectue en considérant le flux reçu par conduction des quatre mailles adjacentes, (**i - 1, j**) , (**i + 1, j**) , (**i, j - 1**) , (**i, j + 1**). Nous considérons plus particulièrement le flux de chaleur entre les mailles.

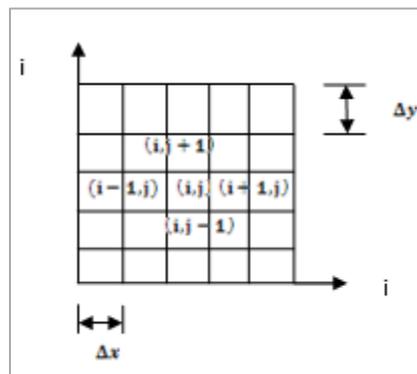


Figure 2. 1: Discrétisation de la section en éléments discrets.

Si la maille(**i, j**). est à l'intérieur de la section, nous pouvons considérer que le flux traverse deux Parois d'épaisseur $(\Delta x_{i-1}/2)$ et $(\Delta x_i /2)$ et de conductivité thermique $(\lambda_{(i-1,j)})$ et $(\lambda_{(i,j)})$. Le flux de chaleur est obtenu en appliquant **la relation (2.4)** :

$$Q_{(i-1,j) \rightarrow (i,j)} = \Delta y_j \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta x_{i-1}}{\lambda_{i-1,j}} + \frac{\Delta x_i}{\lambda_{(i,j)}} \right]} \Delta t \tag{2.8}$$

Si la maille (i, j) se trouve à la frontière du domaine, nous pouvons considérer que le flux traverse une paroi d'épaisseur $\Delta x_i/2$, et de conductivité thermique $\lambda(i, j)$, après un échange de chaleur à la surface caractérisée par le coefficient α_f . Le flux de chaleur peut être obtenu en appliquant la relation (2.4) :

$$Q_{(i-1,j) \rightarrow (i,j)} = \Delta y_j \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\frac{1}{\alpha_f} + \frac{1}{2} \frac{\Delta x_i}{\lambda(i,j)}} \Delta t \quad (2.9)$$

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

$$Q_{\text{abs}} = C_{(i,j)} \rho_{(i,j)} \Delta x_i \Delta y_j (T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t) \quad (2.10)$$

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

$$Q_{\text{abs}} = Q_{(i-1,j) \rightarrow (i,j)} + Q_{(i,j) \rightarrow (i+1,j)} + Q_{(i,j-1) \rightarrow (i,j)} + Q_{(i,j) \rightarrow (i,j+1)} \quad (2.11)$$

Dans le cas où un flux de chaleur agit sur toutes les faces, nous présentons la configuration schématique des éléments discrétisés pour la section considérée.

2.1.6.3 Formulation en différence finies :

Nous nous plaçons toujours dans le cas général d'un élément constitué de différents matériaux et discrétisé en un maillage rectangulaire non uniforme. Pour chaque maille (i, j) on peut transformer l'équation du transfert de la chaleur (2.1) de la manière suivante :

La dérivée première de la température au point (i, j) peut être approchée par les relations :

1. Différence finie centrée en amont :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{i,j} = \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\frac{\Delta x_{i-1}}{2} + \frac{\Delta x_i}{2}} \quad (2.12)$$

2. Différence finie centrée en aval :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{i,j} = \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j})}{\frac{\Delta x_{i+1}}{2} + \frac{\Delta x_i}{2}} \quad (2.13)$$

Où Δx_i est la discrétisation spatiale suivant x .

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

3. Différence finie centrée en amont :

$$\lambda * \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{i,j} = \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\frac{\Delta x_{i-1}}{2\lambda_{i-1,j}} + \frac{\Delta x_i}{2\lambda_{i,j}}} \quad (2.14)$$

4. Différence finie centrée en aval :

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{i,j} = \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\frac{\Delta x_{i+1}}{2\lambda_{i+1,j}} + \frac{\Delta x_i}{2\lambda_{i,j}}} \quad (2.15)$$

La différence finie centrée du second ordre s'écrit donc :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda * \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{i,j} = \frac{\frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j})}{\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta x_{i+1}}{\lambda_{i+1,j}} + \frac{\Delta x_i}{\lambda_{i,j}} \right]} - \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta x_{i-1}}{\lambda_{i-1,j}} + \frac{\Delta x_i}{\lambda_{i,j}} \right]}}{\Delta x_i} \quad (2.16)$$

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

$$C_{(i,j)} \rho_{(i,j)} \Delta y_i \Delta y_j \frac{\partial T_{i,j}}{\partial t} = \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j}) \Delta y_j}{\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta x_{i+1}}{\lambda_{i+1,j}} + \frac{\Delta x_i}{\lambda_{i,j}} \right]} - \frac{(T_{i,j} - T_{i-1,j}) \Delta y_j}{\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta x_{i-1}}{\lambda_{i-1,j}} + \frac{\Delta x_i}{\lambda_{i,j}} \right]} + \frac{(T_{i,j+1} - T_{i,j}) \Delta x_i}{\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta y_{i+1}}{\lambda_{i,j+1}} + \frac{\Delta y_i}{\lambda_{i,j}} \right]} - \frac{(T_{i,j} - T_{i,j-1}) \Delta x_i}{\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta y_{j-1}}{\lambda_{i,j-1}} + \frac{\Delta y_i}{\lambda_{i,j}} \right]} \quad (2.17)$$

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

En remplaçant $\frac{\partial T}{\partial x}$ et $\frac{\partial T}{\partial y}$ par leurs expressions approchées en fonction de la température à l'instant t, on peut à chaque pas de temps Δt estimer les températures à l'instant $(t + \Delta t)$.

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

$$T_{i,j}^{t+\Delta t} = T_{i,j}^t + \frac{\Delta t}{C_{(i,j)}\rho_{(i,j)}\Delta y_i\Delta y_j} \left\{ \frac{(T_{i+1,j}-T_{i,j})\Delta y_j}{\frac{1}{2}\left[\frac{\Delta x_{i+1}}{\lambda_{i+1,j}} + \frac{\Delta x_i}{\lambda_{i,j}}\right]} - \frac{(T_{i,j}-T_{i-1,j})\Delta y_j}{\frac{1}{2}\left[\frac{\Delta x_{i-1}}{\lambda_{i-1,j}} + \frac{\Delta x_i}{\lambda_{i,j}}\right]} + \frac{(T_{i,j+1}-T_{i,j})\Delta x_j}{\frac{1}{2}\left[\frac{\Delta y_{j+1}}{\lambda_{i,j+1}} + \frac{\Delta y_j}{\lambda_{i,j}}\right]} - \frac{(T_{i,j}-T_{i-1,j})(T_{i,j+1}-T_{i,j})\Delta x_i}{\frac{1}{2}\left[\frac{\Delta y_{j-1}}{\lambda_{i,j-1}} + \frac{\Delta y_j}{\lambda_{i,j}}\right]} \right\} \quad (2.18)$$

Où toutes les grandeurs ρ, C, λ qui dépendent de la température sont évaluées à l’instant t . Lorsque la maille (i, j) constitue une frontière du domaine, on procède de la même manière. On remplace dans l’expression précédente un des termes de conduction interne par le flux de surface correspondant, soit (2.10) si la maille (i, j) constitue une frontière extérieure du domaine, soit (2.11). Il existe deux types de calculassions :

- Calcul thermique de la section.
- Calcul mécanique de la longueur totale du poteau (Eléments finies).

2.2 Modèles mécaniques en situation d’incendie :

2.2.1 Informations générales concernant le comportement mécanique des structures en cas d'incendie :

Le comportement mécanique d'une structure en cas d’incendie [5] dépend de son comportement après avoir été soumise au feu. Il est donc possible de conclure qu'il y a un lien thermomécanique. L'organigramme ci-dessous représente la résistance au feu comme une série d'actions (Thermique et Mécanique).

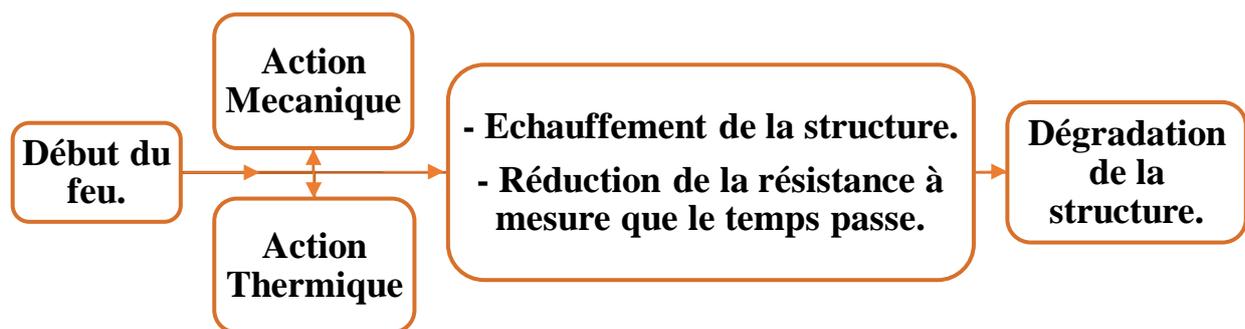


Figure 2. 2 : organigramme de résistance au feu.

Le but est de décrire le comportement mécanique des structures ou des éléments de structure en cas d'incendie. Pour cela, il est nécessaire de faire soit :

- Des essais au feu (qui sont très coûteux).

- Concevoir un modèle de calcul numérique approché.

Grâce à la description du comportement, il est possible d'établir la relation déplacement fonction du temps ou la capacité portante fonction du paramètre temps. En ce qui concerne le calcul du comportement mécanique des structures [6] exposées au feu, il est possible de le faire en utilisant les trois méthodes suivantes :

1. **Analyse de la structure globale, dans laquelle la structure totale sera étudiée.**
2. **Analyse par éléments séparés, la liaison avec les autres éléments sera remplacée par des conditions aux limites appropriées.**
3. **Analyse des différentes parties de la structure. une partie sera directement considérée. les conditions aux limites appropriées pour représenter sa liaison avec le reste de la structure seront considérées.**

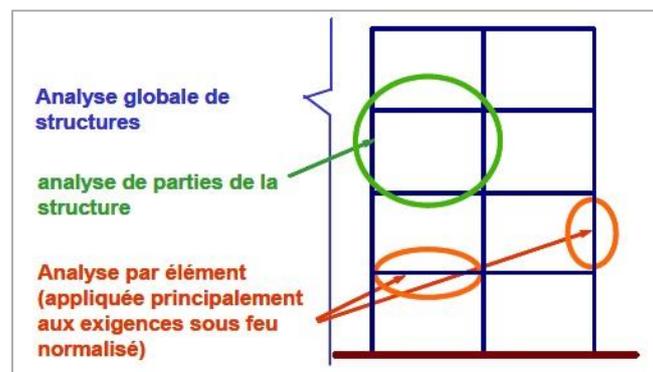


Figure 2. 3 : Différentes approches d’analyse pour le comportement mécanique des structures en situation d’incendie.

Il semble que l'analyse par élément soit simple. Différents phénomènes liés à l'action du feu peuvent être pris en compte pour une analyse globale de la structure, tels que la stabilité de la structure, l'iKN.m et d'une partie de la structure sur une autre partie ou sur la structure globale.

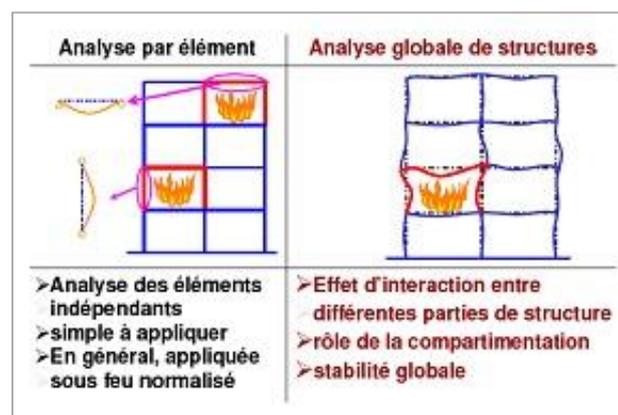


Figure 2. 4 : Analyse mécanique par éléments et analyse globale d’une structure sous l’influence d’un feu.

2.3 Comportement des poteaux en béton armé en cas de feu :

2.3.1 Approches simplifiées de calcul :

Deux méthodes simplifiées existent pour évaluer la résistance au feu des poteaux [7] en béton armé :

1. La méthode A :

Cette méthode repose sur la formule suivante :

$$R = 120 \times \left[\left(R_{n,fi} + R_l + R_a + R_b + R_n \right) / 120 \right]^{1,8} \quad (2.19)$$

Où :

$$R_{n,fi} = 83 \times \left[100 - \mu_{fi} \times \frac{1+\omega}{(0,85/\alpha_{cc})+\omega} \right].$$

$\mu_{fi} = N_{ed,fi} / N_{Rd}$, (Niveau de chargement de calcul en situation d'incendie).

$\omega = \frac{A_s \times f_{yd}}{A_c \times f_{cd}}$, (Le rapport mécanique d'armatures à température normale).

α_{cc} : Le facteur de résistance à la compression (voir l'EN 1992-1-1), qui tient en compte, les effets à long terme sur la résistance mécanique, la valeur pour les actions normales est entre **0,8 et 1,0** la valeur à prendre en compte ici est la valeur à froid soit **0,85**.

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

$(f_{cd,fi} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / Y_{c,fd} = 1,00 \cdot f_{ck} / 1,00 = f_{ck})$ à coKN.m rer avec $(f_{cd} = 0,85 \cdot f_{ck} / Y_c)$ à froid.

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

$R_a = 1,60 \times (a-30)$.

$a = 25 \text{ mm} \leq a \leq 80 \text{ mm}$. (Distance de l'axe des Barres d'acier longitudinales au parement)

$R_l = 9,60 \times (5 - \ell_{0,fi})$.

$\ell_{0,fi}$: La longueur efficace d'un poteau en condition d'incendie, $\ell_{0,fi}$ peut être estimée égale à ℓ_0 à température normale dans tous les cas. Pour les bâtiments contreventés, pour lesquels la résistance au feu normalisé est supérieure à **30 min**, dans le cas des poteaux continus, la longueur efficace est donnée par :

$\ell_{0,fi} = (0,5 \times \ell)$ (pour les étages intermédiaires).

$\ell_{0,fi} = (0,5 \times \ell \leq \ell_{0,fi} \leq 0,7 \times \ell)$, (pour l'étage supérieur).

$R_b = 0,09 \times b'$.

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

$b' = \emptyset_{co,l}$, (pour les sections circulaires).

$(200 \text{ mm} \leq b' \leq 450 \text{ mm}, \text{ quand } h \leq 1,5 b)$.

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

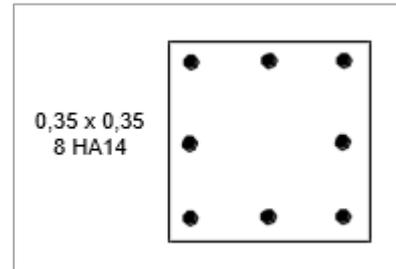
$R_a = 12$, $n > 4$.

Exemple pratique :

Les Données :

- $N_G = 0,92$ MN, $N_Q = 0,28$ MN.
- Longueur libre 2,60 m
- Enrobage à l'axe supposé : 50 mm
- Bureaux : $\Psi_1 = 0,5$

Exigence : **R90 min.**



Solution :

$$N_{Rd} = 1,35 N_G + 1,5 N_Q = 1,662 \text{ MN}$$

$$N_{Ed,fi} = N_G + \Psi_1 \cdot N_Q = 0,92 + 0,5 \times 0,28 = 1,06 \text{ MN}$$

$$\mu_{fi} = N_{Ed,fi} / N_{Rd} = 1,06 / 1,662 = 0,64 \text{ MN.}$$

$$\text{Aire d'armatures : } 8 \text{ HA14} = 12,32 \text{ cm}^2.$$

$$R = 120 * [(R_{n,fi} + R_l + R_a + R_b + R_n) / 120]^{1.8}$$

$$\omega = \frac{A_s * f_{yd}}{A_c * f_{cd}} = \frac{12 \cdot 32 \times 10^{-4} \times 435}{0 \cdot 35 \times 0 \cdot 35 \times 16 \cdot 7} = 0 \cdot 262$$

$$R_{n,fi} = 83 \times \left[100 - \mu_{fi} * \frac{1+\omega}{(0.85/\alpha_{cc})+\omega} \right] = 83 \times \left[100 - 0 \cdot 64 \frac{1+0.262}{(0.85/1)+0.262} \right] = 22 \cdot 7 \text{ min.}$$

$$R_a = 1,60 \times (a-30) = 1.60 \times (50-30) = 32 \text{ min.}$$

$$R_l = 9.60 \times (5 - \ell_{0,fi}) = 9.60 \times (5 - (0.5 \times 2.60)) = 35.5 \text{ mn.}$$

$$R_n = 12 \text{ min, (pour plus de 4 barres)}$$

$$R_b = 0.09 \times b' = 0.09 \times 2 \times 0.35 \times 0.35 / (0.35 + 0.35) = 0.0315 = 31.5 \text{ min (en mm).}$$

$$R = 120 \times [(R_{n,fi} + R_l + R_a + R_b + R_n) / 120]^{1.8} = 120 \times [(22 \cdot 7 + 35 \cdot 5 + 32 + 12 + 31 \cdot 5) / 120]^{1.8} = 146 \text{ min.}$$

R = 146 > 90 OK

2. La méthode B :

Elle est appliquée uniquement aux constructions contreventées. Elle repose sur des calculs empiriques prenant en compte les effets du second ordre et la réduction des caractéristiques mécaniques du béton et des aciers en fonction du champ de température. Les résultats sont donnés au **tableau 5.2b** de l’Eurocode 2 partie 1-2 [8].

Résistance au feu standard	ω	Dimensions minimales (mm)			
		Largeur de colonne b_{min} /distance a de l’axe des barres principales au parement			
		$n = 0,15$	$n = 0,3$	$n = 0,5$	$n = 0,7$
R 30	0,1	150/25 ^a	150/25 ^a	200/30 à 250/25 ^a	300/30 à 350/25 ^a
	0,5	150/25 ^a	150/25 ^a	150/25 ^a	200/30 à 250/25 ^a
	1,0	150/25 ^a	150/25 ^a	150/25 ^a	200/30 à 300/25 ^a
R 60	0,1	150/30 à 200/25 ^a	200/40 à 300/25 ^a	300/40 à 500/25 ^a	500/25 ^a
	0,5	150/25 ^a	150/35 à 200/25 ^a	250/35 à 350/25 ^a	350/40 à 550/25 ^a
	1,0	150/25 ^a	150/30 à 200/25 ^a	200/40 à 400/25 ^a	300/50 à 600/30
R 90	0,1	200/40 à 250/25 ^a	300/40 à 400/25 ^a	500/50 à 550/25 ^a	550/40 à 600/25 ^a
	0,5	150/35 à 200/25 ^a	200/45 à 300/25 ^a	300/45 à 550/25 ^a	500/50 à 600/40
	1,0	200/25 ^a	200/40 à 300/25 ^a	250/40 à 550/25 ^a	500/50 à 600/45
R 120	0,1	250/50 à 350/25 ^a	400/50 à 550/25 ^a	550/25 ^a	550/60 à 600/45
	0,5	200/45 à 300/25 ^a	300/45 à 550/25 ^a	450/50 à 600/25 ^a	500/60 à 600/50
	1,0	200/40 à 250/25 ^a	250/50 à 400/25 ^a	450/45 à 600/30	600/60
R 240	0,1	500/60 à 550/25 ^a	550/40 à 600/25 ^a	600/75	^b
	0,5	450/45 à 500/25 ^a	550/55 à 600/25 ^a	600/70	^b
	1,0	400/45 à 500/25 ^a	500/40 à 600/30	600/60	^b

Ou :
^a : L’enrobage exigé par l’EN 1992-1-1 est normalement déterminant.
^b : Exige une largeur supérieure à 600 mm. Une évaluation particulière concernant le flambement est nécessaire.

Table 2. 1 : Résistance au feu des poteaux en béton armé à section rectangulaire ou circulaire (EN 1992-1-2 : Tab.5.2b).

Les effets du second ordre et la réduction des caractéristiques mécaniques du béton et des aciers, peuvent être résumés dans le schéma suivant :

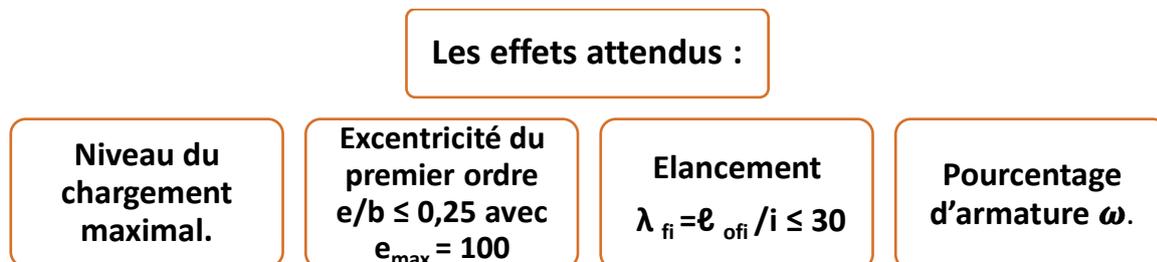


Figure 2. 5: Les effets du second ordre et la réduction des caractéristiques mécaniques du béton et aciers.

3. Méthodes avancées de calcul :

Ces méthodes peuvent être utilisées pour toutes les structures, y compris les poteaux en béton armé. Elles reposent principalement sur des méthodes numériques (éléments finis ou différences finis) afin de déterminer la capacité portante et la déformation à tous les points du poteau.

CONCLUSION :

Les différentes méthodes de calcul du comportement des poteaux en béton armé ont été exposées, les méthodes simplifiées ou avancées (numériques), avec leur domaine de validité, ainsi que les hypothèses de chaque méthode ont été exposées. Un outil de calcul prenant en compte tous ces phénomènes est nécessaire pour détecter la ruine des éléments structuraux.

Une analyse paramétrique (chapitre 4), prenant en compte :

1. Effet de la géométrie.
2. Effet du taux d'armature.
3. Effet de l'enrobage.
4. Effet de la longueur de flambement.
5. Effet de la résistance caractéristique du béton.
6. Effet de la limite élastique des armatures.
7. Effet de la teneur en eau.
8. Effet de type de granulats.

Différents logiciels peuvent être utilisés à cet effet, parmi lesquels les plus importants sont SAFIR, ABAQUS, POTFIRE, ANSYS WORKBENCH et CIM'FEU EC2 .Nous nous concentrons uniquement sur le logiciel CIM'Feu EC2 qui sera présenté et détaillé au chapitre3.

Références :

- [1] NAOUAL BELOUAGGADIA ‘NORA CHERIFA ABID ‘RAYMOND BRUN (2015), "ELEMENTS FONDAMENTAUX DES TRANSFERTS THERMIQUES, CEPADUES EDITIONS", (ISBN : 9782364935129 ‘2364935121).
- [2] YUNUS A. CENGEL (1998), "HEAT TRANSFERT, A PRACTICAL APPROACH", MCGRAW - HILL; 2ND Edition, (ISBN-10 : 0070115052, ISBN-13 : 978-0070115057).
- [3] J. M. Wallace et P. V. Hobbs, (2006), "ATMOSPHERIC SCIENCE. AN INTRODUCTORY SURVEY", ACADEMIC PRESS, (ISBN 9-780-12732-951-2).
- [4] GRÉGOIRE ALLAIRE, (2005) "ANALYSE NUMÉRIQUE ET OPTIMISATION", EDITIONS DE L'ECOLE POLYTECHNIQUE (ISBN: 9782730212557 ‘2730212558).
- [5] JOËL KRUPPA (2013) "SÉCURITÉ INCENDIE DES OUVRAGES EN STRUCTURES ACIER ET ACIER/BÉTON – PARTIE 1", ED. TECHNIQUES INGENIEUR, ARTICLE DE RÉFÉRENCE, (RÉF: C2506 V3).
- [6] B. ZHAO (2003), "COMPORTEMENT MECANIQUE AU FEU" CTICM – CENTRE TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION METALLIQUE, FRANCE, (ISBN 92-894-3830-4).
- [7] FRIEDBERT KIND-BARKAUSKAS (2006), "CONSTRUIRE EN BÉTON", PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES, (SBN : 9782880746476 ‘2880746477).
- [8] EUROCODE 2 (2001)., "CALCUL DES STRUCTURES EN BETON ET DOCUMENT D'APPLICATION NATIONALE PARTIE 1-2 : REGLES GENERALES", CALCUL DU COMPORTEMENT AU FEU.

CHAPITRE 3

LE LOGICIEL CIM'FEU EC2.

INTRODUCTION :

Le logiciel CIM'Feu EC2 c'est un Logiciel de vérification par calcul de la résistance au feu des structures en béton développé par le CSTB et produit par CIM'BETON [1]. Le langage de programmation utilisé pour créer le programme est FORTRAN. Comme tout logiciel de calcul, se distingue par sa précision des calculs, sa rapidité de traitement et son risque limité d'erreur de calcul limité. Il dépend de la résolution de l'équation de diffusion de la chaleur pour trouver les températures en chaque point selon les différences finies et la méthode des directions alternées. Les résultats sont validés en coKN.m rant les résultats de l'EC2 et les résultats de programmes plus fins et éprouvés.

La collaboration CIM'BETON – CSTB date d'une vingtaine d'années, lorsqu'il s'est agi de développer la toute première version de CIM'Feu (en 2000). Depuis, de nombreux projets communs ont été menés. Le logiciel CIM'Feu-DTU (dernière version finalisée en 2009) avait, dès sa première version proposé la méthode analytique du DTU (Document technique unifié), en calibrant les paramètres de calcul spécifiques au béton (vaporisation, conductivité, etc.). Il avait également (version 1) proposé l'approche ENV1992-1-2 + DAN français).

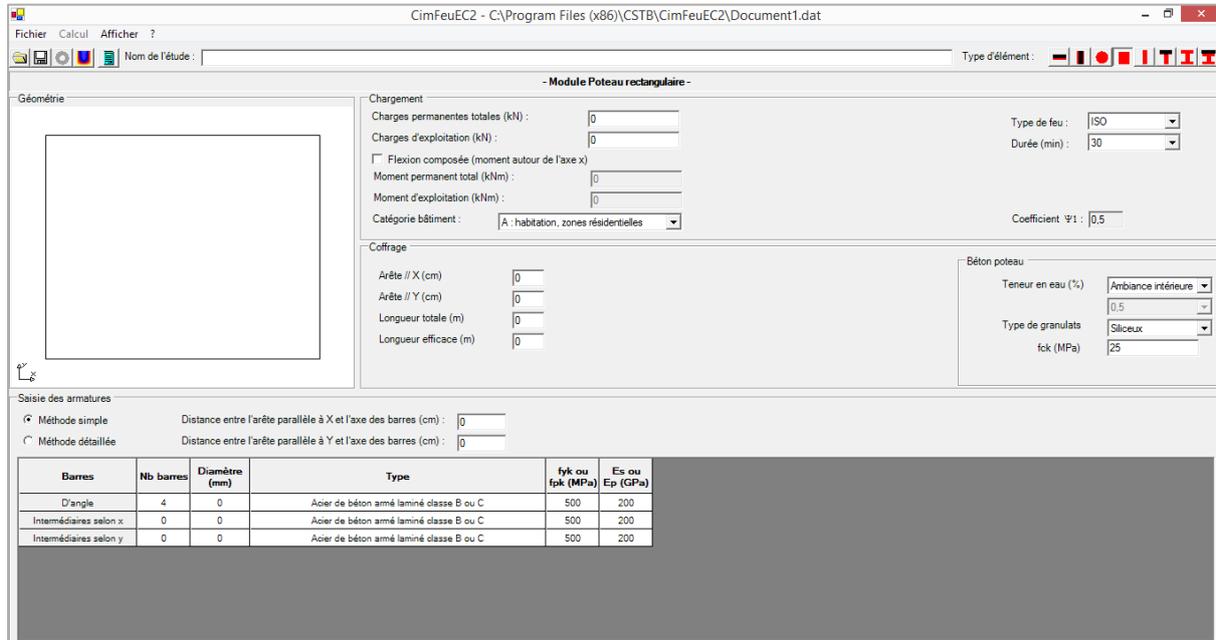


Figure 3. 1 : Interface du logiciel CIM'Feu.

3.1 Hypothèse de calcul :

La prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton est régie en France par le texte codificatif Eurocode 2, partie 1-2, muni de son annexe nationale (normes NF EN 1992-1-2 et NF EN 1992-1 2/NA) en remplacement de la norme DTU NF P 92-701 (DTU Feu-béton).

La norme NF EN 1992-1-2 propose trois méthodes de vérification :

1. l'analyse globale de la structure.
2. l'analyse par parties de structure.
3. l'analyse par éléments de structure.

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

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

3.2 Les avantages de l'utilisation de CIM'Feu EC2 :

Il constitue un outil pratique et rapide pour le calcul au feu des structures en béton, il permet également une application clarifiée d'approches relativement complexes prévues par le (EN1992-1-2) et son Annexe Nationale, Il limite également les risques de mauvaise interprétation des règles de dimensionnement, et optimise l'utilisation de la matière.

3.3 CIM'Feu EC2 traite :

Le programme BISOT, intégré à CIM'Feu EC2, calcule le champ de température dans les sept configurations suivantes :

- Les murs exposés sur une ou deux faces.
- Les dalles sur deux ou quatre appuis, simples ou continues, Exposées en sous-face.
- Les poutres rectangulaires, en I, en T, en béton armé et en béton précontraint, exposées sur trois ou quatre faces.
- Les poteaux rectangulaires et circulaires, en compression simple et en flexion composée, exposées sur toute leur périphérie.



Figure 3. 2 : Les types d'éléments étudiés par le CIM'Feu.

3.4 Mécanisme et méthode de fonctionnement du programme :

1. Les champs de température peuvent être visualisés graphiquement.
2. Les sorties donnent les valeurs significatives pour le dimensionnement ainsi que les températures atteintes au temps souhaité (pour vérification).
3. CIM'Feu EC2 limite le temps de calcul à l'ordre de la minute, quel que soit le problème traité (adaptation des incréments de temps pour le calcul a la minute).
4. La saisie des données est faite sur une feuille d'appel (saisie sur écran directement), avec interface intuitive et aide contextuelle. La visualisation graphique des entrées permet de contrôler les données du problème traité.

3.5 Limites d'emploi du logiciel – Simplifications admises – Astuces d'utilisation :

- CIM'Feu EC2 traite les poteaux rectangulaire dont les côtés, varient entre 8 et 120 cm, par pas de 1 cm.
- Deux modes de saisie des armatures (méthode simple et méthode détaillée) sont proposés pour les poteaux rectangulaires. Dans les deux cas, la section est doublement symétrique.

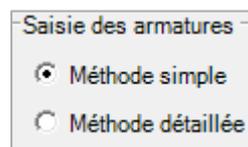


Figure 3. 3 : Les Deux modes de saisie des armatures.

- Dans les poteaux rectangulaires, le moment fléchissant est considéré autour de l'axe X. L'utilisateur devra veiller à ce que la géométrie de la section qu'il aura déclarée soit cohérente avec cela.

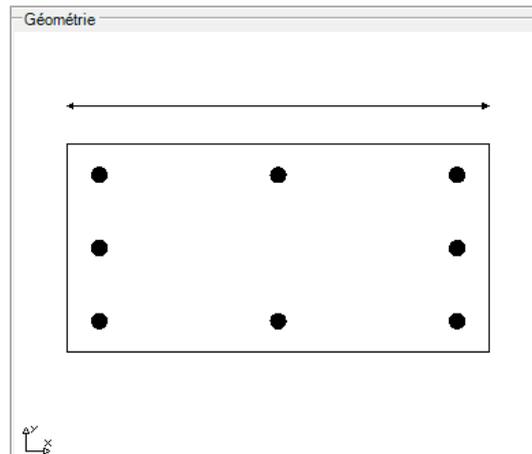


Figure 3. 4 : section d'un poteau.

3.6 Calcul des poteaux rectangulaires :

3.6.1 Méthode de justification :

L'annexe B.3 de la norme NF EN 1992-1-2 propose d'évaluer le risque de flambement des poteaux en conditions d'incendie par la méthode fondée sur l'estimation de la courbure. La figure 3.5, extraite de la norme NF EN 1992-1-2, illustre la méthode.

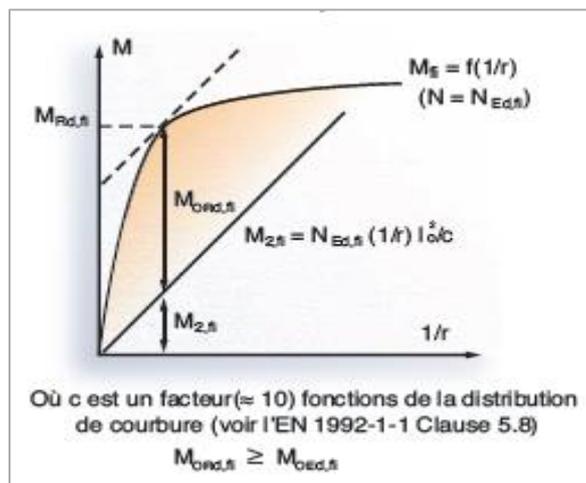


Figure 3. 5 : Relation effort axial et moment de courbure.

Cette dernière méthode est valable uniquement pour l'évaluation de la résistance de poteaux dans des structures contreventées, elle consiste à :

1. calculer le champ de température dans la section au temps demandé.
2. déterminer le diagramme de moment-courbure pour l'effort normal agissant en situation d'incendie $N_{Ed,fi}$ en utilisant pour les armatures et le béton, le diagramme contrainte-déformation pertinent de la section 3 de la norme NF EN 1992-1-2.

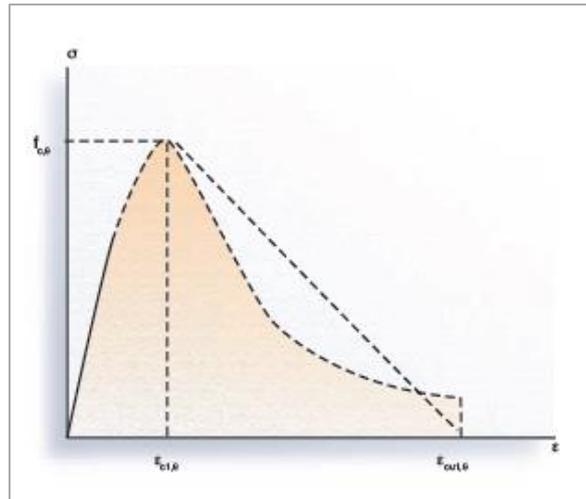


Figure 3. 6 : Le diagramme contrainte-déformation.

(La relation contrainte-déformation est définie par deux paramètres : la résistance à la compression $f_{c,\theta}$ et la déformation $\epsilon_{c1,\theta}$ correspondant à $f_{c,\theta}$.)

3. utiliser des méthodes de calcul conventionnelles pour déterminer le moment résistant ultime, $M_{Rd,fi}$ avec l'effort normal coKN.m rable $N_{Ed,fi}$ et le moment nominal du second ordre $M_{2,fi}$ pour la courbure correspondant au moment résistant ultime.
4. déterminer le moment résistant ultime du premier ordre $M_{0Rd,fi}$ pour l'exposition au feu spécifiée et $N_{Ed,fi}$ comme la différence entre le moment résistant ultime $M_{Rd,fi}$ et le moment nominal du second ordre $M_{2,fi}$ ainsi calculé.
5. coKN.m rer le moment résistant ultime du premier ordre $M_{0Rd,fi}$ avec le moment fléchissant du premier ordre de calcul en conditions d'incendie $M_{0Ed,fi}$ (en tenant en compte d'une excentricité additionnelle due aux imperfections géométriques).

L'expression du moment nominal du second ordre $M_{2,fi}$ sur la **fig.3.5** fait apparaître le facteur c , fonction de la distribution de courbure :

- $c = 8$ si le moment total est environ constant.
- $c = \pi^2 (\approx 10)$ si le moment total est sinusoïdal (ou parabolique), en général, on adopte cette valeur dans le cas d'une section constante.

Référence :

[1] Logiciel CIM'Feu Ec2 Version D'évaluation, Fascicule D'utilisation Du Logiciel CIM'Feu Ec2 Version D'évaluation, Produit par CIMbéton et Développé par le CSTB (Septembre 2009).

CHAPITRE 4

ANALYSE DES RESULTATS

INTRODUCTION :

Ce chapitre présente une étude approfondie de l'effet du feu sur plusieurs poteaux carrés en cas d'incendie. En tenant en compte des facteurs cités ci-après indépendamment l'un de l'autre. L'outil utilisé est le logiciel CIMFEU du CSTB basé sur l'EC2 [1] et [2].

Les paramètres étudiés sont :

1. Effet de la géométrie.
2. Effet du taux d'armature.
3. Effet de l'enrobage.
4. Effet de la longueur de flambement.
5. Effet de la résistance caractéristique du béton.
6. Effet de la limite élastique des armatures.
7. Effet de la teneur en eau.
8. Effet de type de granulats.

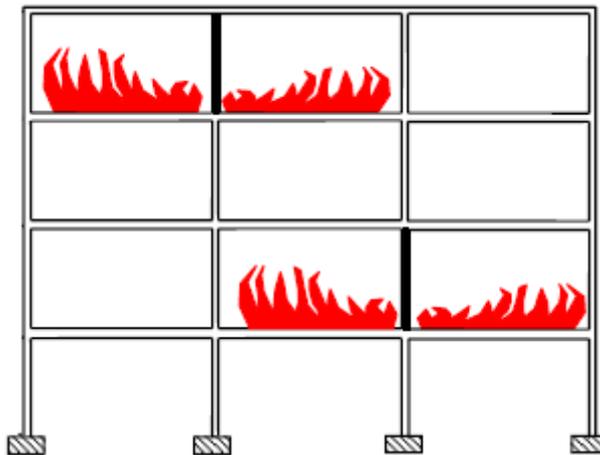


Figure 4. 1 : Deux poteaux en situation d'incendie.

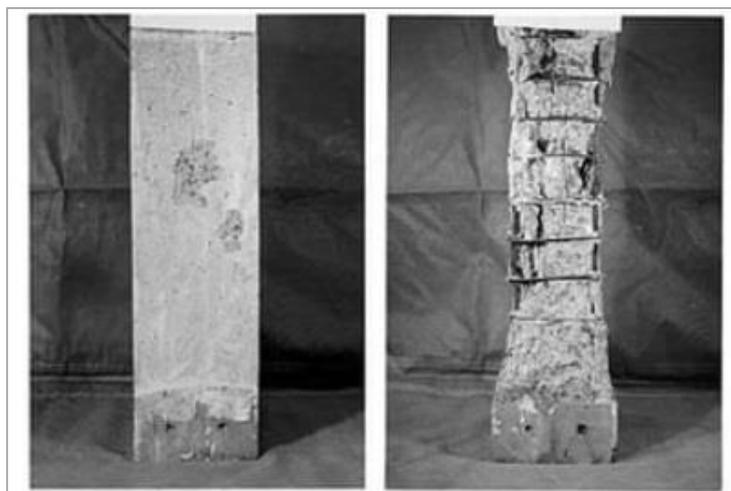


Figure 4. 2 : Un poteau en béton arme soumise à un effort de 100N/Cm à une température de 1000°C.

4.1 Effet de la géométrie.

4.1.1 But :

Nous étudions l'effet des différentes dimensions des sections de poteaux sur leur capacité à résister au feu en cas d'incendie.

4.1.2 Description :

Nous analysons l'effet des différentes dimensions et mesures des sections de poteaux sur leur capacité à résister au feu en cas d'incendie, tout en fixant les autres facteurs.

4.1.3 Caractéristiques des poteaux :

- Le poteau est au RDC d'un bâtiment de plusieurs étages servant au stockage d'archives. Il est en ambiance intérieure (Humidité minimale).
- Béton C30 à granulats calcaire.
- Section (Cm) : poteaux carrés de sections : 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60.
- Longueur totale : 3 m. hauteurs des poteaux
- Longueur efficace : 3 m.
- Acier HA16 laminé de classe B ou C, 3 barres sur chaque face.
- Enrobage 3 cm.
- Charge permanente totale N : 100 kN.
- Durée de stabilité au feu exigée (Min) : 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, sous feu ISO R 834.

Ces caractéristiques sont regroupées sur le tableau suivant :

Poteaux	B [cm]	N [KN]	As [nbφ16]	Er [cm]	H [m]	Yc [KN.m]	Ys [KN.m]	Teneur en eau %	Type du granulat
P.CA.01	30	100	8	3	3	30	500	0.5	calcaire
P.CA.02	35	100	8	3	3	30	500	0.5	calcaire
P.CA.03	40	100	8	3	3	30	500	0.5	calcaire
P.CA.04	45	100	8	3	3	30	500	0.5	calcaire
P.CA.05	50	100	8	3	3	30	500	0.5	calcaire
P.CA.06	55	100	8	3	3	30	500	0.5	calcaire
P.CA.07	60	100	8	3	3	30	500	0.5	calcaire

Table 4. 1 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique.

Ou :

Er : l'enrobage.

N : l'effort normal.

As : section d'armature.

Lf : longueur de flambement.

B : largeur de la section de poteau.

Ys : la limite élastique des armatures.

Yc : la résistance caractéristique du béton.

4.1.4 Étude des résultats :

Le tableau suivant contient les résultats de l'étude de chacun des cas du **tableau (4.1)**.

Résistance au feu normalisé (Min)	Moment résistant ultime (KN.m)						
	B=30 Cm	B=35 Cm	B=40 Cm	B=45 Cm	B=50 Cm	B=55 Cm	B=60 Cm
30	106.02	129.19	152.12	175.99	199.33	222.6	245.59
60	73.88	92.98	111.92	129.65	147.44	164.81	182.12
90	48.04	62.63	77.35	91.16	104.26	117.15	129.76
120	31.27	42.7	54.13	65.42	75.97	85.68	95.67
150	21.84	31.06	40.09	49.39	58.19	66.33	74.27
180	14.23	23.77	30.54	38.45	45.65	52.88	59.71
240	10.01	16.07	22.57	28.14	33.55	39.08	44.37

Table 4. 2 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la largeur de la section.

Les résultats du **tableau (4.2)** peuvent être représentés graphiquement comme suit :

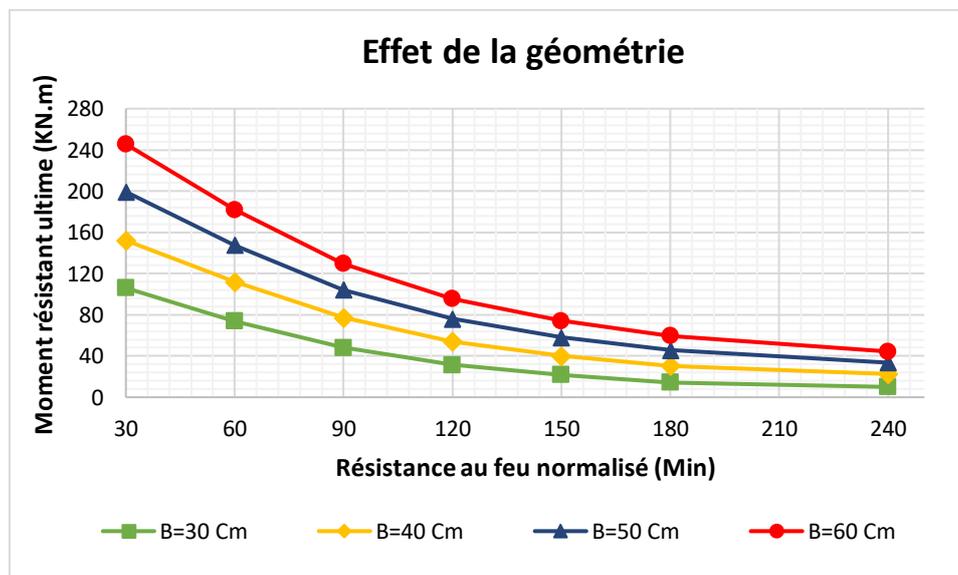


Figure 4. 3 : La résistance au feu des poteaux dans le temps.

La **fig.4.4** montre la capacité des poteaux dans chaque cas à résister au feu et à éviter l'effondrement dû à l'augmentation des températures au fil du temps.

Dans les 30 premières minutes, les résultats de l'étude sont affichés dans **la figure (4.5)**.

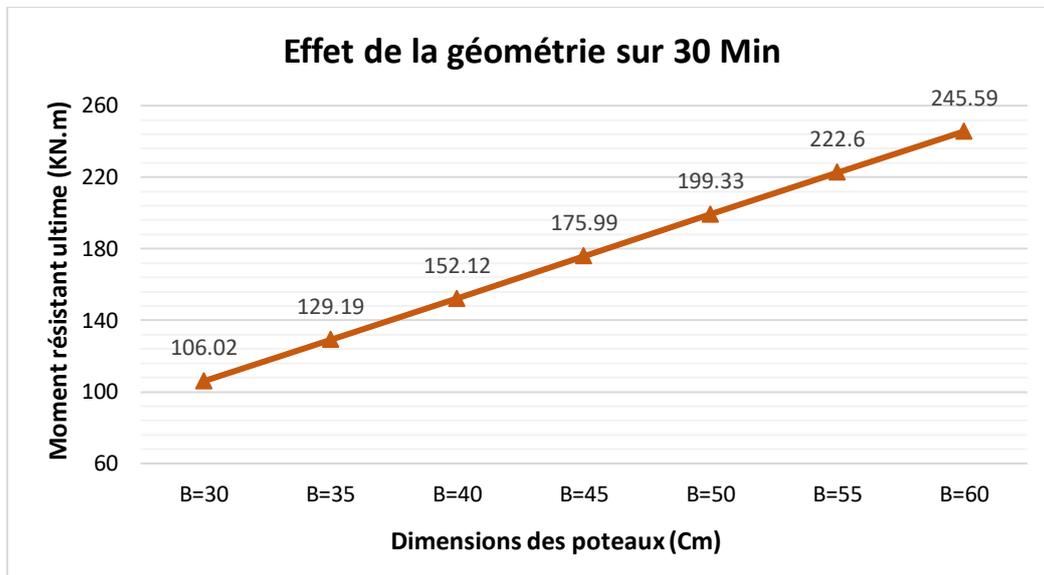


Figure 4. 4 : L'effet de différentes dimensions des poteaux sur la capacité de ces poteaux à résister au feu dans avec 30 min.

4.1.5 Conclusion :

A partir de cet exemple, nous concluons que plus les dimensions des poteaux sont grandes plus leur résistance au feu est grande. Par exemple, pour le cas de 30cm, le gain en moment à 30 mn est de 120KN.m . Cette différence n'est pas constante toute en augmentant la durée du feu. Elle tend vers zéro lorsque le temps d'incendie se rapproche de 4h. Cela est dû à la faible conductivité du béton. Ce dernier est donc un bon protecteur (isolateur) pour les armatures.

4.2 Effet du taux d'armatures.

4.2.1 But :

Dans cette expérience numérique, nous étudions l'effet des différents diamètres (surface) de barres d'armature dans les poteaux sur leur capacité à résister au feu en cas d'incendie.

4.2.2 Description :

Dans cette étude, nous testons l'effet des différents diamètres de barres d'armature (surface) dans les poteaux sur leur capacité à résister au feu, tout en fixant les autres facteurs.

4.2.3 Caractéristique :

- Le poteau est au RDC d'un bâtiment de plusieurs étages servant au stockage d'archives. Il est en ambiance intérieure (Humidité minimal).
- Béton C30 à granulats calcaire.
- Section (Cm) : poteau carré de sections : 30.
- Longueur totale : 3 m.
- Longueur efficace : 3 m.
- Acier HA16, HA20, HA25, HA32 laminé de classe B ou C, 3 barres sur chaque face.
- Enrobage 3 cm.
- Charge permanente totale N : 100 kN.
- Durée de stabilité au feu exigée (Min) : 30, 60, 90, 120, 150, 180,240, sous feu ISO R 834.

Ces caractéristiques sont regroupées sur le tableau suivant :

Poteaux	B [cm]	N [KN]	As [nbφ16]	Er [cm]	Lf [m]	Yc [KN.m]	Ys [KN.m]	Teneur en eau %	Type du granulat
P.CA.01	30	100	8φ16	3	3	30	500	0.5 %	calcaire
P.CA.02	30	100	8φ20	3	3	30	500	0.5 %	calcaire
P.CA.03	30	100	8φ25	3	3	30	500	0.5 %	calcaire
P.CA.04	30	100	8φ32	3	3	30	500	0.5 %	calcaire

Table 4. 3 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique.

4.2.4 Étude des résultats :

Le tableau suivant contient les résultats de l'étude de chacun des cas du **tableau (.43)**.

Résistance au feu normalisé	Moment résistant ultime (KN.m)			
	8φ16	8φ20	8φ25	8φ32
30	106.02	156.93	232.09	349.81
60	73.88	108.04	156.21	231.02
90	48.04	69.09	100.29	146.26
120	31.27	43.39	62.21	93.62
150	21.84	29.05	40.35	59.59
180	14.23	20.48	29.24	42.23
240	10.01	11.46	14.02	22.12

Table 4. 4 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la section d'armature.

Les résultats du **tableau (4.4)** peuvent être représentés graphiquement comme suit :

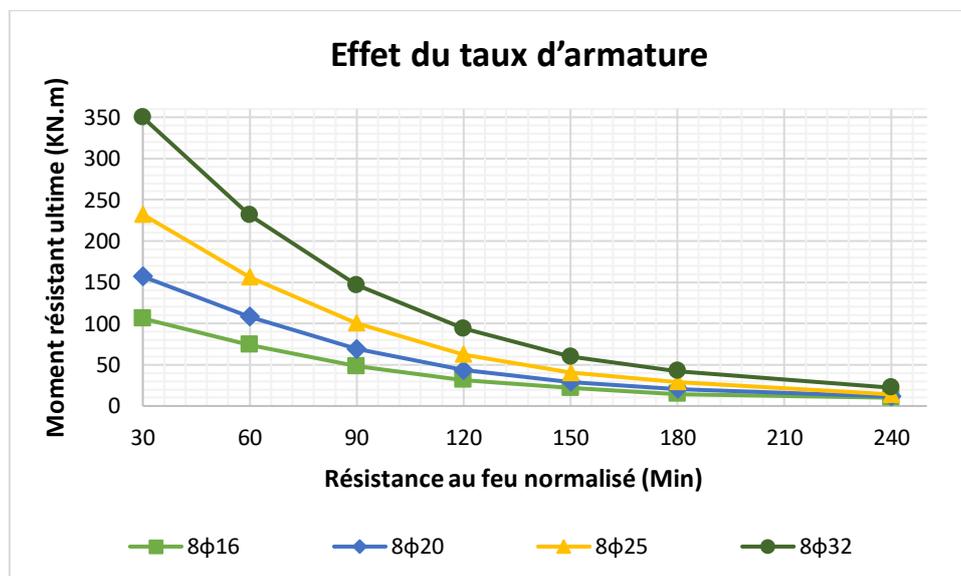


Figure 4. 5 : La résistance au feu des poteaux dans le temps.

La **fig.4.6** illustre la résistance des poteaux au feu et leur capacité à éviter l'effondrement en raison de l'augmentation des températures au fil du temps pour diverses sections d'armatures.

Dans les 30 premières minutes, les résultats de l'étude sont affichés sur **la figure (4.7)**.

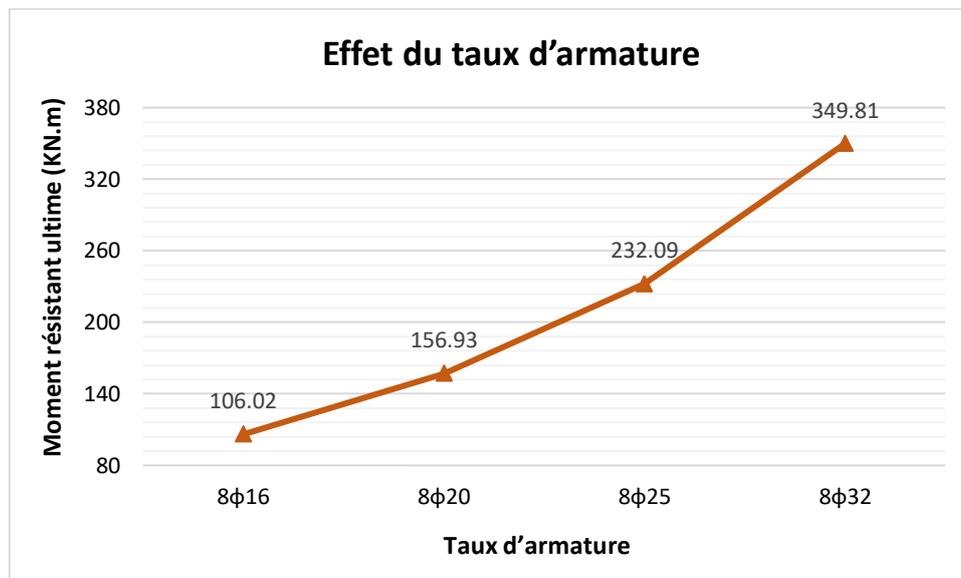


Figure 4. 6 : L'effet de différents diamètres de barres d'armature sur la capacité des poteaux à résister au feu pour 30 min.

4.2.5 Conclusion :

Dans cette étude, nous concluons qu'en augmentant la surface des barres d'armature dans les poteaux, la résistance au feu augmente. Par exemple, le gain à 30 minutes pour le type (8φ20) est de 200kN.m, par rapport à (8φ16). Cette différence n'est pas constante avec l'augmentation de la durée du feu. En tous les cas et types d'armement, elle tend vers zéro lorsque le temps de d'exposition au feu rapproche les 4 heures. Cela indique que les caractéristiques mécaniques des barres d'armature agissent fortement sur la résistance au feu des poteaux.

4.3 Effet de l'enrobage.

4.3.1 But :

Nous étudions ici l'effet du changement d'emplacement des barres d'armature dans les poteaux sur leur capacité à résister au feu en cas d'incendie.

4.3.2 Description :

Nous testons l'effet de la proximité ou de la distance des barres d'armature en acier par rapport aux faces des poteaux sur leur capacité à résister au feu, tout en maintenant fixe les autres facteurs.

4.3.3 Caractéristique :

- Le poteau est au RDC d'un bâtiment de plusieurs étages servant au stockage d'archives. Il est en ambiance intérieure (Humidité minimal).
- Béton C30 à granulats calcaire.
- Section (Cm) : poteau carré de sections : 40.
- Longueur totale : 3 m.
- Acier HA16 laminé de classe B ou C, 3 barres sur chaque face.
- Enrobage (Cm) : 3, 3.5, 4, 4.5, 5.
- Charge permanente totale N : 100 kN.
- Durée de stabilité au feu exigée (Min) : 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, sous feu ISO R 834.

Ces caractéristiques sont regroupées sur le tableau suivant :

Poteaux	B [cm]	N [KN]	As [nbφ16]	Er [cm]	Lf [m]	Yc [KN.m]	Ys [KN.m]	Teneur en eau %	Type du granulat
P.CA.01	30	100	8	3	3	3	30	500	0.5 %
P.CA.02	30	100	8	3	35	3	30	500	0.5 %
P.CA.03	30	100	8	3	40	3	30	500	0.5 %
P.CA.04	30	100	8	3	45	3	30	500	0.5 %
P.CA.05	30	100	8	3	50	3	30	500	0.5 %

Table 4. 5 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique.

4.3.4 Étude des résultats :

Le tableau suivant contient les résultats de l'étude de chacun des cas du **tableau (4.5)**.

Résistance au feu normalise	Moment résistant ultime KN.m				
	Er= 3.0 cm	Er=3.5cm	Er= 4.0 cm	Er=4.5cm	Er= 5.0 cm
30	109.24	108.78	103.18	103.36	98.28
60	70.32	89.57	89.41	95.89	95.62
90	44.81	55.86	63.29	71.65	78.07
120	29.96	35.38	44.4	49.51	59.8
150	20.74	24.18	32.23	35.73	43.92
180	12.64	17.05	23.51	25.43	34.38
240	3.79	10.37	9.76	13.37	19.02

Table 4. 6 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de l'enrobage.

Les résultats du **tableau (4.6)** peuvent être représentés graphiquement comme suit :

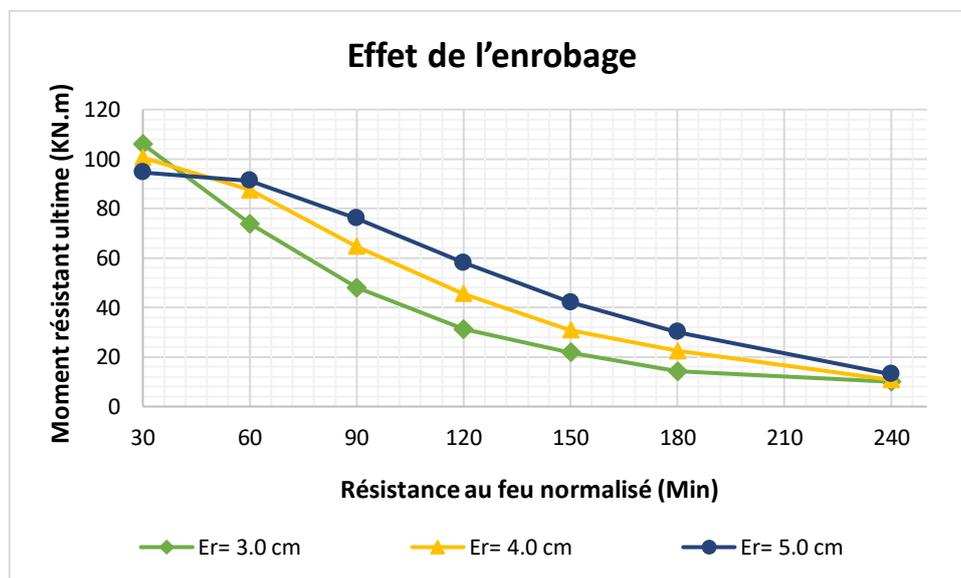


Figure 4. 7 : La résistance au feu des poteaux dans le temps.

L'effet de la présence de barres d'armature à trois endroits différents à l'intérieur des poteaux sur leur résistance au feu et leur capacité à éviter l'effondrement à cause de températures élevées dans le temps est illustré dans **la fig.4.8**.

Cette étude conduit à des résultats différents, peuvent s'expliquer comme suit :

A) pour les 30 premières minutes, les résultats sont affichés sur la figure. (4.9).

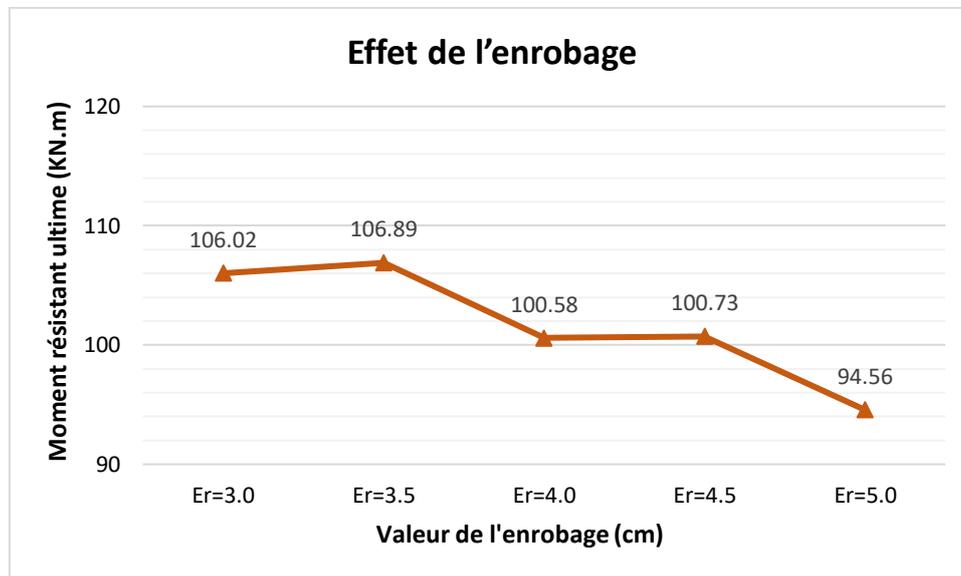


Figure 4. 8 : L'effet de différents emplacements des barres d'armature sur la capacité des poteaux à résister au feu.

B) pour les 60 minutes, les résultats de l'étude sont affichés sur la figure. (4.10).

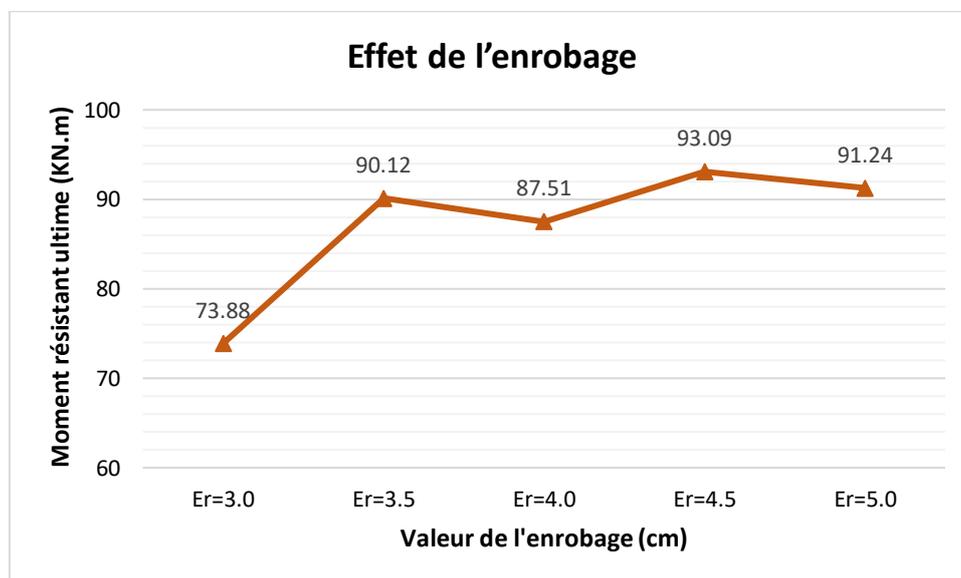


Figure 4. 9 : L'effet de différents emplacements des barres d'armature sur la capacité des poteaux à résister au feu.

C) Pour les 120 minutes, les résultats de l'étude sont affichés sur la figure. (4.11).

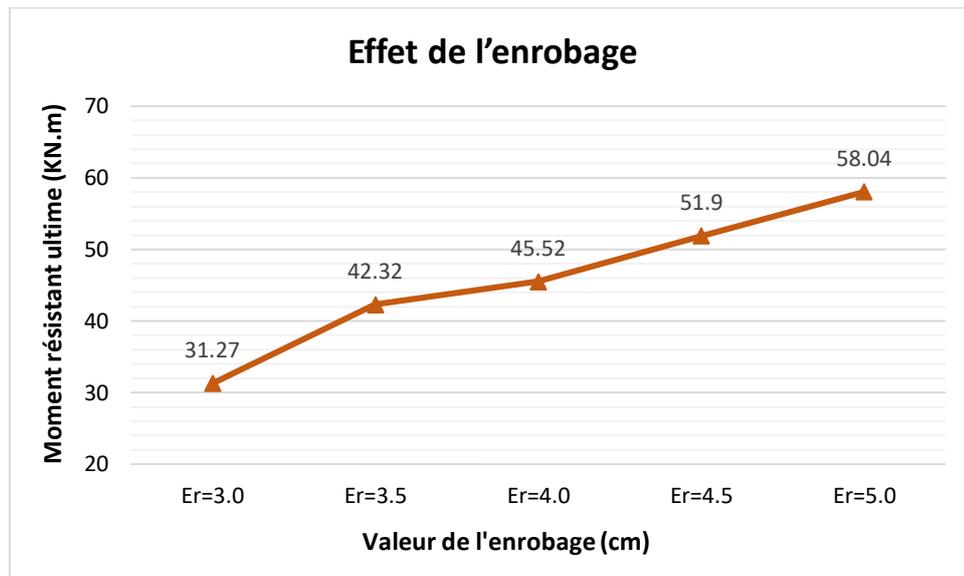


Figure 4. 10 : L'effet de différents emplacements des barres d'armature sur la capacité des poteaux à résister au feu.

4.3.5 Conclusion :

La résistance au feu des poteaux diminue avec le temps dans le premier cas, tandis que dans les deuxième et troisième cas, elle tend à augmenter, et cela est dû au fait que les barres d'armature (à enrobage minimal font augmentés la résistance mécanique de la section). Il convient de noter que si les barres d'armature sont situées à proximité des faces des poteaux, leur résistance au feu est élevée, ce qui diminue lorsque ces barres sont éloignées des faces et cela s'observe au bout de 30 minutes. Par contre, si les barres d'armature sont situées en un point plus éloigné et plus profond que les faces de ces poteaux, leur résistance au feu est faible, ce qui retarde, à mesure, que le flux thermique se rapproche de ces barres à l'intérieur des poteaux et ceci peut être observé après 120 minutes d'exposition au feu.

4.4 Effet de la longueur de flambement.

4.4.1 But :

L'effet des différentes longueurs de flambement des poteaux sur leur résistance au feu fait l'objet de ce paragraphe.

4.4.2 Description :

Dans cette étude, Nous testons l'effet des différentes longueurs de flambement des poteaux sur leur résistance au feu, tout en gardent fixes les autres facteurs.

4.4.3 Caractéristique :

- Le poteau est au RDC d'un bâtiment de plusieurs étages servant au stockage d'archives. Il est en ambiance intérieure (Humidité minimal).
- Béton C30 à granulats calcaire.
- Section (Cm) : poteau carré de sections : 30.
- Longueur efficace (m) : 3, 4, 5, 6, 10.
- Acier HA16 laminé de classe B ou C, 3 barres sur chaque face.
- Enrobage 3 cm.
- Charge permanente totale N : 100 kN.
- Durée de stabilité au feu exigée (Min) : 30, 60, 90, 120, 150, 180,240, sous feu ISO R 834

Ces caractéristiques sont regroupées sur le tableau suivant :

Poteaux	B [cm]	N [KN]	As [nbφ16]	Er [cm]	Lf [m]	Yc [KN.m]	Ys [KN.m]	Teneur en eau %	Type du granulat
P.CA.01	30	100	8	3	3	30	500	0.5 %	calcaire
P.CA.02	30	100	8	3	4	30	500	0.5 %	calcaire
P.CA.03	30	100	8	3	5	30	500	0.5 %	calcaire
P.CA.04	30	100	8	3	6	30	500	0.5 %	calcaire
P.CA.05	30	100	8	3	10	30	500	0.5 %	calcaire

Table 4. 7 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique.

4.4.4 Étude des résultats :

Le tableau suivant contient les résultats de l'étude de chacun des cas du **tableau (.47)**.

Résistance au feu normalisé (Min)	Moment résistant ultime KN.m				
	Lf = 3 m	Lf = 4m	Lf = 5m	Lf =6 m	Lf = 10m
30	106.02	104.34	101.66	97.78	77.17
60	73.88	71.12	67.61	62.42	23.69
90	48.04	44.91	41.68	30.49	0
120	31.27	28.53	19.05	15.89	0
150	21.84	14.81	13.65	0	0
180	14.23	12.16	0	0	0
240	10.01	7.13	0	0	0

Table 4. 8 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la longueur de flambement.

Les résultats du **tableau (4.8)** peuvent être représentés graphiquement comme suit :

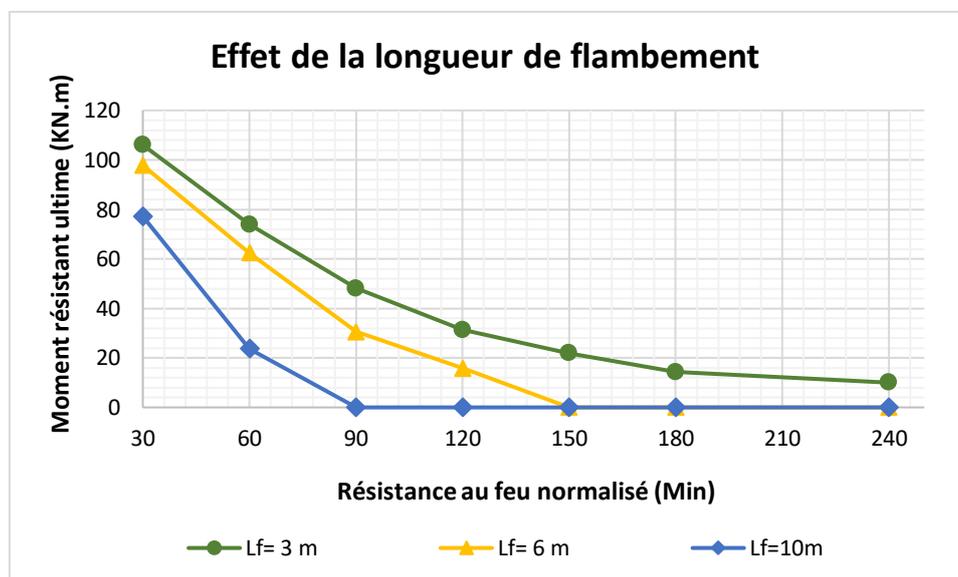


Figure 4. 11 : La résistance au feu des poteaux dans le temps.

La fig.4.12 montre la capacité des poteaux dans chaque cas de flambement à résister au feu et à éviter l'effondrement dû à l'augmentation des températures au fil du temps.

Pour les 30 premières minutes, les résultats de l'étude sont affichés sur la figure. (4.13).

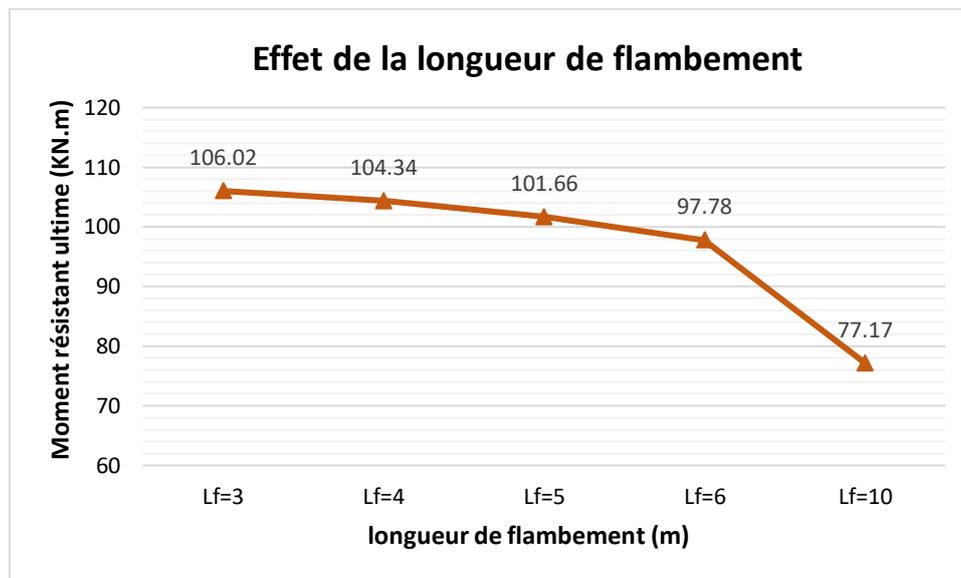


Figure 4. 12 : Résistance au feu pour différentes longueurs de flambement des poteaux pendant une période de 30 min.

4.4.5 Conclusion :

En termes simples, plus la longueur de flambement des poteaux est courte, plus leur résistance au feu est grande, car on constate que leur résistance diminue progressivement avec l'augmentation de la longueur de flambement. Si les longueurs de flambement sont grands, les poteaux s'effondrent rapidement et sensiblement, comme dans le cas de **Lf=10** m où les poteaux s'effondrent au bout d'une heure et demie seulement.

4.5 Effet de la résistance caractéristique du béton.

4.5.1 But :

Nous visons à étudier l'effet de différentes résistances caractéristique du béton sur la capacité des poteaux à résister au feu en cas d'incendie.

4.5.2 Description :

Dans cette expérience numérique, nous étudions l'effet des résistances caractéristique des bétons des poteaux, tout en fixant les autres facteurs.

4.5.3 Caractéristiques des poteaux :

- Béton C (20/25/30) à granulats calcaire.
- Section (Cm) : poteau carré de sections : 30.
- Longueur totale : 3 m.
- Longueur efficace : 3m.
- Acier HA16 laminé de classe B ou C, 3 barres sur chaque face.
- Enrobage 3 cm.
- Charge permanente totale N : 100 kN.
- Durée de stabilité au feu exigée (Min) : 30, 60, 90, 120, 150, 180,240, sous feu ISO R 834

Ces caractéristiques sont regroupées sur le tableau suivant :

Poteaux	B [cm]	N [KN]	As [nbφ16]	Er [cm]	Lf [m]	Yc [KN.m]	Ys [KN.m]	Teneur en eau %	Type du granulat
P.CA.01	30	100	8	3	3	20	500	0.5 %	calcaire
P.CA.02	30	100	8	3	3	25	500	0.5 %	calcaire
P.CA.03	30	100	8	3	3	30	500	0.5 %	calcaire

Table 4. 9 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique.

4.5.4 Étude des résultats :

Le tableau suivant contient les résultats de l'étude de chacun des cas du tableau (.49).

Résistance au feu normalisé (Min)	Moment résistant ultime KN.m		
	Yc= 20 KN.m	Yc= 25 KN.m	Yc= 30 KN.m
30	103.36	105.06	106.02
60	70.86	72.60	73.88
90	45.66	46.90	48.04
120	29.47	30.46	31.27
150	18.10	20.30	21.84
180	12.06	12.85	14.23
240	9.50	9.68	10.01

Table 4. 10 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la résistance caractéristique du béton.

Les résultats du tableau (4.10) peuvent être représentés graphiquement comme suit :

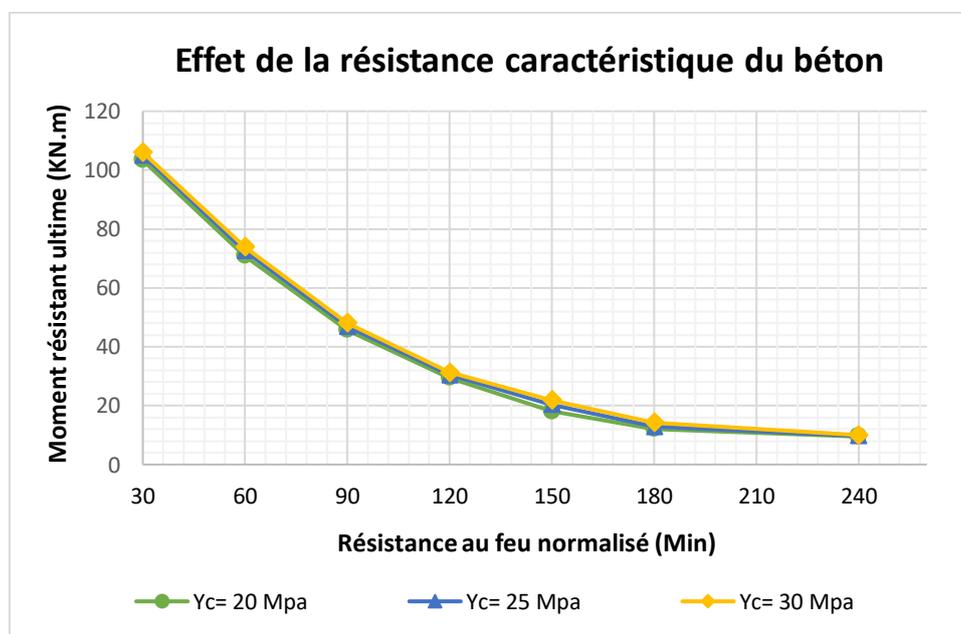


Figure 4. 13 : La résistance au feu du poteau dans le temps.

La fig.4.14 montre la capacité des poteaux dans chaque situation à résister au feu et à éviter l'effondrement dû à l'augmentation des températures au fil du temps.

Pour les 30 premières minutes, les résultats de l'étude sont affichés sur la figure. (4.15).

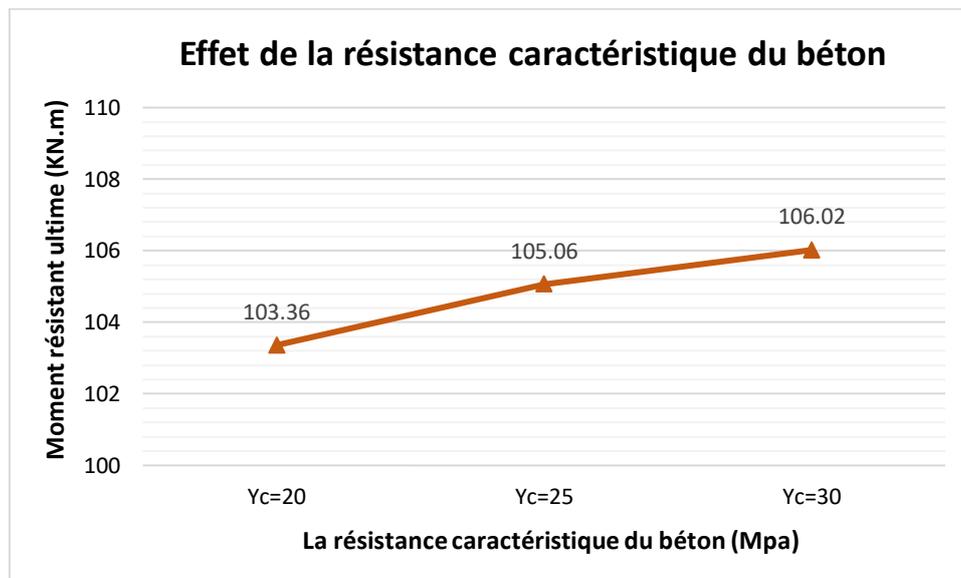


Figure 4. 14 : L'effet de différents types des résistances caractéristique du béton sur la résistance des poteaux au feu avec 30 min.

4.5.5 Conclusion :

Nous concluons que le facteur de résistance caractéristique du béton n'affecte pas de manière significative la résistance au feu des poteaux. Car la différence de résistance entre les trois cas étudiés est très faible. Elle augmente de **103KN.m** lorsque **Yc=20KN.m** à **106KN.m** lorsque **Yc=30KN.m**. Soit une différence de **3KN.m** seulement. On voit qu'au fil du temps, la résistance des poteaux dans chacun des trois cas diminue progressivement de la même façon jusqu'à atteindre le point de rupture.

4.6 Effet de la limite élastique des armatures.

4.6.1 But :

Nous visons à tester l'effet de deux limites élastiques des armatures, à savoir 400KN.m et 500KN.m sur la capacité des poteaux à résister au feu en cas d'incendie.

4.6.2 Description :

Dans cette étude, nous testons l'effet des deux limites élastiques des armatures sur la capacité des poteaux à résister à l'effondrement tout en fixant les autres facteurs.

4.6.3 Caractéristique :

- Le poteau est au RDC d'un bâtiment de plusieurs étages servant au stockage d'archives. Il est en ambiance intérieure (Humidité minimal).
- Béton C30 à granulats calcaire.
- Section (Cm) : poteau carré de sections : 30.
- Longueur totale : 3 m.
- Acier HA16 laminé de classe B ou C, 3 barres sur chaque face.
- Enrobage 3 cm.
- Charge permanente totale N : 100 kN.
- Durée de stabilité au feu exigée (Min) : 30, 60, 90, 120, 150, 180,240, sous feu ISO R 834.

Ces caractéristiques sont regroupées sur le tableau suivant :

Poteaux	B [cm]	N [KN]	As [nbφ16]	Er [cm]	Lf [m]	Yc [KN.m]	Ys [KN.m]	Teneur en eau %	Type du granulat
P.CA.01	30	100	8	3	3	30	400	0.5 %	Calcaire
P.CA.02	30	100	8	3	3	30	500	0.5 %	Calcaire

Table 4. 11 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique.

4.6.4 Étude des résultats :

Le tableau suivant contient les résultats de l'étude de chacun des cas du tableau (4.11).

résistance au feu normalisé (Min)	Moment résistant ultime KN.m	
	$Y_s= 400$ KN.m	$Y_s= 500$ KN.m
30	87.47	106.02
60	61.60	73.88
90	40.48	48.04
120	26.59	31.27
150	19.31	21.84
180	12.10	14.23
240	9.74	10.01

Table 4. 12 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la nuance des armatures.

Les résultats du tableau (4.12) peuvent être représentés graphiquement comme suit :

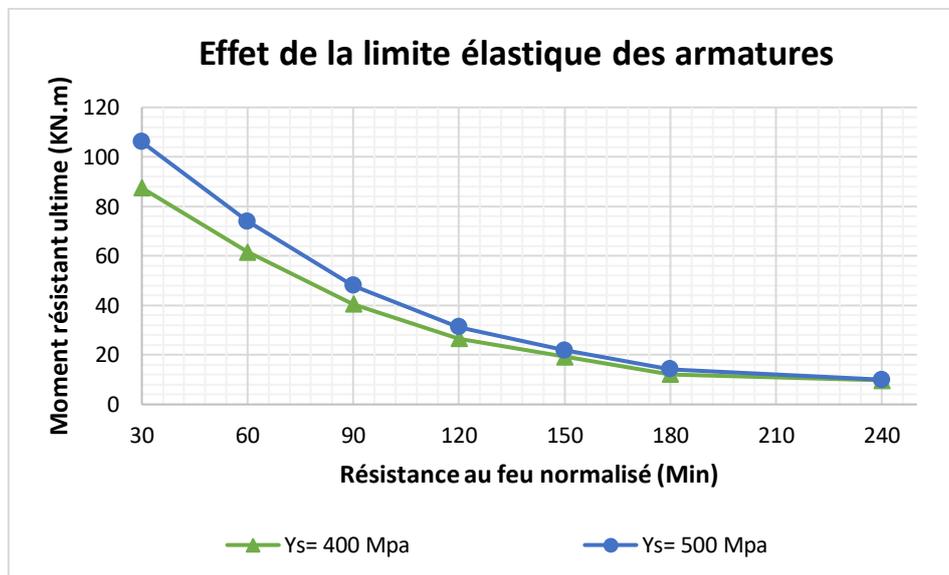


Figure 4. 15 : La résistance au feu du poteau dans le temps.

La fig.4.16 montre la capacité des poteaux à résister au feu et à éviter l'effondrement dû à l'augmentation des températures au fil du temps pour les deux limites élastiques d'armatures.

Pour les 30 premières minutes, les résultats de l'étude sont affichés sur la figure. (4.17).

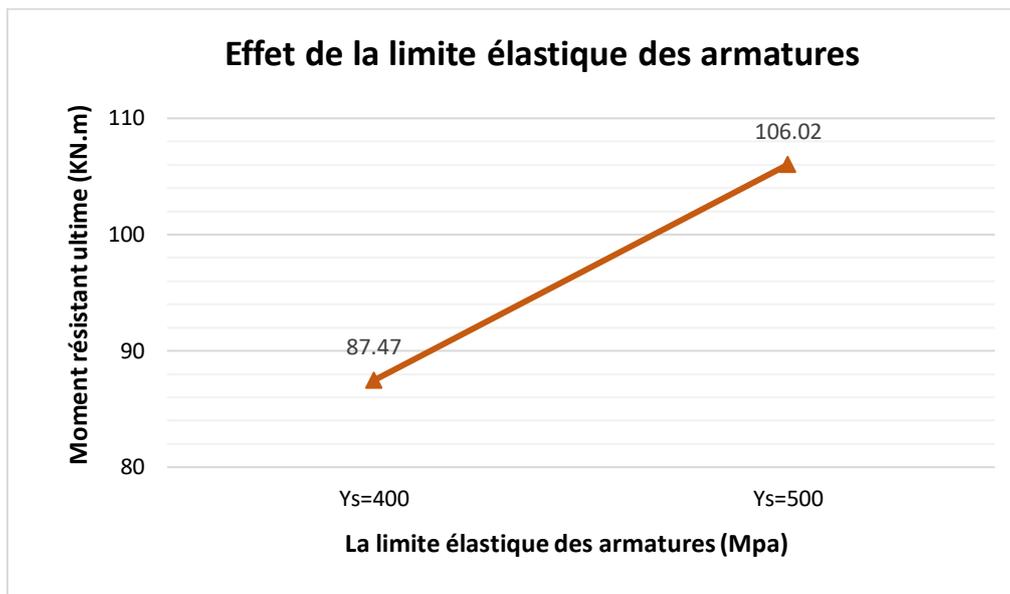


Figure 4. 16 : L'effet des deux limites élastiques des armatures sur la résistance au feu du poteau avec 30 min.

4.6.5 Conclusion :

Nous observons que lorsque la limite élastique de l'armature est égale à 500 KN.m , la résistance au feu des poteaux est de 106.02 KN.m . Cette dernière est supérieure à celle de la limite élastique de l'armature à 400 KN.m , qui est égale à 87.47 KN.m . Il convient de noter que la différence de résistance entre les deux cas commence à diminuer avec le temps jusqu'à ce que la différence devienne très faible. Finalement, la résistance des deux cas converge vers le point de rupture au temps 180min.

4.7 Effet de la teneur en eau.

4.7.1 But :

Nous testons l'effet de la teneur en eau sur la capacité des poteaux à résister au feu en cas d'incendie.

4.7.2 Description :

Nous étudions maintenant l'effet du facteur de la teneur en eau sur la capacité des poteaux à résister au feu tout en fixant les autres facteurs. Six cas ont été considérés.

4.7.3 Caractéristique :

- Le poteau est au RDC d'un bâtiment de plusieurs étages servant au stockage d'archives. Plusieurs ambiances sont prises en compte, de 0.5% jusqu'à 3.0% avec un pas de 0.5%.
- Béton C30 à granulats calcaire.
- Section (Cm) : poteau carré de sections : 30.
- Longueur efficace : 3 m.
- Acier HA16 laminé de classe B ou C, 3 barres sur chaque face.
- Enrobage 3 cm.
- Charge permanente totale N : 100 kN.
- Durée de stabilité au feu exigée (Min) : 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, sous feu ISO R 834.

Ces caractéristiques sont regroupées sur le tableau suivant :

Poteaux	B [cm]	N [KN]	As [nbφ16]	Er [cm]	Lf [m]	Yc [KN.m]	Ys [KN.m]	Teneur en eau %	Type du granulat
P.CA.01	30	100	8	3	3	30	500	0.5 %	Calcaire
P.CA.02	30	100	8	3	3	30	500	1 %	Calcaire
P.CA.03	30	100	8	3	3	30	500	1.5 %	Calcaire
P.CA.04	30	100	8	3	3	30	500	2 %	Calcaire
P.CA.05	30	100	8	3	3	30	500	2.5 %	Calcaire
P.CA.06	30	100	8	3	3	30	500	3 %	Calcaire

Table 4. 13 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique.

4.7.4 Étude de résultat :

Le tableau suivant contient les résultats de l'étude de chacun des cas du tableau (.413).

Résistance au feu normalisé (Min)	Moment résistant ultime (KN.m)					
	W=0.5%	W=1%	W=1.5%	W=2%	W=2.5%	W=3%
30	106.02	106.11	106.25	106.32	106.38	106.47
60	73.88	74.65	75.14	75.35	76.03	76.45
90	48.04	48.8	49.62	50.31	51.05	51.56
120	31.27	31.7	32.3	32.85	33.41	33.95
150	21.84	22.23	22.61	23.02	23.39	23.8
180	14.23	14.66	14.8	15.2	15.33	15.81
240	10.01	10.11	10.2	10.28	10.36	10.44

Table 4. 14 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de la teneur en eau.

Les résultats du tableau (4.14) peuvent être représentés graphiquement comme suit :

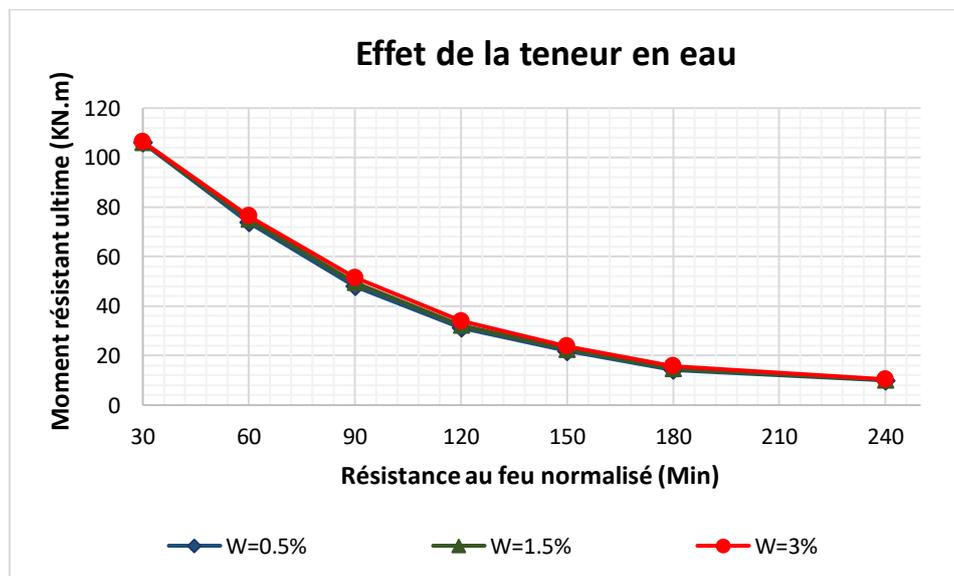


Figure 4. 17 : La résistance au feu du poteau dans le temps.

La fig.4.18 montre la capacité des poteaux dans chaque cas à résister au feu et à éviter l'effondrement dû à l'augmentation des températures au fil du temps.

Pour les 30 premières minutes, les résultats de l'étude sont affichés sur la figure. (4.19).

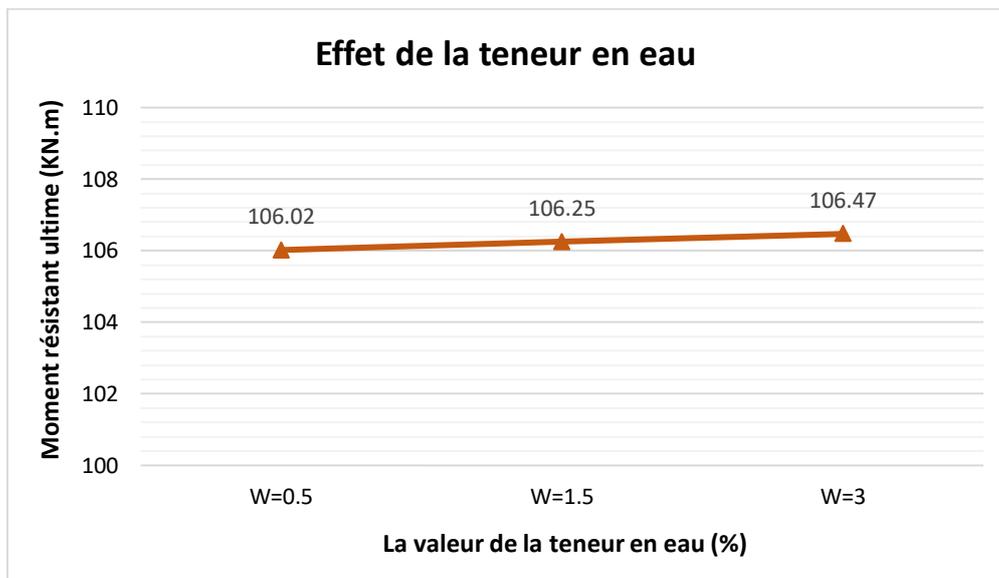


Figure 4. 18 : L'effet du la teneur en eau sur la résistance au feu du poteau avec 30 min.

4.7.5 Conclusion :

Nous concluons que, quelle que soit la valeur du facteur de teneur en eau, les valeurs de résistance au feu des poteaux ne diffèrent pas beaucoup les unes des autres. Elles sont très proches et presque égales. Au final, Nous concluons que le facteur de teneur en eau n'est pas un facteur influent dans cette étude.

4.8 Effet de type de granulats.

4.8.1 But :

L'effet de l'utilisation de deux types différents de granulats dans des poteaux sur leur capacité à résister au feu en cas d'incendie fait l'objet de ce paragraphe.

4.8.2 Description :

Les granulats considérés sont d'origines calcaire et siliceux, qui sont les plus utilisés en construction de bâtiments.

4.8.3 Caractéristique :

- Le poteau est au RDC d'un bâtiment de plusieurs étages servant au stockage d'archives. Il est en ambiance intérieure (Humidité minimal).
- Béton C30 à granulats calcaire et granulats siliceux.
- Section (Cm) : poteau carré de sections : 30.
- Longueur efficace (m) : 3.
- Acier HA16 laminé de classe B ou C, 3 barres sur chaque face.
- Enrobage 3 cm.
- Charge permanente totale N : 100 kN.
- Durée de stabilité au feu exigée (Min) : 30, 60, 90, 120, 150, 180,240, sous feu ISO R 834.

Ces caractéristiques sont regroupées sur le tableau suivant :

Poteaux	B [cm]	N [KN]	As [nbφ16]	Er [cm]	Lf [m]	Yc [KN.m]	Ys [KN.m]	Teneur en eau %	Type du granulat
P.CA.01	30	100	8	3	3	30	500	0.5	Calcaire
P.CA.02	30	100	8	3	3	30	500	0.5	Siliceux

Table 4. 15 : Caractéristiques géométrique, mécanique et physique.

4.8.4 Étude des résultats :

Le tableau suivant contient les résultats de l'étude de chacun des cas du tableau (4.15).

Résistance au feu normalisé (Min)	Moment résistant ultime KN.m	
	Calcaire	Siliceux
30	106.02	105.14
60	73.88	72.52
90	48.04	46.49
120	31.27	29.77
150	21.84	19.90
180	14.23	13.58
240	10.01	8.74

Table 4. 16 : Résistance au feu des poteaux carrés en fonction de type de granulats.

Les résultats du tableau (4.16) peuvent être représentés graphiquement comme suit :

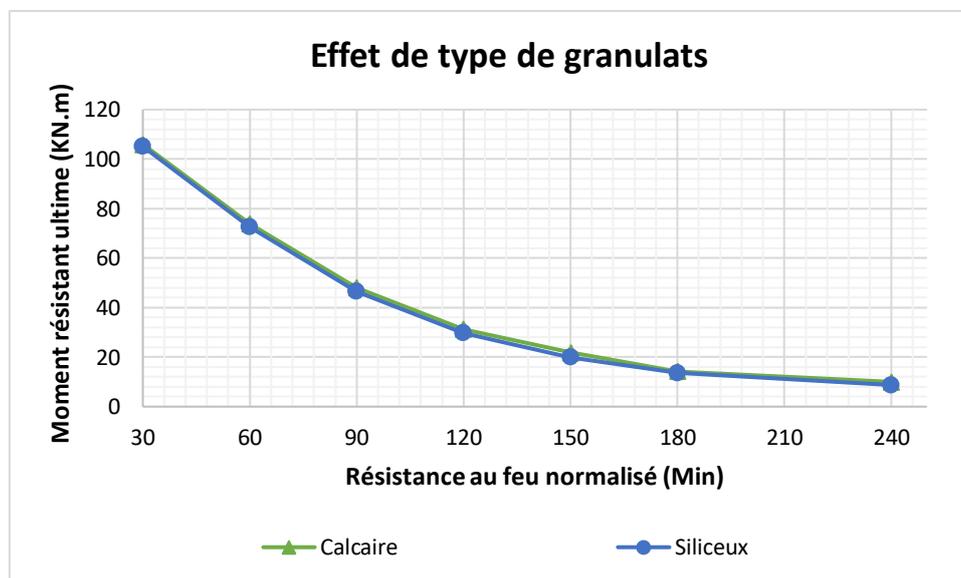


Figure 4. 19 : La résistance au feu des poteaux dans le temps.

La figure 4.20 illustre la résistance des poteaux à l'incendie causé par l'augmentation des températures au fil du temps.

Pour les 30 premières minutes, les résultats de l'étude sont affichés sur la figure. (4.21).

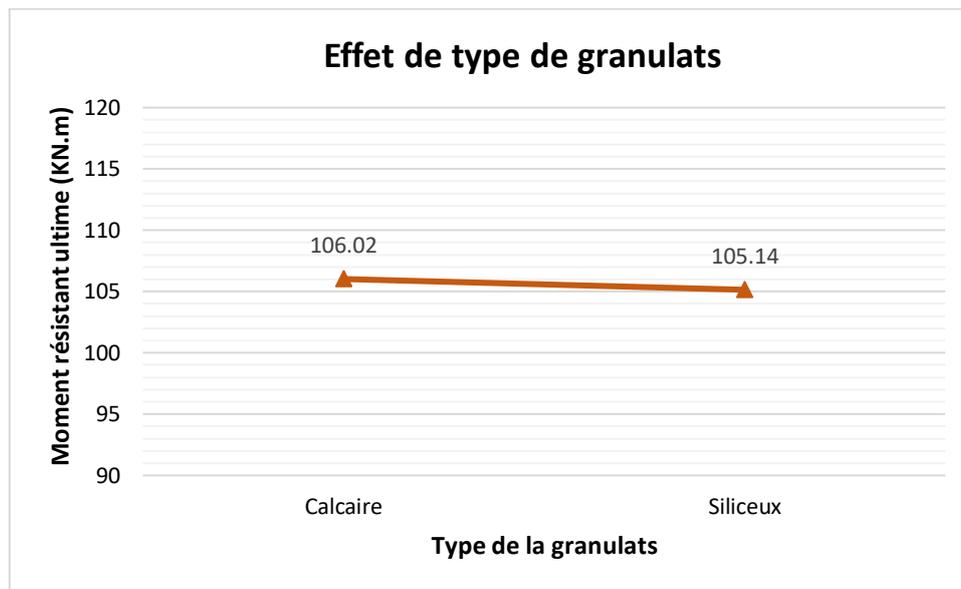


Figure 4. 20 : L'effet du la type de granulâtes sur la résistance au feu des poteaux avec 30 min.

4.8.5 Conclusion :

Nous concluons que la résistance des poteaux au feu en présence de granulats calcaires est légèrement supérieure à la résistance en présence de granulats siliceux. Par conséquent, l'effet des granulats est quasiment insignifiant.

Références:

[1] ALBADAREEN Mohee Aldeen, GUENFOUD Hamza AND GUENFOUD Mohammed (2024), "Contribution to the analysis of slender reinforced concrete columns subjected to a thermal gradient", 12th international conference on applied analysis and mathematical modelling, 19-23 July, 2024, Istanbul, Turkey.

[2] ALBADAREEN Mohee Aldeen, Hamza GUENFOUD, Mohamed GUENFOUD, (En Cours) "Contribution à l'analyse des poteaux en béton armé élancés soumis à un gradient thermiques", 4th International Symposium on Construction Management and Civil Engineering, (ISCMCE- 2024) Novembre 04-05, 2024 Skikda, Alegria.

CONCLUSION GENERALE

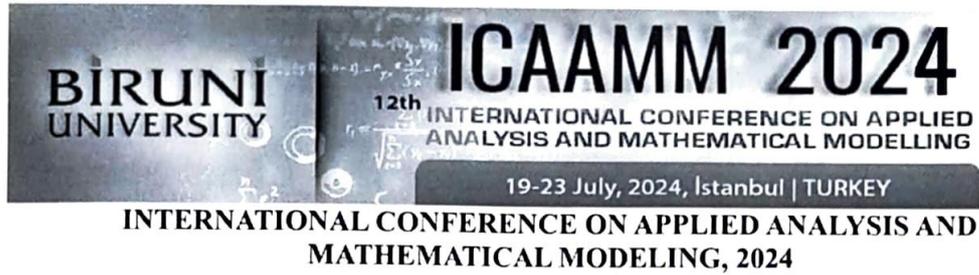
L'objectif du sujet présenté dans ce mémoire est d'étudier et d'analyser l'iKN.m et des températures élevées provoquées par les feux d'incendie sur les quatre faces des poteaux. Ces derniers, sont des éléments constitutifs très important dans les constructions et les bâtiments. La capacité des poteaux à résister à la rupture et fissuration résultant de séchage et de l'évaporation d'eau présent dans la composition du béton, réduisant ainsi progressivement sa résistance, sa dureté et son module d'élasticité jusqu'à ce que le point d'effondrement soit atteint.

Dans cette étude, les principales conclusions sont les suivantes :

- Il est très difficile de prédire le comportement du béton à des températures élevées.
- Le logiciel CIM'Feu s'est avéré très efficace et rapide dans les calculs thermiques requis.
- Les caractéristiques géométriques et matérielles des matériaux qui composent les poteaux ont un fort iKN.m et sur leur résistance.
- La résistance des poteaux n'a été influencée que par quatre des facteurs paramétriques étudiés, les autres n'ayant eu que peu ou presque aucun effet.
- L'effondrement se produit en raison d'une diminution des caractéristiques mécaniques restantes du béton (diminution de la résistance à la compression, de la résistance à la traction et diminution du module d'élasticité).
- Il est recommandé de renforcer la partie tendue exposée au feu en augmentant le nombre de barres d'armatures, tout en maintenant la même section d'armatures pour améliorer la résistance au feu des éléments en béton armé (effet d'enrobage).
- Le calcul manuel utilisant la méthode des différences finies prend du temps, surtout si plusieurs cas sont étudiés. Pour cette raison, nous utilisons des logiciels et des outils informatiques qui facilitent ces calculs et nous font gagner du temps et des efforts.
- Le béton d'enrobage a un iKN.m et favorable, il agit comme un ralentisseur pour réduire la conductivité thermique de l'acier, ce qui lui confère une résistance accrue. Ainsi, l'incorporation d'une couche d'enrobage supplémentaire ou d'un matériau isolant pourrait constituer de mesure supplémentaire de protection contre les incendies.
- Plus les poteaux en béton armé sont élancés, plus l'effet de la chaleur sur elle est significatif.

LISTE DES ANNEXES :

Annexe 1 : Official Acceptance and Invitation Letter.



Official Acceptance and Invitation Letter

Letter Date: 6.6.2024

Dear Mr. ALBADAREEN Mohealdeen

University of 8 Mai 1945, Guelma, Palestine

I am glad to let you know that your peer-reviewed abstract entitled:

"Contribution to the analysis of slender reinforced concrete columns subjected to a thermal gradient "

has been accepted as **FaceToFace-Oral Presentation** (for oral presentation 15 or 20 minutes talk) as well as inclusion in the INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED ANALYSIS AND MATHEMATICAL MODELING, 2024

Please check FEE policy from: <http://ntmsci.com/Conferences/ICAAMM2024/Fee>

Thank you very much for your interest in the INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED ANALYSIS AND MATHEMATICAL MODELING, 2024.

Attention Please:

Although you have received an invitation letter prior to payment, this does not guarantee that your abstract will be published in the abstract book or that you will receive a participation certificate. To ensure that your abstract is included in the abstract book and to obtain a participation certificate, you must confirm your attendance by providing an official letter of attendance from your university.



Yours Sincerely,
Prof. Dr. Mustafa Bayram
Chairman of ICAAMM2024

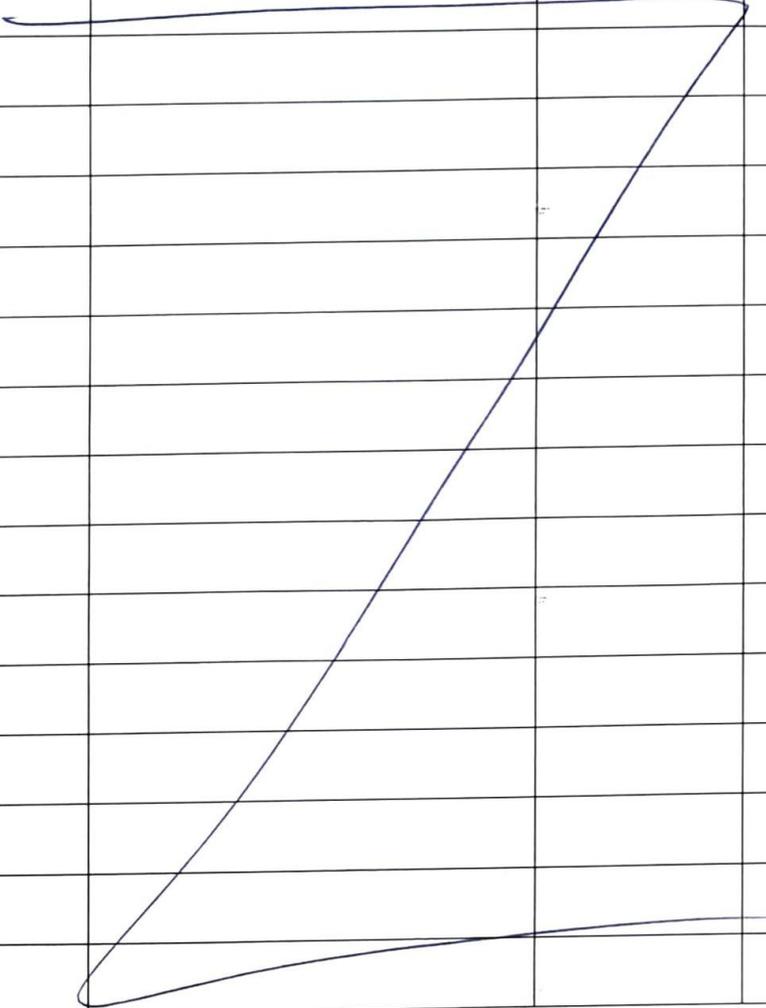
Annexe 2 : Fiche de suivi d'encadrement de projet PFE M2 Structures.

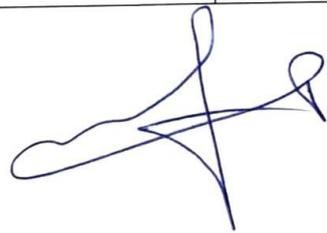
Université 8 mai 1945
 Faculté des sciences et de la technologie
 Département de Génie civil et d'Hydraulique
 Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique

Fiche de suivi d'encadrement de projet PFE M2-Structures

Intitulé du projet :
 Contribution à l'analyse des poteaux élancés soumises à un gradient thermique
 Contribution to the analysis of high columns subjected to a thermal gradient
 Nom : ELBEDARINE Prénom : Mahieddine
 Email : Muhye20.badareen00@gmail.com

Date du RDV	Tache demandée	observation	Signature
29/01/2024	Revue de Contact + définition du sujet à traiter.	P	
05/02/2024	Compression simple + Composée	P	
07/02/2024	Feu + Incendie	P	
12/2/2024	Généralités sur le feu	P	
19/2/2024	Poteau sous feu	P	
26/2/2024	Revue en ligne sur logiciel	P	
05/03/2024	//	P	
11/03/2024	//	P	
19/03/2024	تصميم	تصميم	
21/03/2024	Faire les simulations	P	
28/03/2024	Faire les simulations	P	
15/04/2024	Analyse des résultats	P	
22/04/2024	Analyse des Résultats	P	
2/05/2024	Analyse des Résultats	P	
6/5/2024	Correction au mémoire	P	
13/05/2024	Correction au mémoire	P	
18/05/2024	Correction au mémoire	P	
23/05/2024	Correction au mémoire	P	

08/06/2024	Correction du d'emploi	<u>P</u>	
10/06/2024	Vérification finale du d'emploi	<u>P</u>	
			



Annexe 3 : Attestation de soutenabilité.

<p>République Algérienne Démocratique et populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique</p> <p>Université 08 Mai 45 Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Civil et Hydraulique</p>		<p>الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية وزارة التعليم العالي والبحث العلمي</p> <p>جامعة 08 ماي 45 قالمة كلية العلوم و التكنولوجيا قسم الهندسة المدنية و الري</p>
---	---	---

ATTESTATION DE SOUTENABILITE

Encadreur : GUENFOUD MOHAMMED

Grade : Professeur

Etudiant(e) : 1. ALBADAREEN MOHEEALDEEN

Année d'étude : Master 2 en Génie Civil

Option : STRUCTURES

Thème du projet :

المساهمة في تحليل الأعمدة النحيلة المعرضة للتدرج الحراري

Contribution à l'analyse des poteaux élancés soumis à un gradient thermique

Contribution to the analysis of high columns subjected to a thermal gradient

<p>Encadreur : بيان المؤطر</p> <p>أنا الممضي أسفله السيد(ة) : قنفود محمد.... مؤطر الطلبة المذكورين أعلاه و الذين أنجزوا عملهم في الأجل المحدد أسمح لهم بمناقشة مذكرة التخرج.</p> <p>المؤطر/ Encadreur</p> 