

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de
MASTER Académique en GENIE CIVIL
Option : Structure et matériaux

Présenté par : *M^{elle} Yamina KANOUN*

THEME

*Résistance d'un mur en béton armé dans un
milieu d'incendie.*

Devant le membre de jury composé :

★ SADAOUI Arezki	Professeur	U.M.M.T.O	Président
★ KACHI Mohend Said	Professeur	U.M.M.T.O	Examineur
★ ILLOULI Said	Maitre de conférences	U.M.M.T.O	Rapporteur

Soutenu le : 01/10/2016.

Remerciements

*Je remercie **DIEU** qui ma donnée la force et le courage pour terminé ce travail*

*J'exprime mes s'ins res remerciements
A mes très chers parents pour leur contribution pour chaque travail que j'ai effectuée.*

*J'adresse mes remerciements les plus respectueux à mon promoteur **M^R ILLOULLI. Saïd**, et J'aimerais lui dire à quel point j'ai apprécié ses qualités scientifiques et pédagogiques, sa grande expérience, sa disponibilité ainsi que le soutien qu'il m'a apporté. J'ai été également extrêmement touché par ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail de recherche.
Je suis heureuse d'avoir été parmi ses encadreurs et j'espère avoir été à la hauteur de ses attentes.*

A l'ensemble des enseignants du département de génie civil qui mon aider durant mon cursus universitaire, Sans oublier ce qui ont participés de près ou de loin à la réalisation de ce travail, et au membre de jury d'avoir acceptée d'évaluer ce mémoire.

Pour finir je remercie tous mes amis(es), tous les étudiants de master académique de la promotion 2015/2016 du département de génie civil.



Dédicace.

*Je dédie ce modeste travail
A mon père.
A ma mère.
A mes frères et belles sœurs
A mes petits neveux.
A toutes la famille
Ainsi que tous mes amis et proches.*



Résumé

En cas d'incendie les structures de bâtiment ont deux fonctions principales : une fonction porteuse et une fonction de compartimentage. Le premier à pour but de recevoir les efforts apportés par les différents éléments de la structure et les transmettre au sol. Le deuxième consiste à délimiter et à séparer les volumes à l'intérieur du bâtiment. Les éléments de structure participant à cette fonction sont les planchers, les murs, les cloisons, les façades et les toitures. Pour ce deuxième rôle, les parois des bâtiments civils et industriels jouent un rôle principal dans la limitation de la propagation du feu d'un compartiment à un autre. L'analyse de la résistance au feu de ces éléments est couramment l'objet de nombreuses études. Cette résistance au feu a pour but de préserver la stabilité des édifices et de s'opposer à la propagation rapide du feu pendant le temps nécessaire à l'alarme et à l'évacuation des occupants. Elle se mesure, pour un élément structurel, en fonction soit : l'élévation de la température, le temps de ruine et la résistance mécanique de cet élément.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'étude de la résistance vis-à-vis de l'incendie de parois de bâtiments industriels. En s'intéressant plus spécifiquement au cas des murs (panneaux en béton armé) comme élément coupe feu. Soumis à des gradients thermiques. Ces derniers subissent en effet une dégradation simultanée des propriétés de résistance mécanique des matériaux en fonction de l'élévation de la température, qui a une influence directe sur la conductivité thermique et la capacité portante de l'élément.

Dans notre travail on a exposé des cas pratiques des murs de compartimentage dans un hangar industrielle, du côté d'éléments résistants une approche est proposée qui repose très largement sur un exemple de calcul de la capacité portante d'un refend sous un état de chargement, à partir d'un état de déformation particulier on estime la capacité portante pour une température ambiante (situation durable à l'ELU), puis par analogie, comme pour un béton normale, on détermine les sollicitations dans un environnement d'incendie où deux cas sont exposé, avec l'influence sur les caractéristiques mécaniques des matériaux qui sont différents pour ceux dans un milieu ambiant.

Mots clés : Comportement vis-à-vis de l'incendie, murs coupe feu, murs porteurs, résistance et réaction au feu des éléments de construction.

Sommaire

CHAPITRE I : Introduction générale

I-1 Etat de la question et de la problématique des constructions en Béton- Armé sous incendie	2
I- 2 Objectifs de ce travail	4
I- 3 Cheminement du travail suivi	5

CHAPITRE II : Généralités Sur le Feu

II-1 Introduction	9
II-2 Terminologie du feu et incendie.....	9
II-3- Naissance et développement d'un incendie	10
II-3-1- Triangle du feu.....	10
II-3-2- Développement d'un incendie.....	10
II-3-3 Mode de propagation du feu	12
II-3-4 Moyens de prévention contre la propagation du feu	13
II-4 Les Courbes Normalisées.....	13
II-5 Notion de vérification au feu.....	16
II- 5 -1 Comportement au feu des matériaux de constructions et des ouvrages selon l'Eurocode.....	16
II- 5-1-1 La réaction au feu des produits de constructions et Leurs classification.....	17
II- 5-1-1-1 Classement de réaction au feu des produits de construction selon le système Européen (l'Euroclasse)	17
II- 5-1-1-2 Classement de réaction au feu des produits de construction selon le système Français	18
II- 5-1-2 La résistance au feu des éléments structuraux.....	20
II- 5-2 Principe de vérification de la résistance au feu	21
II-6 Introduction à la sécurité incendie	24
II-6 -1 Objectif de la sécurité incendie	24
II-6 -2 Prévention et Prévision	24
II- 6-3 Exigence de sécurité incendie	25

II- 6-3-1 Conception architecturale et sécurité incendie	26
II- 6-3-2 Classement des établissements	26
II- 6-4 Réponses constructives aux exigences de sécurité incendie	30
II- 6-5 Principales Exigences	30
II 6-5-1 Les règles constructives	31
II-6-5-2 Protection des Façades	32
II- 6-5-3 Compartimentage et distribution intérieure	33
II-7 Conclusion	34

CHAPITRE III : Caractéristiques thermo-mécaniques des matériaux béton et aciers

III-1 Introduction.....	36
III- 2 Généralité sur les matériaux béton-acier	36
III- 2-1 Béton	36
III- 2-2 Acier	37
III- 2-3 Composite béton- arme	37
III-3 Caractéristiques des matériaux a température ambiante	38
A- Béton	38
A-1 Résistance Caractéristique en Compression f_{cj}	38
A-2 Résistance Caractéristique en Traction f_{tj}	39
A-3 Module de déformation longitudinale	40
A-3-1 Module de déformation instantané.....	40
A-3-2 Module de déformation différé.....	40
A-4 Module de déformation transversale.....	40
B- Aciers	40
III- 4 Comportement des matériaux béton et aciers a températures élevées	41
A- Béton	41
A-1 Comportement des bétons à haute température	42
A-1-1 Phénomènes physiques et chimiques dans le béton à haute température	43
A-1-2 Influence de la température sur la pâte de ciment	43
A-1-3 Influence de la température sur les granulats	44
A-1-4 Influence de la température sur la microstructure du béton Interface (Pâte - granulats)	45

A-2 Phénomènes d'éclatements et d'écaillage du Béton	46
A-2-1 Mécanisme d'éclatement et d'écaillage du béton	46
A-2-1-1 Écaillage par pressions internes et contraintes thermomécaniques	47
A-2-1-2 Écaillage par dilatation thermique empêchée	48
A-3 Propriétés Thermo-Physiques	48
A-3-1 Dilatation thermique	49
A-3-2 Chaleur spécifique	50
A-3-3 Masse volumique	51
A-3-4 Conductivité thermique	52
A-4 Propriétés Thermo- Mécaniques Du Béton.....	56
B- Aciers	56
B-1 Les Phénomènes Physiques Et Chimiques Dans L'acier	57
B-2 Propriétés Thermo-Physiques.....	57
B-2-1 Dilatation thermique de l'acier	58
B-2-2 Chaleur spécifique de l'acier.....	58
B-2-3 Masse volumique	59
B-2- 4 Conductivité thermique de l'acier.....	59
B-3 Propriétés Thermo- Mécaniques	59
B-3-1 Acier De Béton Armé.....	60
B-3-2 Acier De Précontrainte.....	65
III- 5 Evolution de la résistance du béton et celle de l'acier en fonction d'élévation de la température.....	68
III-5-1- Béton	68
III-5-2- Acier	69
III- 6 Comparaison des caractéristiques mécaniques des matériaux acier-béton.....	73
III- 7 Conclusion	77

Chapitre IV : MECANISME DE TRANSFERT DE CHALEUR

VI-1-Introduction	79
IV -2 Définitions	79
IV -3 Rappel sur le Mécanisme de transfert de la chaleur	80
IV -3 -1 Différents problèmes liés aux mécanismes de transferts de chaleur	81
IV- 4 Les lois fondamentale du transfert de chaleur	82

IV- 4 -1 Transfert de la chaleur par Convection	82
IV - 4 -2 Transfert de la chaleur par Rayonnement	83
IV- 4-3 Transfert de la chaleur par Conduction	85
IV- 5 Coefficient De Transfert De Chaleur Dans Les Phénomènes d'incendie.....	88
IV - 6 Phénomène Linéaire De Conduction Thermique	90
IV - 6-1 Problème d'un mur simple en béton	90
IV - 6 -2 Problème d'un mur multicouche en béton	93
IV -7 Conclusion.....	95

Chapitre V : Comportement au feu d'un mur (refend) en béton armé

V-1 Introduction	97
V-2 Comportement au feu des murs en béton arme	97
V-2-1 Stabilité au feu	97
V-2-2 Absence de ruine en chaine	98
V-2-3 Non effondrement vers l'extérieur.....	99
V-2 -4 Compartimentage	100
V-2 - 4 -1 Murs séparatifs coupe-feu (MSCF).....	100
V-2 4 -2 Murs coupe-feu (M.C.F)	102
V-2 - 4 -3 Murs séparatif ordinaire (M.S.O)	102
V-2 - 4 -4 Le Compartiment à l'épreuve du Feu (C.E.F)	103
V-2 - 4- 5 Les Portes coupe-feu	104
V-3 - Exemple d'application de résistance d'un refend en béton armé	106
V-3- 1 Caractéristiques géométriques	107
V-3- 2 Hypothèse de calcul.....	107
V-3- 3 Principe de la règle des trois pivots	108
V-3- 4 Méthodologie de calcule pour le dimensionnement du voile	109
<u>1^{ERE} PARTIE : CALCUL A TEMPERATURE AMBIANTE</u>	111
A- 1- Introduction	111
A- 2- Calcul des sollicitations pour les barres d'acier	111
A- 3- Calcul des sollicitations pour la couche du béton	118
A-4- Calcul des sollicitations résultantes reprise à (20°C) par rapport à L'axe neutre....	119
A-5- Calcul de sollicitation résultante reprise à (20°C) par rapport au (C.D.G) du voile ...	

.....121

2^{EME} PARTIE : CALCUL A HAUTES TEMPERATURES122

1^{er} Cas : Calcule des sollicitations pour la variation de température 600°C - 20°C.....122

B- 1- Etapes de calcul de la température moyenne dans chaque couche 124

B- 2- Calcul du facteur de réduction 127

B- 3- Calcul des sollicitations reprise par chaque couche 130

B- 4- Calcule des sollicitations résultantes reprise par le voile exposé au feu 142

2^{ème} Cas : Calcule des sollicitations pour la variation de température 600°C - 140°C....143

C- 1- Etapes de calcul de la température moyenne dans chaque couche 143

C- 2- Calcul du facteur de réduction..... 144

C- 3- Calcul des sollicitations reprise par chaque couche 147

C- 4- Calcule des sollicitations résultantes reprise par le voile exposé au feu 158

V-4- Discussion des résultats 159

V-5 Conclusion160

Chapitre VI : Conclusion et perspectives

VI-1 Conclusion Générale.....161

VI- 2 Perspectives.....162

Référence Bibliographique.....163

Liste des Figures

Figure 2-1: Tringle du feu	10
Figure 2-2: Evolution de la température	11
Figure 2-3: Modes de propagation du feu dans un compartiment.....	12
Figure 2-4: Différents transmissions du feu sur les façades	13
Figure 2-5: Courbe nominale du feu conventionnel ISO834.....	14
Figure 2-6: Courbe du feu hydrocarbure.....	15
Figure 2-7: Courbes normalisée montre l'évolution de températures d'un essai au feu	16
Figure 2-8: Schéma représentatif des différents critères	21
Figure 2-9: Schéma de vérification de la résistance au feu	23
Figure 2-10: Trois vérifications équivalentes de résistance	23
Figure 2-11(a) : Exemple d'application de La règle C + D	33
Figure 2-11(b) : Cheminement du feu dans le cas des façades aveugles	33
Figure 2-12 : plan schématisant un bon compartimentage contre le feu.....	34
Figure 3-1: Composants d'un béton	36
Figure 3-2 : Schéma des différents types d'Aciers.....	37
Figure 3-3 : Diagramme contraintes - déformation du Béton à l'ELU	38
Figure 3-4 : Diagramme contraintes - déformation du Béton à l'ELS	39
Figure 3-5 : Diagramme contraintes - déformation du Calcul des Aciers.....	41
Figure 3-6 : Evolution de la masse de la pate de ciment (courbes ATG / ATD) montrant les zones principales de déshydratation	44
Figure 3-7 : Dommages du béton après un incendie.....	45
Figure 3-8 : L'écaillage lors de l'incendie du tunnel de MONT.....	46
Figure 3-9 : Eclatement d'un poteau durant un essai au feu.	47
Figure 3-10: Principales raisons d'apparition de l'écaillage	48
Figure 3-11: Dilatation du béton en fonction de la température	49
Figure 3-12: Chaleur spécifique du béton, $C_p(\theta)$ en fonction de la température pour Trois teneurs en eau.....	50
Figure 3-13: Évolution de la masse volumique du béton en fonction de la température	51
Figure 3-14: Variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique pour les bétons normaux (BN) en fonction de la température	52

Figure 3-15 : Modèle mathématique expriment la relation contrainte-déformation du béton en compression aux températures élevées.....	53
Figure 3-16 : Facteur de réduction $k_c(\theta)$ applicable pour la démunissions de la résistance caractéristique à la compression du béton à température élève.....	54
Figure 3-17 : Représentation graphique des relations contrainte-déformation du béton siliceux, sous compression uniaxiale à des températures élèves différents, avec une branche descendante linéaire	56
Figure 3-18 : Dilatation thermique de l'acier	57
Figure 3-19 : Chaleur spécifique de l'acier en fonction de la température	58
Figure 3-20 : Conductivité thermique de l'acier en fonction de la température	59
Figure 3-21 : Modèle mathématique expriment la relations contrainte- déformation de l'Acier de Béton-Armé à température élevée.	60
Figure 3-22 : Facteur de réduction $k_s(\theta)$ appliquer à la résistance caractéristique des aciers du béton -Armé.....	64
Figure 3-23 : Représentation graphique des relations contrainte-déformation de l'acier du béton-armé, à des températures différentes laminées à chaud, avec des branches descendantes linéaires	65
Figure 3-24 : Facteur de réduction $k_p(\theta)$ appliquer à la résistance caractéristique F_{pk} des aciers de précontrainte.....	67
Figure 3-25 : Représentation graphique des relations contrainte-déformation de l'acier du précontrainte, à températures élèves trempés.....	68
Figure 3-26 : Evolution de la résistance à la compression d'un béton en fonction de la température normale extrait de la norme P92-701	69
Figure 3-27 : Affaiblissement de la résistance de trois nuances d'acier, en fonction de la température par rapport à leur résistance à froid.....	70
Figure 3-28 : Montre deux photos comparatives des caractéristiques mécaniques des matériaux Acier - Béton soumit à haute température.....	73
Figure 3 -29 : Chute de Résistance du béton et de l'Acier.....	74
Figure 3- 30 : Chute de Rigidité du béton et de l'Acier	74
Figure 3 -31 : Evaluation de la température en profondeur dans les sections du béton et de l'Acier	75
Figure 4-1 : Isotherme et gradient thermique	79
Figure 4-2 : Mécanisme de développement de la chaleur dans les matériaux Acier et Béton.....	80

Figure 4-3 : Schématisation des transferts de chaleur dans un local incendié	81
Figure 4-4 : Schéma de transfert de chaleur conductif.....	86
Figure 4-5 : Profil de température d'un mur de bâtiment	91
Figure 4-6 : Mur plan	91
Figure 4-7 : Bilan thermique élémentaire sur un mur simple.....	92
Figure 4-8 : Schématisation des flux et des températures dans un mur multicouches	94
Figure 5-1 : Stabilité au feu d'un élément isolé et d'une structure	97
Figure 5-2 : Schéma de principe illustrant l'absence de ruine en chaîne d'une structure Portique comprenant trois cellules	99
Figure 5-3 : Schéma de principe illustrant le non-effondrement vers l'extérieur de la façade.....	99
Figure 5-4 : Schéma du principe dépassement en toiture.....	101
Figure 5-5 : Schéma d'un système constructif de compartiment à l'épreuve du feu.....	104
Figure 5-6 : Exemple de protection mécanique d'une porte coulissante.....	105
Figure 5-7 : Porte coupe feu dans hangar industrielle.....	105
Figure 5-8 : Refend sous l'action des sollicitations / C.D.G ($N ; M_G$).....	106
Figure 5-9 : Définitions des différentes droites de déformations possibles à (ELU).	108
Figure 5-10 : Optimisation de la section du refend passant par les pivots (A et B) de la droite de déformation.....	109
Figure 5-11 : Répartition des armatures dans le voile.....	111
Figure 5-12 : Détails de calcul de la déformation ε_3 pour la barre N°3 à partir du diagramme de déformations relatifs	113
Figure 5-13 : Détails de calcul de la déformation ε_6 de la barre N°6 à partir du diagramme des déformations limite.	114
Figure 5-14 : Diagrammes des contraintes dans chaque matériau	117
Figure 5-15 : Diagrammes des forces à 20°C.....	120
Figure 5-16 : Diagrammes des Moments à 20°C	120
Figure 5-17 : Diagramme résultant des sollicitations (Met N) par rapport à l'Axe Neutre à 20C.	121
Figure 5-18 : Diagramme résultant des sollicitations (M_G et N) par rapport au C.D.G du voile.....	122
Figure 5-19 : Exemple d'un voile de compartimentage exposée au feu sur une seule face.....	123
Figure 5-20 : Schéma représentant la face du refend exposée au feu.	123
Figure 5-21 : Variation de la température dans la section droite du mur en béton-armé.	124

Figure 5-22 : Température moyenne de calcul au niveau de chaque couche.....	126
Figure 5-23 : Les différentes valeurs des coefficients de réduction des deux matériaux (béton-acier).....	129
Figure 5-24 : Diagramme résultant des sollicitations (Met N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 93°C.....	135
Figure 5-25 : Diagramme résultant des sollicitations (Met N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 238°C.....	136
Figure 5-26 : Diagramme résultant des sollicitations (Met N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 383°C.....	138
Figure 5-27 : Diagramme résultant des sollicitations (M_G et N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 528°C.....	142
Figure 5-28 : Exemple d'un voile de compartimentage exposée au feu par une seule face.....	143
Figure 5-29 : Variation de la température dans la section droite du mur en béton-armé.....	143
Figure 5-30 : Température moyenne de calcul au niveau de chaque couche.....	144
Figure 5-31 : Les différentes valeurs des coefficients de réduction des deux matériaux (béton-acier).....	147
Figure 5-32 : Diagramme résultant des sollicitations (M et N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 198°C.....	151
Figure 5-33 : Diagramme résultant des sollicitations (Met N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 313°C.....	152
Figure 5-34 : Diagramme résultant des sollicitations (M et N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 428°C.....	154
Figure 5-35 : Diagramme résultant des sollicitations (M_G et N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 543°C.....	158
Figure 5- 36 : Diagramme d'interaction de N et M (pour une droite de déformation A et B fixée au départ).....	159

Liste des Tableaux

Tableau 2-1: Classement de Réaction au feu de certains matériaux selon le référentiel Européen.....	18
Tableau 2-2 : Classement de Réaction au feu des matériaux selon le référentiel Français...19	
Tableau 2-3 : Réaction au feu de certains matériaux	19
Tableau 2-4 : Critère de résistance au feu	20
Tableau 2-5: récapitulatif, stabilité au feu exigée pour la structure en fonction du type d'établissement et de sa hauteur	29
Tableau 2-6 : Dimensions minimales d'un poteau à section carrée en (cm) selon le degré de résistance au feu exigé.....	31
Tableau 2-7 : Caractéristiques en (cm) d'un mur en béton armé selon le degré de résistance au feu exigé.	32
Tableau 2-8 : Caractéristiques en (cm) d'un mur en béton armé selon le degré de résistance au feu exigé	32
Tableau 3-1 : Comportement et Réactions du béton à une attaque thermique.....	42
Tableau 3-2 : Relation entre les différents paramètres du modèle de la figure (3-15).....	53
Tableau 3-3 : Variation en fonction de la température les paramètres $K_{c, \theta}$ et $\varepsilon_{c1, \theta}$ et $\varepsilon_{cu1, \theta}$ pour béton	55
Tableau 3-4 : Relation entre les différents paramètres du modèle mathématique de la figure (3-20).....	61
Tableau 3-5 : Facteurs de réduction pour la relation contrainte-déformation de l'acier du béton Armée à des températures θ_s différentes par rapport aux valeurs de f_{yk} et E_s à 20°C.	62
Tableau 3-6 : Tableau "simplifiée" du Facteurs de réduction pour la relation contrainte-déformation de l'acier du béton armé à des températures θ_s par rapport aux valeurs de f_{yk} et E_s à 20°C selon l'Eurocode 3.....	63
Tableau 3-7 : Facteurs de réduction pour la relation contrainte-déformation de l'acier de précontrainte à des températures élevées θ_p	66
Tableau 3-8 : Condition à respecter pour les Dalles, les poteaux afin d'assurer une résistance au feu donné par (la norme P 92- 701).....	71
Tableau 3-9 : Condition à respecter pour les poutres pour une résistance au feu donné par (la norme P 92- 701).....	72

Tableau 4-1 : Quelques valeurs de coefficient d'échange par convection.....	83
Tableau 4-2 : Conductivité thermique de quelques matériaux, à la température ambiante.	86
Tableau 5-1 : Différentes valeurs de forces et moments des aciers dans la zone comprimée ..	115
Tableau 5-2 : Différentes valeurs de forces et moments dans la zone tendu de l'acier	116
Tableau 5-3 : Différentes valeurs des forces et moments repris par les barres comprimées de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 93^\circ$ Pour la 1 ^{ème} tranche W_1	132
Tableau 5-4 : Différentes valeurs des forces et moments repris par les barres tendues de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 93^\circ$ Pour la 1 ^{ème} tranche W_1	133
Tableau 5-5 : Différentes valeurs des forces et moments dans la zone comprimée de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 528^\circ$ Pour la 4 ^{ème} tranche W_4	139
Tableau 5-6 : Différentes valeurs des forces et moments dans la zone tendue de l'acier de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 528^\circ$ Pour la 4 ^{ème} tranche W_4	140
Tableau 5-7 : Différentes valeurs des forces et moments repris par les barres comprimées de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 198^\circ$ Pour la 1 ^{ème} tranche W_1	148
Tableau 5-8 : Différentes valeurs des forces et moments repris par les barres tendues de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 198^\circ$ Pour la 1 ^{ème} tranche W_1	149
Tableau 5- 9 : Différentes valeurs des forces et moments dans la zone comprimée de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 543^\circ$ Pour la 4 ^{ème} tranche W_4	155
Tableau 5-10 : Différentes valeurs des forces et moments dans la zone tendue de l'acier de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 543^\circ$ Pour la 4 ^{ème} tranche W_4	156
Tableau 5- 11 : Tableau récapitulatif des différents résultats obtenue des sollicitations N ; M_G pour les deux Cas de température dans un milieu incendie	159

GLOSSAIRE

ISO 834	Courbe température-temps relative à un incendie normalisé
θ_g	La température des gaz, dans un compartiment incendié.
t	Temps en minutes
R	Matériau a capacité portante (R). Résistance mécanique
I	Matériau qui est un isolant thermique.
E	Matériau qui est étanche au feu
$T_{fi, d}$	est la valeur de calcul de la résistance au feu normalisé ;
$T_{fi, requ}$	est la durée exigée de résistance au feu normalisé ;
$R_{fi, d, t}$	est la valeur de calcul de la capacité résistante pour la situation de feu ;
$E_{fi, d, t}$	est la valeur de calcul des effets correspondants des actions pour la situation incendie
θ_d	est la valeur de calcul de la température du matériau ;
$\theta_{cr, d}$	est la valeur de calcul de la température critique du matériau
R_f	Résistance au feu
f_e	Limite d'élasticité de l'acier (MPa).
f_{cj}	Résistance caractéristique la compression du béton à l'âge de « j » jours en (MPa).
f_{bu}	La contrainte limite du béton à L'ELU
f_{tj}	Résistance caractéristique la traction du béton à l'âge de « j » jours en (MPa).
γ_s	Coefficient partiel de sécurité sur l'acier (<i>gamma</i>)
γ_b	Coefficient partiel de sécurité sur le béton
B	Aire d'une section de refend (cm ²)
E_{ij}	Module de Young instantané à l'âge de « j » jours
E_{vj}	Module de Young différé à l'âge de « j » jours
E_s	Le module d'élasticité longitudinale de l'Acier (N/mm ²)
σ_{su}	est la contrainte limite ultime de l'acier.
σ_{st}	contrainte élastique de l'acier (N/mm ²)
ϵ_{se}	déformation élastique de l'acier
$(\Delta/l)_c$	Dilatation thermique du béton (concrete)
$(\Delta/l)_s$	Dilatation thermique de l'acier (steel)
θ_s	La température de l'acier (°C)
θ_c	La température du béton (°C)
λ_s	La conductivité thermique de l'acier (W/ m° K)
λ_c	La conductivité thermique du béton (W/ m° K)
C_a	La chaleur spécifique de l'acier (en J/Kg °K)
C_p	La chaleur spécifique du béton (en J/Kg °K)
ρ	Masse volumique du béton (Kg/ m ³)
ρ_s	Masse volumique de l'acier (Kg/ m ³)
E	Module de Young
v	Coefficient de poisson
$K_c(\theta)$	facteur de réduction de la résistance caractéristique à la compression du béton défini en fonction de la température Θ .
$K_s(\theta)$	facteur de réduction de la résistance caractéristique de l'acier de construction (du béton armé) défini en fonction de la température Θ
$K_p(\theta)$	Facteur de réduction de la résistance caractéristique de l'acier de précontraint défini en fonction de la température Θ_p .

$\varepsilon_{sp,\theta}$	Déformation à la limite de proportionnalité
$\varepsilon_{sy,\theta}$	Déformation plastique
$\varepsilon_{su,\theta}$	Déformation ultime
$\varepsilon_{st,\theta}$	Déformation limite en élasticité
$f_{sy,\theta}$	est la limite d'élasticité efficace ;
$f_{sp,\theta}$	est la limite de proportionnalité ;
$E_{s,\theta}$	est la pente du domaine élastique linéaire ;
$f_{ap,\theta}$	Limite de proportionnalité de l'acier à température élevée θ_s (N /m ²)
$f_{ay,\theta}$	Limite d'élasticité efficace de l'acier à température élevée θ_s (N /m ²)
$\varepsilon_{c1,\theta}$	déformation maximale du béton en situation d'incendie
$\varepsilon_{cu1,\theta}$	déformation du béton correspondant à $f_{c,\theta}$
$f_{c,\theta}$	valeur caractéristique de la résistance à la compression du béton sur éprouvette cylindrique à 28 jours à la température θ .
$f_{sk}(\theta)$	est la résistance caractéristique d'une armature de béton armé à la température h pour la déformation donnée.
$f_{ck}(\theta)$	est la valeur caractéristique de la résistance à la compression du béton à la température θ pour la déformation donnée.
$f_{sy,20^\circ C}$	valeur caractéristique de la limite d'élasticité de l'acier de construction ou d'armature à 20 °C
$f_{sp,\theta}$	valeur caractéristique de la limite de proportionnalité de l'acier de construction ou d'armature, à température élevée
$f_{pp,q}$	valeur caractéristique de la limite de proportionnalité de l'acier de précontrainte, à température élevée
$f_{yk,20^\circ C}$	est la valeur caractéristique de la limite d'élasticité à 20 °C ;
$f_{pk,20^\circ C}$	est la valeur caractéristique de la limite d'élasticité à 20 °C ;
h	épaisseur de la dalle en [cm].
e	épaisseur de la chape et de son revêtement en [cm].
M_0	moment isostatique sous les charges permanentes et les charges variables.
M_w et M_e	moments de flexion équilibrés par les aciers sur appuis de longueur libre à l'intérieur de la travée considérée l_{sw} et l_{se} .
V	Effort tranchant
τ	Contrainte tangentielle.
σ_{st}	Contrainte dans les aciers tendus
σ_{sc}	Contrainte dans les aciers comprimés
F	Force ou action en général
$T = f(x, y, z, t)$	la valeur instantané de la température en tous point de l'espace
x, y, z	Variables d'espace
\vec{n}	Vecteur unitaire normale à la surface dS
$\frac{\partial T}{\partial n}$	Dérivée de la température le long de la normale.
Q	Quantité de chaleur
q_c	Débit calorifique
T_p	température à 1m ² de la paroi du solide, en kelvins [K]
T_f	température du fluide exprimé en kelvins;
T_k	température absolue
h_c	coefficient d'échange par convection [W/m ² K],
σ_o	constante de Stefan-Boltzmann
C_v	Chaleur massique
S	Surface
t	Temps

T	Température en kelvin [K]
δQ	Energie de chaleur en Joule [J]
P	puissance éventuellement dissipée par unité de volume
R_T	Résistance thermique en $[K.W^{-1}]$
R_{TC}	Résistance thermique de contact en $[K.W^{-1}]$
M	Action mécanique
C	Fermeture automatique
A_s	Sections d'armatures
c	l'enrobage
L_c	longueur de la zone comprimée par rapport à l'axe neutre
L_t	longueur de la zone tendue par rapport à l'axe neutre
L_{voile}	longueur Totale du voile
n_c	nombre de barre dans la zone comprimée.
n_t	nombre de barre dans la zone tendue.
e	espacement constant des barres
F_{si}	force résultante interne dans chaque barre « i »
F_{sc}	force résultante interne dans la zone comprimée [KN]
F_{st}	force résultante interne dans la zone tendue [KN]
$M_{sc/AN}$	Moment fléchissant résultant dans la zone comprimée [KN.m]
$M_{st/AN}$	Moment fléchissant résultant dans la zone tendue [KN.m]
d_{sc}	bras de levier de la force résultante interne dans la zone comprimée par rapport à L'Axe Neutre du voile [m].
d_{st}	bras de levier de la force résultante interne dans la zone tendue par rapport à L'Axe Neutre du voile [m].
F_{bc}	la force résultante dans le béton comprimé.
a	l'épaisseur du voile (refend)
$M_{bc/AN}$	est le moment du béton comprimé par rapport à l'axe neutre.
w_i	épaisseur de la couche « i »
T_i	Est la température maximale de la couche w_i
θ_i	Est la température moyenne de la couche w_i
$K_{s;\theta_i}$	Est le facteur de réduction de la résistance caractéristique de l'acier à une température moyen de θ_i pour chaque couche « i ».
$K_{c;\theta_i}$	Est le facteur de réduction de la résistance caractéristique à la compression du béton a une température moyenne θ_i pour chaque couche « i ».
$F_{si(\theta_i)}$	force résultante interne reprise par chaque barre « i » dans la zone comprimée et dans la zone tendue de la couche w_i avec une température moyenne de θ
d_{si}	bras de levier par rapport à L'Axe Neutre du voile exprimée en [m] pour chaque barre d'acier « i »
$M_{si(\theta_i)}$	Moment fléchissant résultante reprise par chaque barre « i » dans la zone comprimée et dans la zone tendue de la couche w_i à une température moyenne de θ
f_{bu}	Est la contrainte limite dans le cas accidentelle du béton (béton dans le cas d'incendie)
N	Effort normale repris par le voile par rapport au C.D.G
M_G	Moment fléchissant repris par le voile par rapport au C.D.G

Indice

c	compression
t	traction
g	gaz
x	projection suivant l'axe de x
e	environnement conventionnel
p	paroi spécimen

Lettres grecques

α	Coefficient d'absorption du rayonnement
β	Coefficient de dilatation cubique
ε	Emissivité
ϕ	Densité de flux de chaleur
Φ	Transformée de Laplace du flux de chaleur
φ	Flux de chaleur
λ	Conductivité thermique, longueur d'onde
μ	Viscosité dynamique
ν	Viscosité cinématique
η	Rendement ou efficacité
Ω	Angle solide
ρ	Masse volumique, coefficient de réflexion du rayonnement
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
τ	Coefficient de transmission du rayonnement
θ	Transformée de Laplace de la température.

Liste des Abréviations

ATD	Analyse thermique différentielle
ATG	Analyse thermogravimétrique
APSAD	Assemblée Plénière des Sociétés d'Assurance Dommage
BAEL	Béton Armé aux Etats Limites.
BHP	Béton à hautes performances
BN	Béton normale
C.D.G	Centre De Gravité
CF	Coupe feu
CEF	Compartiment à l'Epreuve du Feu
CSTB	Centre Scientifique et Technique de Bâtiment.
ERP	Etablissement Recevant du Public
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement.
IGH	Immeuble de Grande Hauteur
MSCF	Mur Séparatif Coupe Feu.
MSO	Mur Séparatif Ordinaire.
PF	Pare Flamme
RE	Matériau a capacité portante (R), et Etanche au feu (E).
REI	Matériau a capacité portante (R), et Etanche au feu (E), et Isolant thermique (I).
RIA	Robinet d'incendie armé
SF	Stable au feu.

CHAPITRE I:

INTRODUCTION GENERALE.

I- 1 Etat de la question et de la problématique des constructions en Béton-Armé sous incendie :

Un **incendie** est un feu violent et destructeur qui occasionne chaque année des pertes importantes en vies et en bien matériels. Les causes d'incendies sont très diverses, parmi elles. Le mode de construction du bâtiment, leurs conceptions vis-à-vis de la propagation du feu, la nature et la quantité de matières emmagasinées, stockées et mise en œuvre, et le choix des matériaux de construction sont très importants dans la limitation des conséquences de l'accident. Notamment dans les immeubles collectifs, établissement recevant du publique (ERP), établissements classées, établissements industriel et entrepôts de stockages. Malheureusement la probabilité de rencontrer un incendie dans ce type de bâtiment ne peut jamais être complètement écartée, malgré les précautions aussi sévères qu'on peut imaginer. C'est à cause non seulement de l'impossibilité de supprimer d'une manière systématique tous les matériaux combustibles, mais aussi dans l'imagination d'un monde à l'abri des défaillances et des malveillances.

Il faut bien garder à l'esprit et se résoudre à admettre le caractère inéluctable du risque permanent d'incendie dont selon les recommandations des normes européennes des Eurocode (2, 3, 4). Ce risque doit être pris en compte lors de la construction ou la réhabilitation du bâtiment. La manière la plus efficace de lutter contre les effets d'un incendie est d'éviter son déclenchement ainsi que sa propagation. Malgré toutes les précautions prises, l'expérience montre que les trois stades:(Prévention, Détection et Extinction). Sont parfois dépassés et que les incendies arrivent à se propager et prennent une extension importante. Lorsqu'une telle éventualité se produit, un système de barrières permet de limiter au strict minimum et de réduire son développement dans l'espace par la mise en œuvre d'une panoplie de mesure bien connue telles que, la détection et l'alarme en cas d'incendie, l'extinction automatique par sprinklers, et un compartimentage adéquat par la disposition rationnelle des portes et des parois coupes feu. Le placement judicieux d'exutoires de fumées et le choix des matériaux ne dégageant pas de fumées nocives (toxiques).

Cependant, pour que les mesures de confinement qui concernent aussi bien le compartimentage, la nocivité et l'évacuation des personnes soient efficaces et puissent produire leurs effets, il est nécessaire que l'intégrité de la structure soit maintenue durant un temps suffisant. Bien sur, la majorité des décès survenus aux occupants de bâtiments incendiés sont dus à l'asphyxie voire aux brûlures plutôt qu'à un effondrement de la structure.

Néanmoins les personnes qui se sont retrouvées bloquées aux étages supérieurs d'un immeuble-tour dont la base était en flammes, à l'image de l'incident qui a ravagé les tours-jumelles de World Trade Centre de la ville de New York en septembre 2011, ont bien compris que leur survie dépendait autant que d'un bon compartimentage et d'une possibilité de fuite mais aussi de la stabilité des étages inférieurs. Les sapeurs pompiers qui, grâce à leur équipement spécial, sont amenés à intervenir dans des bâtiments en proie en flammes, doivent pouvoir compter sur une bonne résistance au feu de la structure.

Les mesures de sécurité adoptées, si importantes soient-elles, n'éliminent cependant pas la nécessité de concevoir des structures portantes présentant une résistance au feu judicieusement adaptée au type de bâtiment et susceptible de se maintenir dans le temps. Une telle résistance au feu est évidemment indispensable pour sauvegarder les vies humaines à courte et moyenne échéance, pour minimiser les dégâts occasionnés au bâtiment et limiter ainsi les frais colossaux aux compagnies d'assurances et pour permettre une intervention efficace des sapeurs-pompiers, sans craindre l'arrivée d'un effondrement prématuré de la structure. Par conséquent, une bonne résistance au feu de la structure est une condition non suffisante mais nécessaire pour limiter les effets néfastes et désastreux de l'effet des hautes températures.

Lorsqu'une structure en occurrence en béton armé ou mixte est soumise à de telles situations d'incendie, de grands gradients thermiques s'y développent par suite des élévations de températures importantes et qui sont de surcroît très rapides. Les températures atteintes dans telles extrêmes situations peuvent généralement osciller entre 20°C et 1200°C. Ce qui donne lieu dans la micro-structure du matériau en particulier le béton à des transformations physico-chimiques qui influencent fortement non seulement à son comportement thermo-mécanique mais aussi à son comportement thermo-hydrique à cause du mouvement migratoire de l'eau évaporable contenue initialement dans la masse du béton. Et cela conduit à l'apparition du phénomène d'éclatement et d'écaillage, problématique bien connue du matériau béton lorsqu'il est soumis à l'action des températures élevées.

La capacité portante de la structure se trouve diminué fortement au fur et à mesure que sa température augmente du fait que les propriétés de résistance et de rigidité des matériaux habituels de construction se détériorent de manière significative avec l'élévation des températures. Si la durée et l'intensité de cet incendie sont trop importantes, la capacité portante de la structure peut décroître jusqu'au niveau des charges appliquées ; il peut alors en

résulter une ruine complète ou partielle qui peut se produire en un temps relativement court lorsque la montée en température est rapide. C'est pourquoi parmi les exigences imposées au bâtiment, la résistance au feu des structures a toujours eu une place importante.

Toutefois, si un incendie se déclare dans une partie de bâtiment, la température monte très rapidement, du moins s'il y a suffisamment de matériel combustible et d'oxygène. Les parties exposées de la construction se réchauffent en fonction de la conductivité thermique des matériaux: très rapidement pour l'acier exposé, assez lentement pour le béton. Deux phénomènes viennent s'ajouter au niveau des matériaux: une réduction de la résistance mécanique et des dilatations thermiques.

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

I- 2 Objectifs de ce travail :

Le travail de master académique présenté dans ce manuscrit à trois objectifs fixés. Le premier consiste à faire un état de connaissance d'une façon générale les notions fondamentale au déclenchement d'un incendie, ainsi que les principales objectifs et exigences de la sécurité incendie.

- Le second objectif de cette thèse est de montrer l'influence de l'augmentation de la température sur les caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux béton et acier des

armatures en premier lieu. Et l'efficacité de résistance d'un mur (refend) en béton armé et son comportement dans un milieu incendié.

- Le dernier objectif est essentiellement articuler autour d'un exemple de calcul de la capacité portante du refend sous un état de chargement, à partir d'un état de déformation (en particulier la droite passant par les pivots A et B). On estime la capacité portante pour une température ambiante, donc pour une situation durable (E.L.U) dans un premier temps, puis dans in milieu d'incendie on suppose deux cas pour deux valeurs de température différentes ($600^{\circ} \rightarrow 20^{\circ}\text{C}$; et $600^{\circ} \rightarrow 140^{\circ}\text{C}$), pour une situation accidentelle.

I- 3 Cheminement du travail suivi :

Le travail présenté dans cette thèse est organisé en six chapitres, dont le premier est présenté comme étant une introduction générale consacré essentiellement à la nature de la question et de la problématique, ainsi que les objectifs fixée dans ce travail.

Le chapitre II, sera consacré à la revu bibliographique ou nous allons en premier lieu, présenter les notions fondamentales au déclenchement d'un incendie, basée sur le triangle du feu dont les trois principaux acteurs sont (combustible, comburant, et une source de chaleur), et rappeler les notion utiles générales relatives à la modélisation d'un incendie ayant trait a son développement et sa propagation. Ainsi que les différents scénarios qui donnent l'évolution de la température des gaz en fonction du temps, spécifiée par l'Eurocode à savoir (feu ISO, feu hydrocarbure, feu extérieure). En second lieu, nous passerons à la présentation des moyens de prévention contre la propagation du feu, et les exigences réglementaires de vérification de la résistance au feu des éléments de construction afin d'encren la problématique et d'en comprendre la philosophie de l'incendie. En dernier lieu, seront détaillés d'une manière explicite les principales objectifs et les exigences de la sécurité incendie.

Le chapitre III, portera sur le comportement des principaux matériaux résistant utilisé dans une construction à savoir (le béton, les aciers d'armatures et en seconde position les aciers de précontraintes) en fonction de l'élévation de la température. Sachant que l'incendie agit d'une manière indirecte sur l'élément structurel, en d'autres termes, il provoque la dégradation des matériaux ce qui entraine la diminution de la capacité portante de l'élément de structure. Nous nous somme intéressées dans ce chapitre à définir les propriétés thermo-physique (dilatation thermique, chaleur spécifique, conductivité thermique...etc.), et le

comportement thermo-mécaniques (déformation) et chimique (déshydratation), ainsi que les courbes correspondants à ce comportement seront exposés. En se basant sur les règles de l'Eurocode [2 ; 3 ; 4] et sur des études expérimentales et numériques faites à travers le monde. Ensuite, une synthèse est faite sur le comportement de la pâte de ciment et des granulats, qui affecte directement les propriétés mécaniques et le transfert du matériau. L'évolution des propriétés mécaniques est fortement liée à l'évolution de la microstructure et au départ d'eau présente dans les pores et les hydrates. Notamment dans le cas des bétons à haute résistance BHP ou l'augmentation de la pression de vapeur contribue d'une façon significative à l'apparition du phénomène d'écaillage ou d'éclatement. Il en résulte que la connaissance des propriétés physiques des bétons vis-à-vis des gradients thermiques est nécessaire pour évaluer l'importance des flux thermiques, et pour connaître la distribution des températures dans le milieu. Enfin, la dernière partie de ce chapitre est consacrée à faire une comparaison sur entre les caractéristiques mécanique et thermiques des matériaux béton et acier en fonction de l'élévation de la température illustré par un exemple d'application.

Nous verrons un peu plus loin dans *Le chapitre IV*, ou nous avons présenté les différents mécanismes de transfert de chaleur qui se produisent par conduction, rayonnement et convection entre la source du feu et son environnement, qui conduisent à l'équation d'équilibre du champ thermique, et ce dernier est basé sur la loi du J. Fourier. Car il est important, quand on veut aborder le problème de la sécurité des constructions face à l'incendie, de bien connaître les lois fondamentales qui régissent ces trois modes de transmission, afin d'évaluer l'échauffement produit par le feu sur la face exposée des éléments de la structure proche ou éloignée.

Le chapitre V, portera sur la présentation d'une manière générale de la problématique spécifique du comportement vis-à-vis de l'incendie des parois de bâtiments industriels ou de stockages. En s'intéressant plus spécifiquement au cas des murs de compartimentage en béton armé, soumis à de forts gradients thermiques. Ces derniers subissent en effet une dégradation simultanée des propriétés de résistance des matériaux en fonction de l'élévation de la température. Et nous avons exposé des cas pratiques des murs de compartimentage dans un hangar industrielle, il sera suivi par suite par une présentation détaillée d'un exemple de calcul d'un mur (refend), sous un chargement extérieure soumis au feu. A partir ainsi des données géométriques concernant ce mur et les propriétés thermiques des matériaux, on suppose une évolution des températures dans cette élément et nous allons essayi de calculer sa

capacité portante dans un milieu ambiante (situation durable E.L.U), puis on suppose deux cas de température dans milieu d'incendie (situation accidentelle).

Nous terminons en guise du dernier chapitre, par des conclusions générales qui débouchent sur un certain nombre de recommandations pratique, et orientation future dans la perspective de poursuivre ce thème de travail.

CHAPITRE II:

Généralités Sur Le Feu



II-1 Introduction:

De toutes les catastrophes et accidents auxquels l'homme est confronté, l'incendie reste l'un des fléaux les plus redoutés. Cause de paniques et de pertes importantes en vies humaines et en biens matériels, tous les domaines de la construction sont touchés: établissements recevant du public (ERP), établissements industriels et entrepôts de stockage...etc. Les causes d'incendie sont très diverses, nous n'en citons que quelques unes à savoir:

- Matières ou liquides inflammables (matières combustibles) disposées trop près d'une source de chaleur.
- Manipulation dangereuses des produits inflammables.
- Fonctionnement défectueux d'un appareil ménager
- L'imprudence au court circuit électrique.
- Source de chaleur (exemple cigarette mal éteinte) utilisée dans un milieu renfermant des gaz ou vapeurs inflammables.
- Incendie extérieuretc.

Les objectifs de la sécurité incendie sont la protection efficace contre les risques d'incendie des personnes, des biens et plus précisément la sauvegarde des vies des occupants de l'immeuble en premier lieu, puis éventuellement la protection de l'intégrité des bâtiments.

Les exigences de base de la protection incendie consistent à:

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

La réglementation s'est progressivement étoffée pour fixer aujourd'hui un ensemble d'exigences portant sur la conception des bâtiments et sur le choix des matériaux, dont le comportement est mieux apprécié grâce à l'expérience acquise lors d'incendies réels et par des recherches en laboratoire.

Ce chapitre sera ainsi organisé de la manière suivante :

- Rappeler les notions fondamentales sur la dynamique du feu, son développement et son mode de propagation dans un local incendié.
- Analyse détaillée et commentée des différents modèles de feu paramétrique rencontrés dans la pratique conduisant à l'évolution de la température de gaz dans un compartiment soumis à un feu réel ou naturel.
- Aborder les exigences réglementaires de vérification de la résistance au feu des éléments de constructions, ainsi que les principales objectifs de la sécurité incendie.

II- 2 Terminologie du feu et incendie:

Un feu est une combustion. [1] On le trouve dans des fours, des chaudières sous forme de combustion contrôlée. Dans le domaine de l'incendie il devient une combustion incontrôlée, qui engendre de grandes quantités de chaleur des fumées et des gaz polluants, voire toxiques. L'énergie émise favorise son développement.

II-3- Naissance et développement d'un incendie :

II- 3-1- Triangle du feu:

Pour qu'un incendie puisse prendre naissance, il faut la présence conjuguée de trois éléments: **l'oxygène**, **Matériaux combustibles** et **Une source de chaleur**. Ces trois éléments constituent ce qu'on appelle le triangle du feu, [2] représenté à la (figure 2-1).

Les deux premiers éléments entrent en combustion lorsque la température d'inflammation est atteinte. L'oxygène est un élément essentiel du feu et la vitesse de combustion est influencée par l'apport de l'air frais.

L'oxygène est partout dans l'air (21% de volume d'air), et les matériaux combustibles existent presque dans tous les bâtiments; Donc c'est la présence d'une source de chaleur qui est la cause même de la naissance d'un incendie.



Figure 2-1: triangle du feu [2]

II- 3-2- Développement d'un incendie:

D'une manière générale, le déroulement d'un incendie peut se caractériser par les différentes phases suivantes, schématisées sur la (figure 2-2), à savoir la phase de naissance (l'ignition) où la température s'élève très rapidement, l'embrassement généralisé (Flash over), et la pleine intensité, enfin la phase de la décroissance qui caractérise le refroidissement ou de l'extinction de l'incendie.

❖ Phase 1: Naissance :

Après allumage par un point chaud (cigarette, allumette, court-circuit...etc.), le feu prend progressivement de l'ampleur dans le compartiment et les échanges thermiques avec l'environnement s'accroissent. Le feu chauffe les éléments situés à proximité, et provoque le début d'incendie à une quantité de matériaux combustibles.

Les premiers gaz et la fumée apparaissent, en un milieu fermé sous l'action de chaleur croissante la fumée s'élève jusqu'à hauteur du plafond et enveloppe toute la pièce. Durant cette phase, l'incendie demeure localisé. Les conséquences du feu sur les éléments de structure restent

généralement limitées et le risque d'effondrement du bâtiment est écarté.

❖ **Phase 2: Embrasement générale (Flash-over) :**

Durant cette période de transition de très courte durée, les particules imbrûlées des fumées et tous les objets combustibles présents dans le compartiment dans lequel le sinistre se développe s'enflamment brutalement. Ce phénomène appelé « flash-over » intervient habituellement lorsque la température moyenne de la couche chaude atteint de 500 à 600°C dans le compartiment.

❖ **Phase 3: Plein intensité :**

Dans le cas où aucune intervention n'a eu lieu, on se trouve en présence d'un incendie complètement développé. Pendant cette période stationnaire les températures et la production de la chaleur restent plus ou moins constantes. C'est ici que va intervenir la résistance au feu des éléments de construction. Ils doivent en effet éviter la propagation du feu vers d'autres locaux du bâtiment de manière à permettre le déroulement normal de l'opération d'extinction, sans que les pompiers ne courent des dangers excessifs.

❖ **Phase 4: Décroissance :**

Par manque de combustible ou d'oxygène, le feu s'éteint ou tend à s'éteindre. La température dans le compartiment diminue progressivement, mais demeure encore suffisamment élevée pour endommager la structure du bâtiment.

Ces différentes phases de développement d'un incendie sont schématisées dans le graphique ci-après (figure 2-2), montrant l'évolution de la température dans un compartiment en fonction du temps

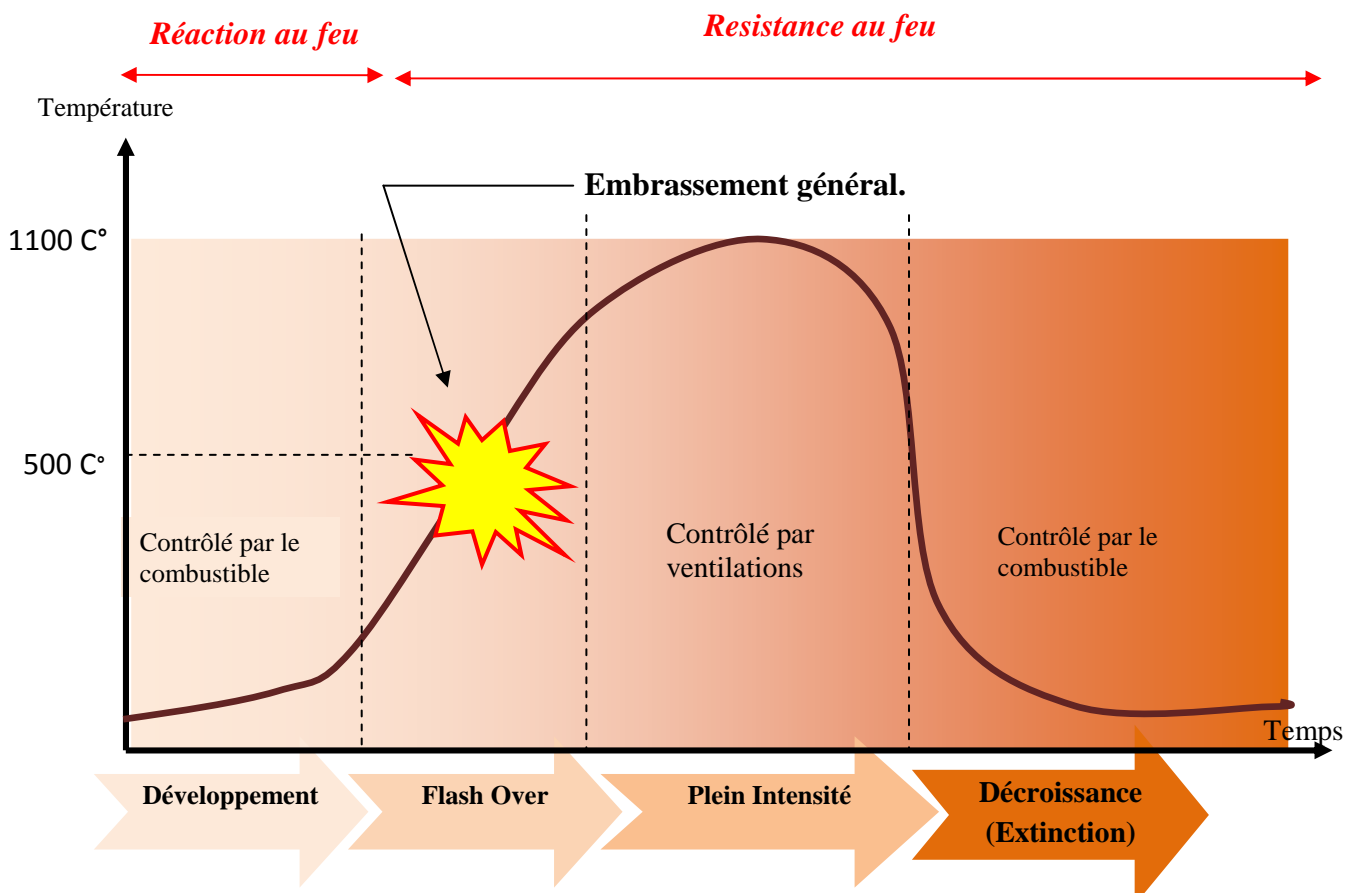


Figure 2-2: Evolution de la température lors d'un incendie réel [3]

Notons que tous les incendies ne passent pas par ces différentes phases ; certains ne se développent pas jusqu'au Flash over, par manque d'oxygène ou de combustible. [4] Dans la phase de développement, l'incendie est dit contrôlé par le combustible, car on peut supposer qu'il y a suffisamment d'oxygène disponible pour la combustion. Lors du flash over et lorsque l'incendie se développe avec sa pleine intensité, il devient contrôlé par la ventilation', car il n'y a généralement pas suffisamment d'oxygène pour brûler tout le combustible disponible. Des fumées riches en combustible quittent alors le compartiment et s'enflamment à nouveau lorsqu'elles sont mélangées à l'oxygène à l'extérieur du local. Ce phénomène produit des flammes s'échappant par les fenêtres et les portes. Lors de la phase d'extinction ou de refroidissement caractérisée par la courbe descendante, l'incendie redevient contrôlé par le combustible.

II-3-3 Mode de propagation du feu:

Lorsqu'un feu a pris naissance par la réunion en milieu comburant (oxygène) d'un combustible et une source de chaleur, il ya apparition des gaz et de la fumée. [4] Le feu tend à se propager soit par rayonnement, conduction et convection.

La chaleur dégager par le foyer, peut communiquer le feu à tous les matériaux combustibles qui se trouvent à proximité; C'est la propagation par **rayonnement**.

Suffisamment chauffé par le foyer initial, les matériaux bon conducteurs de chaleur par exemple le métal, peuvent a leur tour chauffer des matériaux combustibles même placée à distance (exemple: tuyau de chauffage propageant le feu de l'autre coté du mur); C'est la propagation par **conduction**.

Les gaz émis lors d'une combustion sont chauds, ils tendent à s'élever ou à s'éteindre s'ils rencontrent un obstacle horizontal. Lorsqu'une température de 600°C est atteinte ces gaz chauds qui se sont répondus sont à des niveaux supérieurs, soit a d'autres compartiments contigus peuvent à leur tour, s'enflammer ou enflammer des matériaux combustibles; C'est la propagation par **convection**.

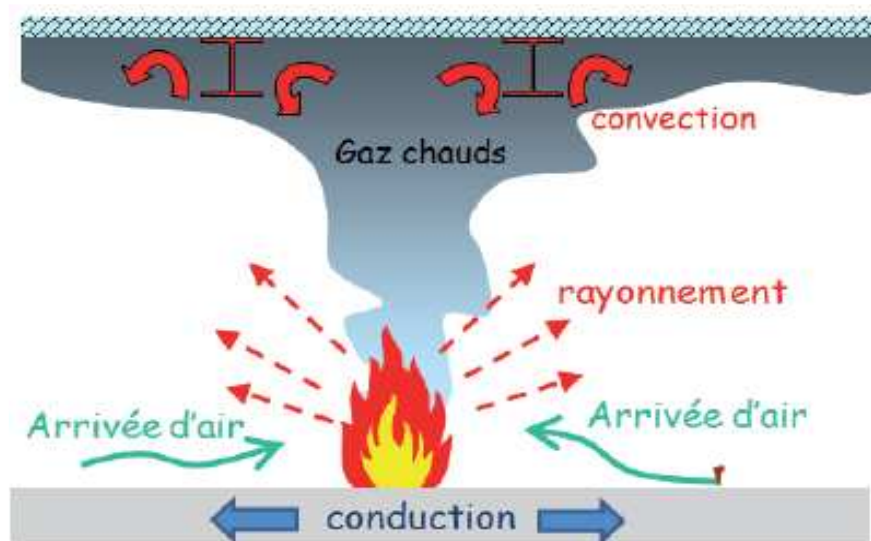


Figure 2-3: modes de propagation du feu dans un compartiment. [5]

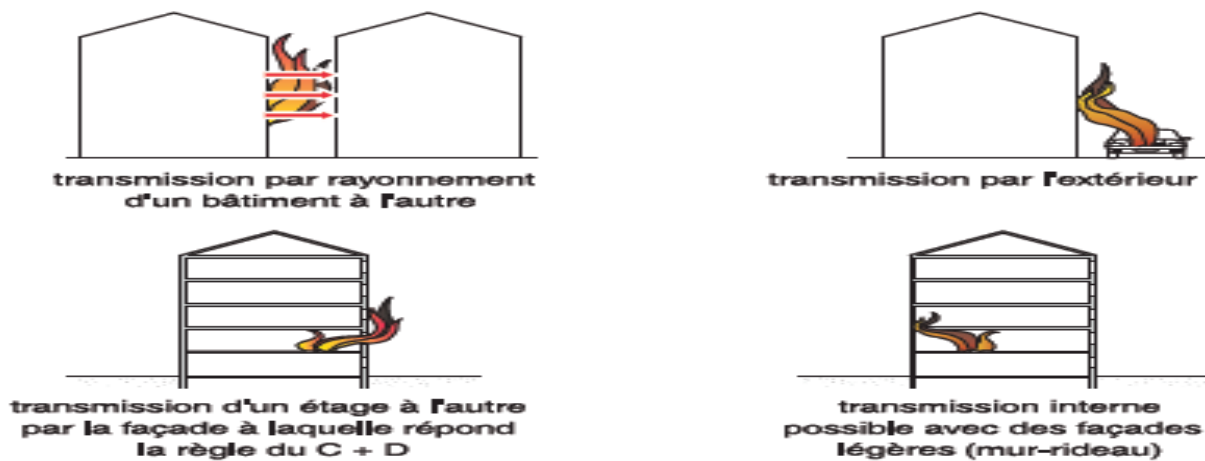


Figure 2-4: Différents transmissions du feu sur les façades. [5]

II-3-4 Moyens de prévention contre la propagation du feu :

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

- ◆ **Les communications horizontales :** Qu'ils s'agissent d'éviter la propagation par des produits combustibles ou par les appels d'air, pour assurer un arrêt au feu, il faut lui opposer des barrières. Ces barrières, ce sont les moyens fixes (cloisons et murs coupe-feu) et les moyen mobiles (portes, rideaux coupe-feu à fermeture automatique ou manuelle).
- ◆ **Les communications verticales :** Des moyens pris pour éviter la propagation verticale consistent un cloisonnement des gaines de passage, des montes charges et convoyeurs, et aussi cloisonnement des cages d'escaliers.
- ◆ **Les exutoires :** Afin d'éviter l'accumulation des gaz chauds et l'embrassement général qui peut en résulter, on peut prévoir en partie haute des locaux ou des cages d'escalier, des orifices ou ouvertures automatiques ou manuelles qui permettront l'évacuation de ces gaz. Ces exutoires peuvent activer localement le foyer, mais bien employés, évitent la propagation, éliminent les fumées et permettent le sauvetage et l'intervention dans de bonnes conditions.

II-4 Les Courbes Normalisées:

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

Historiquement, les courbes nominales ont été développées pour tester expérimentalement les éléments de construction, en vue d'en établir un classement relatif tant pour leur résistance que pour leur réaction au feu. Il est en effet hautement souhaitable que les éléments testés dans les différents fours soient soumis à la même action thermique.

Les courbes les plus fréquemment utilisées sont représentées par la (figure 2-7) .Elles ont été établies à partir de l'expérience sur des feux réels, tombant dans une des trois catégories majeures, à savoir les bâtiments, la pétrochimie, plates-formes en mer et les tunnels; Alors que pour les bâtiments la classification de résistance au feu est réalisée en appliquant la courbe de feu normalisée conformément à la norme **ISO 834**, dans le cas des tunnels on utilise la courbe d'hydrocarbures ou d'autres courbes température-temps spécifiques à un projet.

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

🚩 Courbe standard ISO 834 "Normalisée":

Correspondant à un scénario de feu conventionnel complètement développé, définit par l'équation logarithmique suivante :

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8t + 1) \dots \dots \dots [^{\circ}\text{C}]$$

Avec

θ_g = température des gaz dans le compartiment en $^{\circ}\text{C}$

t = temps en minutes

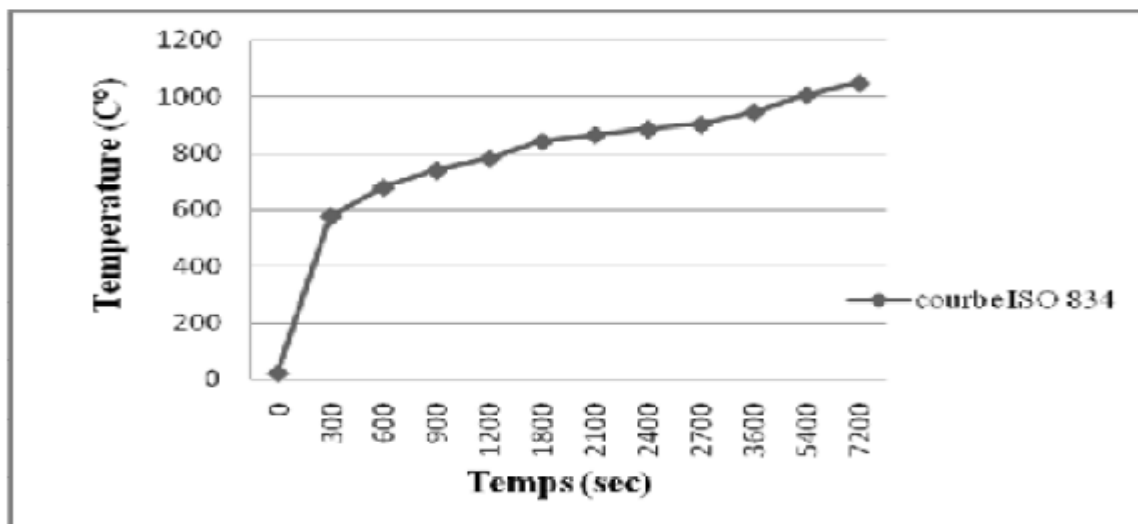


Figure 2-5: courbe nominale du feu conventionnel ISO834

La courbe standard (ou courbe ISO 834) est la courbe à laquelle toutes les réglementations européennes se réfèrent. De façon simplifiée, il peut être retenu que cette courbe atteint environ 500 $^{\circ}\text{C}$ après seulement 3 minutes, 800 $^{\circ}\text{C}$ après 30 minutes et plus de 1 000 $^{\circ}\text{C}$ après 90 minutes.

L'équation caractérisant la courbe [6] standard met en évidence deux phases distinctes lors d'un incendie : d'une part, la période d'embrasement généralisé durant laquelle se produit une augmentation très rapide de la température ou un choc thermique (jusqu'à une température d'environ 800 $^{\circ}\text{C}$), suivie d'autre part, de la période où l'incendie est entièrement développé, caractérisée par une augmentation moins rapide de la température pouvant aller jusqu'à 1200 $^{\circ}\text{C}$.

L'Eurocode 1 donne deux autres scénarios de feu normalisés suivants qui sont aussi fréquemment employés dans la pratique :

✚ **Courbe De Feu D'hydrocarbure :**

Définie par l'équation suivante:

$$\theta_g = 20 + 1080 (1 - 0,325 \times e^{-0,167t} - 0,675 \times e^{-2,5t}) \dots\dots [\text{°C}]$$

Avec :

θ_g est la température des gaz du compartiment [°C] ; test le temps [min]

t : temps après le début de l'essai (en minutes)

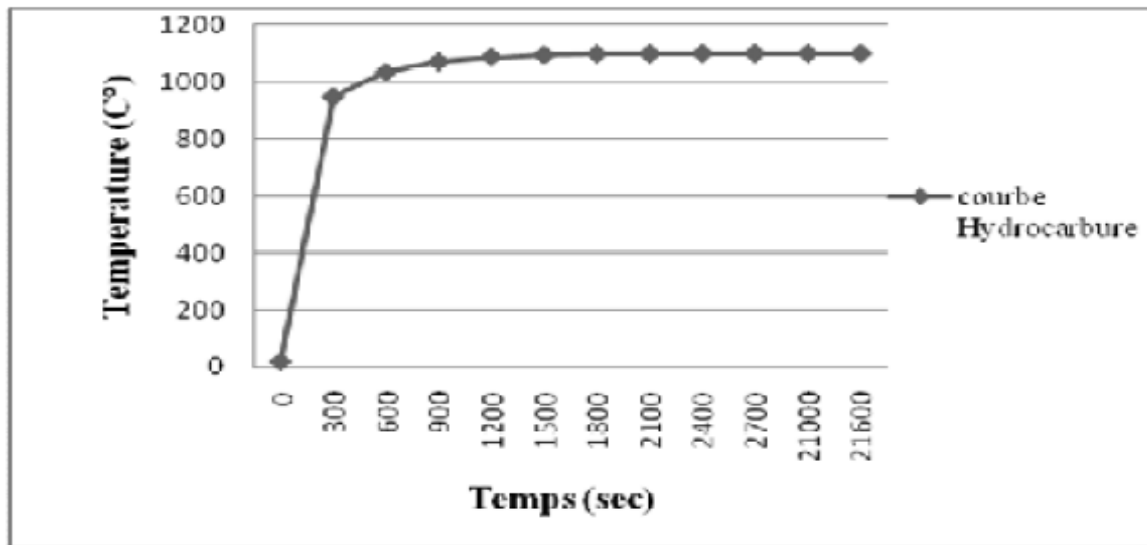


Figure 2-6: courbe du feu hydrocarbure.

Les températures sont ici plafonnées à $20 + 1080 \text{ °C}$ et qu'elle est développée dans les années 70 par la compagnie pétrolière Mobil présente une montée en température très rapide [6] avec une température de 900 °C dans les 5 premières minutes et un plateau à 1100 °C . Cette recherche avait été initiée pour mettre au point une procédure de test pour évaluer les matériaux de protection contre le feu pour les plates formes de forage en mer et les complexes pétroliers.

✚ **Courbe de feu extérieur :**

$$\theta_g = 20 + 660 (1 - 0,687 \times e^{-0,32t} - 0,313 \times e^{-3,8t}) \dots\dots [\text{°C}]$$

Avec:

θ_g est la température des gaz du compartiment [°C] ; test le temps [min]

t : temps après le début de l'essai (en minutes)

La courbe de feu extérieur est une courbe plafonnée à une élévation de la température égale à $20 + 660 \text{ °C}$, c'est-à-dire à une température nettement inférieure à la courbe standard. Elle s'applique à la face externe des murs extérieurs à fonction séparative, susceptibles d'être exposés au feu à partir de différentes parties de la façade, c'est-à-dire directement de l'intérieur du compartiment en feu concerné ou d'un compartiment se trouvant au-dessous ou à côté du mur concerné.

Ces courbes nominales sont représentées à la figure (2-7) et elles ont toutes les caractéristiques suivantes :

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

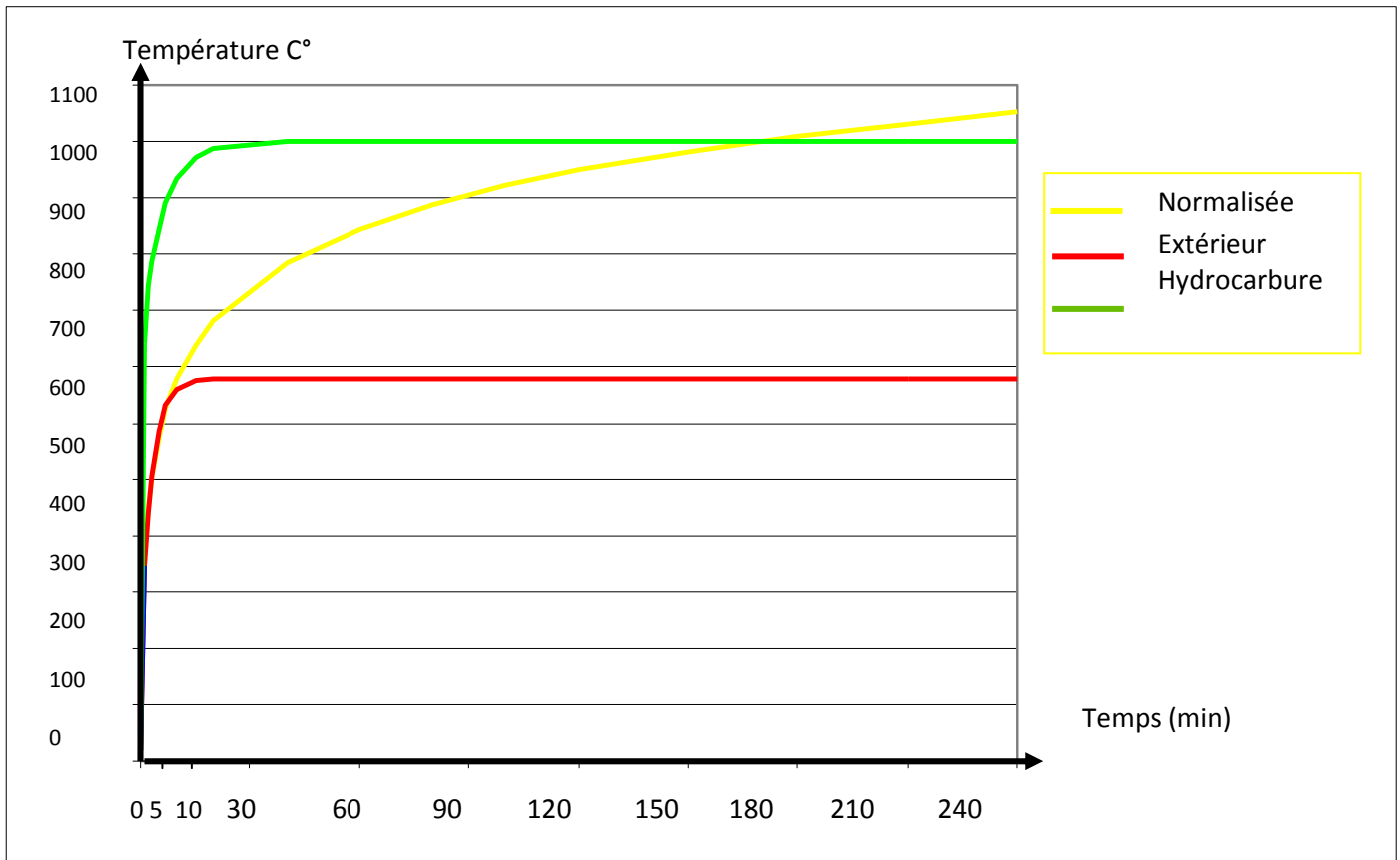


Figure 2-7: Courbes normalisée montre l'évolution de températures d'un essai au feu [15]

II- 5 Notion de vérification au feu:

Les éléments de construction, [7] lorsqu'ils sont soumis à l'action d'un incendie, subissent un accroissement de leur température interne. Etant donné que les propriétés mécaniques (résistance, rigidité...) des matériaux de construction se dégradent au fur et à mesure de l'élévation de la température, un élément de structure se déforme et peut même s'effondrer : ce qui entraîne le concept de la durée de résistance au feu.

II- 5 -1 Comportement au feu des matériaux de constructions et des ouvrages selon l'Eurocode:

La connaissance du potentiel calorifique et du comportement au feu des matériaux et des éléments de construction permet d'élaborer une protection contre le feu. En France, le comportement au feu est ainsi apprécié selon :

- **La réaction au feu:** s'applique aux matériaux de construction. Elle mesure l'ensemble des propriétés des matériaux de construction en rapport avec la naissance et le développement d'un incendie. Elle est caractérisée par le potentiel calorifique [8], la non-combustibilité, l'inflammabilité, le mode de propagation des flammes à la surface du matériau, éventuellement par d'autres propriétés comme la formation de fumées et la production de gaz toxiques.

- **La résistance au feu:** s'applique aux éléments de construction. Elle constitue une mesure de leur aptitude à remplir le rôle qui leur est dévolu, malgré l'action d'un incendie.

Ces deux notions sont donc totalement différentes. La première intervient à la naissance et au début du développement de l'incendie alors que la seconde se manifeste dans la phase de pleine intensité. Aucun des deux domaines ne peut être négligé en prévention incendie. Définie par l'Arrêté du 21 novembre 2002.

II- 5-1-1 La réaction au feu des produits de constructions et Leurs classification:

Le classement de réaction au feu est susceptible de s'appliquer aux matériaux de construction [8] finis et aux revêtements appliqués sur leurs supports (panneaux, plaques, films, feuilles, tubes, ...), les matières premières n'étant pas concernées. Les matériaux sont classés en deux groupes [9] (combustibles et incombustibles) et en six catégories traduisant la facilité d'inflammation (M_0 pour les incombustibles et de M_1 à M_4 et Non Classé pour les combustibles). Par ailleurs, dans un souci d'harmonisation, la Commission Européenne a adopté en 1983 [10] un système de classement en réaction au feu des produits de construction. Sept euroclasses allant de A à F (des matériaux les moins combustibles aux plus combustibles) ont été définies et remplaceront, à terme, le classement français en classes M. Schématiquement, par rapport au classement français actuel, la classe F remplacera la catégorie des matériaux non classés, les matériaux relevant des catégories M_1 à M_4 se répartiront entre les classes B, C, D et E et les classes A_1 et A_2 seront accessibles aux produits à faible fraction organique et se substitueront à la catégorie M_0 . L'attribution d'une euroclasse de réaction au feu est construite sur la contribution énergétique uniquement. Elle est accompagnée, pour certaines des euroclasses, de classifications additionnelles relatives à la production de fumées et de particules ou gouttes enflammées. Ces dernières dispositions sont nouvelles pour la France puisque, à l'heure actuelle, d'une part, la mesure de l'opacité des effluents émis lors des essais de réaction au feu n'est pas réalisée et, d'autre part, la production de gouttes enflammées est évaluée par des essais complémentaires et intégrée dans le classement (un produit pouvant passer de M_1 à M_4 s'il donne lieu à ce genre de phénomène).

La combustibilité est la quantité de chaleur émise par combustion complète du matériau, tandis que **l'inflammabilité** est la quantité de gaz inflammable émise par le matériau.

II- 5-1-1-1 Classement de réaction au feu des produits de construction selon le système Européen (l'Euroclasse) :

En fonction des résultats obtenus aux essais préalablement décrits, le produit obtient l'une des sept Euroclasses associées (ou non) à des critères complémentaires qui caractérisent sa contribution à la production de fumée et de particules et/ou gouttelettes enflammées.

Les différentes Euroclasses utilisables sont résumées dans le tableau suivant :

Classes de performances de réaction au feu classement selon les « Euroclasses »		
A₁	aucune contribution au feu, même dans le cas d'un feu très développé.	
A₂	très faible contribution au feu.	
B	Contribution faible au feu.	
C	Contribution significative au feu.	
D	Contribution élevée au feu.	
E	Contribution importante au feu.	
F	Pas de comportement en réaction au feu déterminé.	
Critères complémentaires des classements A2, B, C ou D		
Production de fumée		
s	s₁	très faible production de fumées.
	s₂	production limitée de fumées
	s₃	production élevées de fumées
Production de gouttelettes/particules enflammées		
d	d₀	pas de gouttelette et/ou particule enflammée.
	d₁	gouttelettes et/ou particules enflammées ne persistant pas plus de 10 secondes.
	d₂	gouttelettes et/ou particules enflammées.

Tableau 2- 1 : Classement de Réaction au feu de certains matériaux selon le système Européen.

L'expression du classement de la réaction au feu d'un produit se fait donc sous la forme suivante :

A₂-s₁, d₀ : Produit avec une très faible contribution au feu une très faible production de fumée et sans production de particules et/ou gouttelettes enflammées

II- 5-1-1-2 Classement de réaction au feu des produits de construction selon le système Français :

La classification de réaction au feu réalisée selon les référentiels d'essais français, sont résumées dans le tableau suivant :

	Classement de réaction au feu selon le référentiel Français « Classement M »
M₀	Produit non combustible
M₁	Produit non inflammable.
M₂	Produit difficilement inflammable.
M₃	Produit moyennement inflammable.
M₄	Produit facilement inflammable.

Tableau 2- 2 : Classement de Réaction au feu des matériaux selon le référentiel Français

Classement Française	Caractères	Critères d'appréciations	Principaux matériaux	Classement Européen équivalent	
M₀	Incombustible	Pouvoir calorifique < 600 Kcal/Kg	Béton, plâtre, verre, terre cuite, amiante, métaux, laines minérales	A₁ ; A₂	
Combustible	M₁	Ininflammable	Pas de production de chaleur notable	Mousses phénoliques. matériaux ignifugés : bois, PVC rigide, silicones	B
	M₂	Difficilement Inflammable	Production de Chaleur croissante de M ₂ à M ₄	PVC rigide, méthacrylate, certains bois	C
	M₃	Moyennement Inflammable		Bois résineux, contreplaqué non traité, feutre, laine, matériaux de synthèse, méthacrylates, certains PVC polystyrènes	D
	M₄	Facilement Inflammable		+ chute de gouttes	Polyuréthane, acétates de cellulose, polystyrènes, polyéthylènes, carton.
	NC	Non classé	---	Autre matériaux	F

Tableau 2- 3 : tableau récapitulatif montrant la transposition entre le classement Français et le classement Européen [11]

II- 5-1-2 La résistance au feu des éléments structuraux:

La «résistance au feu» indique le temps durant lequel, lors d'un feu, un élément de construction (paroi, plancher, plafond, porte, ...) conserve ses propriétés physiques et mécaniques. Ce matériau est classifié dans trois catégories :

La résistance mécanique ou force portante; L'étanchéité aux flammes et L'isolation thermique.

* **La résistance mécanique R:** Il s'agit d'un critère de stabilité, stipulant que l'élément concerné continue à assurer sa fonction de résistance pendant la durée requise.

* **L'étanchéité aux flammes E :** à pour but d'éviter la propagation directe des flammes à travers des fissures ou ouvertures dans un élément de construction.

* **L'isolation thermique I:** à comme objectif, de limiter la montée des températures de la face non exposés de l'élément soumis à l'incendie. [12]

Ces trois critères conduisent, selon la fonction ou le rôle qu'est appelé à jouer par un élément de construction ou d'ouvrage (au cours d'un incendie) aux trois catégories de performances en résistance au feu suivantes :

- Si l'élément n'a qu'une fonction portant, par exemple un élément d'ossature (poutre ou colonne), c'est uniquement le critère de mécanique qui doit être satisfait **stabilité au feu (SF)**

- Si l'élément n'a qu'une fonction séparant, par exemple une cloison, l'élément doit satisfaire aux critères d'isolation thermique et d'étanchéités aux flammes et aux gaz chauds **pare-flamme (PF)**.

- Si l'élément à une fonction portant, et une fonction séparant **coupe-feu (CF)**, pour laquelle sont requis les critères d'étanchéité aux flammes et aux gaz chauds et d'isolation thermique. Ce critère exige que l'échauffement de la face non exposé au feu n'atteigne pas la température d'inflammation spontanée des matériaux (140 °C en moyenne, 180 °C sur un point de mesure).

Il apparaît clairement que la catégorie pare-flamme (PF) ne peut être respectée que si le critère de la catégorie stabilité au feu (SF) l'est. Il en est de même pour la catégorie coupe-feu qui ne peut être respecté que si les critères des catégories stables au feu (SF) et pare-flamme (PF) le sont aussi (voire tableau 2- 4).

<i>CRITÈRES</i> <i>CATÉGORIES</i>	<i>Résistance mécanique ou stabilité</i>	<i>Étanchéité aux flammes et aux gaz</i>	<i>Isolation thermique</i>
<i>Stable au feu (SF)</i>	X		
<i>Pare-flamme (PF)</i>	X	X	
<i>Coupe-feu (CF)</i>	X	X	X

Tableau 2- 4 : critères de résistance au feu [11]

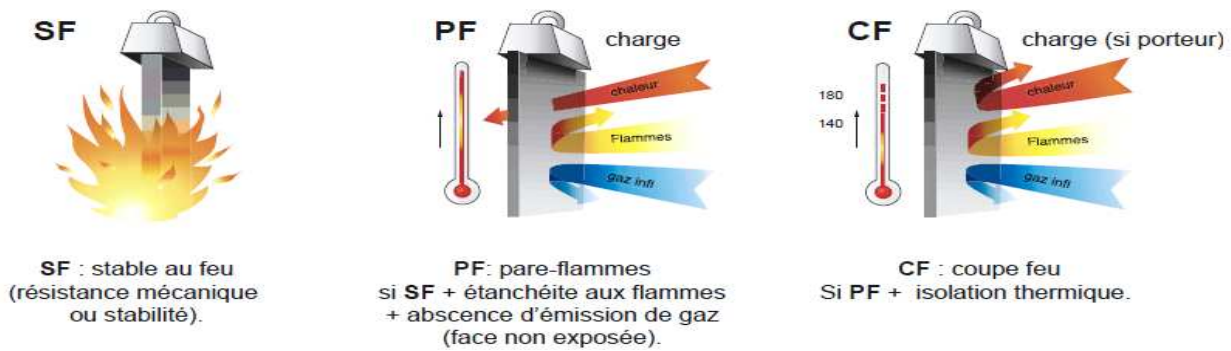


Figure 2-8: schéma représentatif des différents critères [12].

Pour les éléments de structure n'ayant qu'une fonction porteuse, tels que les poteaux et les poutres, la durée de résistance au feu est définie comme la durée pendant laquelle l'élément, soumis aux conditions de feu conventionnel, est capable de résister à la charge mécanique applicable à la situation incendie.

Compte tenu du caractère conventionnel de la courbe thermique normalisée, la durée de résistance au feu est aussi essentiellement une quantité conventionnelle. Elle ne doit pas être interprétée comme le temps disponible pour évacuer un bâtiment, mais comme un moyen pratique, suffisamment représentatif pour classer les éléments de constructions vis-à-vis de leurs performances au feu. Les exigences de la résistance au feu dépendent des circonstances (comme la hauteur et l'occupation de bâtiment; La charge d'incendie) qui diffèrent d'un pays à un autre, suivant les normes appliquées.

Les quatre valeurs les plus couramment utilisées dans la réglementation incendie européenne sont **30, 60, 90 et 120 minutes (R30, R60, R90, R120)**, cette dernière représente un maximum pratique.

II- 5-2 Principe de vérification de la résistance au feu :

Le problème des actions et des résistances ultimes à considérer pour une structure soumise à un incendie n'est qu'un élément, essentiel sans doute, du problème beaucoup plus vaste de la sécurité d'une structure contre les dommages causés par le feu. Une telle sécurité est assurée par la protection active et la protection passive. Alors que la protection active tend à réduire la probabilité d'arrivée d'un incendie, la protection passive a pour but d'assurer un comportement adéquat des différentes composantes et de l'ensemble d'un bâtiment lorsqu'un incendie s'est produit. La sécurité exigée ou le niveau de probabilité de ruine acceptable dépendent du type de la destination, de l'importance du bâtiment, du mode de rupture, des conséquences d'une ruine éventuelle. En pratique, les critères de performance sont vérifiés en comparant directement ou indirectement la durée de résistance au feu imposée à la durée de résistance estimée par calcul ou essai.

La durée de résistance au feu imposée dépend du type et de la destination du bâtiment, de la charge incendie, de l'importance de l'élément pour la stabilité générale de la structure portante. Habituellement, elle est spécifiée par les autorités compétentes qui se basent sur des

lois existantes qui tiennent compte des incertitudes inhérentes aux phénomènes en jeu et sont donc évaluées avec une certaine sécurité, inconnue à priori. La résistance au feu imposée est donc plus grande que la résistance au feu strictement nécessaire pour les opérations de secours.

La durée de résistance au feu estimée par essai ou par calcul doit être au moins aussi grande que la résistance au feu imposée. Afin de réaliser un dimensionnement économique, il importe d'ailleurs que ses deux quantités soient aussi proche que possible l'une de l'autre.

Pour estimer la résistance au feu, il faut s'assurer que les modèles utilisés sont choisis avec un certain degré de sécurité. De cette manière, la résistance au feu réelle de l'élément dans la structure sera au moins aussi grande que la valeur estimée. Il importe cependant de ne pas aboutir à des valeurs trop éloignées l'une de l'autre, ce qui signifierait une sécurité exagérée, donc antiéconomique. Ce que nous illustrons au moyen du schéma et des figures (2-9) et (2-10).

Il faut néanmoins bien garder à l'esprit que le principe de la vérification est effectuer vis-à-vis de l'incendie normalisé, ce qui représente une situation conventionnelle dont on sait qu'elle est parfois éloigné de la réalité. Une des conséquences sur laquelle il peut être utile d'insister est qu'il ne faut pas faire d'amalgame entre la durée de résistance à un incendie normalisé, qu'elle soit obtenue par calcul ou qu'elle résulte d'un essai, et la durée qui s'écoulera lors d'un incendie avant que la structure s'effondre. Un incendie réel peut en effet présenter un caractère plus sévère, ou moins sévère qu'un incendie normalisé.

Il est possible de prouver l'exigence de résistance au feu de 3 manières différentes, qui sont équivalentes et aussi acceptables l'une que l'autre [2.1 ; 2.2 ; 2.3]. Celles-ci sont illustrées à la figure (2-10) qui est valable pour une structure simple caractérisée par une température θ_d et par une sollicitation $E_{fi,d}$ qui est constante au cours du temps, une barre d'acier en traction par exemple. On a aussi représenté sur le graphe supérieur de la figure la diminution progressive de la résistance $R_{fi,d}$ et sur le graphe inférieur la valeur de la température qui amène à la ruine $\theta_{cr,d}$. La ruine survient après le temps $t_{fi,d}$ au moment où la résistance est égale à la charge appliquée, ce qui se marque aussi par le fait que la température est égale à la température critique. La durée de résistance prescrite est $t_{fi,req}$. La vérification peut se faire :

1. En terme de durée, voir 1 sur la figure :

$$\text{Durée de résistance} > \text{durée requise} \quad \mathbf{T}_{fi,d} \geq \mathbf{T}_{fi,requ} \dots\dots (2.1)$$

2. En termes de résistance, voir 2 sur la figure :

$$\text{Résistance} > \text{effet des actions. au temps } t = t_{fi,req} \quad \mathbf{R}_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \dots (2.2)$$

3. En termes de température, voir 3 sur la figure :

$$\text{Température} < \text{température critique. au temps } t = t_{fi,req} \quad \mathbf{\theta}_d \leq \mathbf{\theta}_{cr,d} \dots\dots (2.3)$$

Ou:

$\mathbf{T}_{fi,d}$ est la valeur de calcul de la résistance au feu normalisé ;

$\mathbf{T}_{fi,requ}$ est la durée exigée de résistance au feu normalisé ;

- $R_{fi,d,t}$ est la valeur de calcul de la capacité résistante pour la situation de feu ;
- $E_{fi,d,t}$ est la valeur de calcul des effets correspondants des actions pour la situation de feu ;
- θ_d est la valeur de calcul de la température du matériau ;
- $\theta_{cr,d}$ est la valeur de calcul de la température critique du matériau

Quelque soit le type de vérification envisagé parmi les trois types présentés ci-dessus, la vérification doit se faire à l'état limite ultime. En pratique, la vérification en termes de température ne peut se faire [7] que si la température de l'élément est uniforme, comme pour certains éléments en acier, ou si la ruine est conditionnée par le comportement d'un élément que l'on peut caractériser par sa température, comme une poutre ou une dalle en béton dont le comportement est conditionné par la température des armatures inférieures. Cette vérification en termes de température n'est évidemment pas possible si le champ de température est non uniforme, comme dans les éléments mixtes acier-béton par exemple.

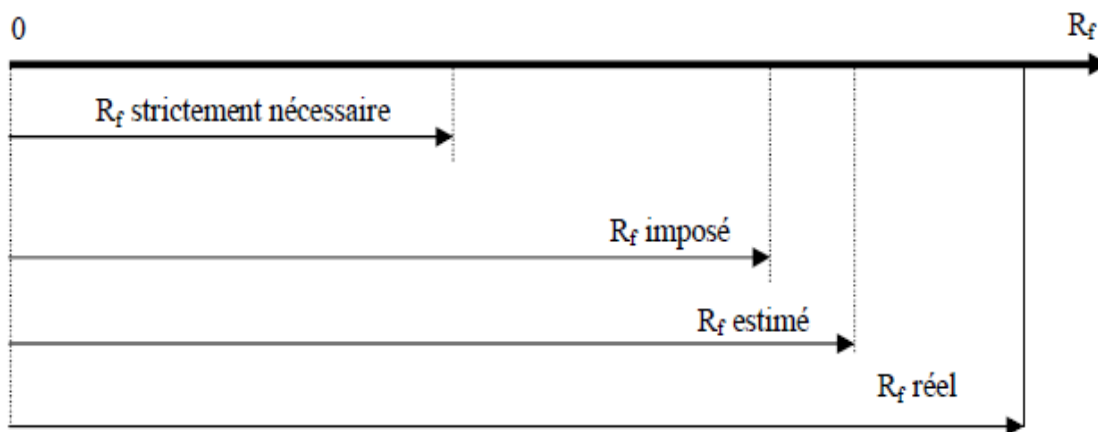


Figure 2-9: Schéma de vérification de la résistance au feu

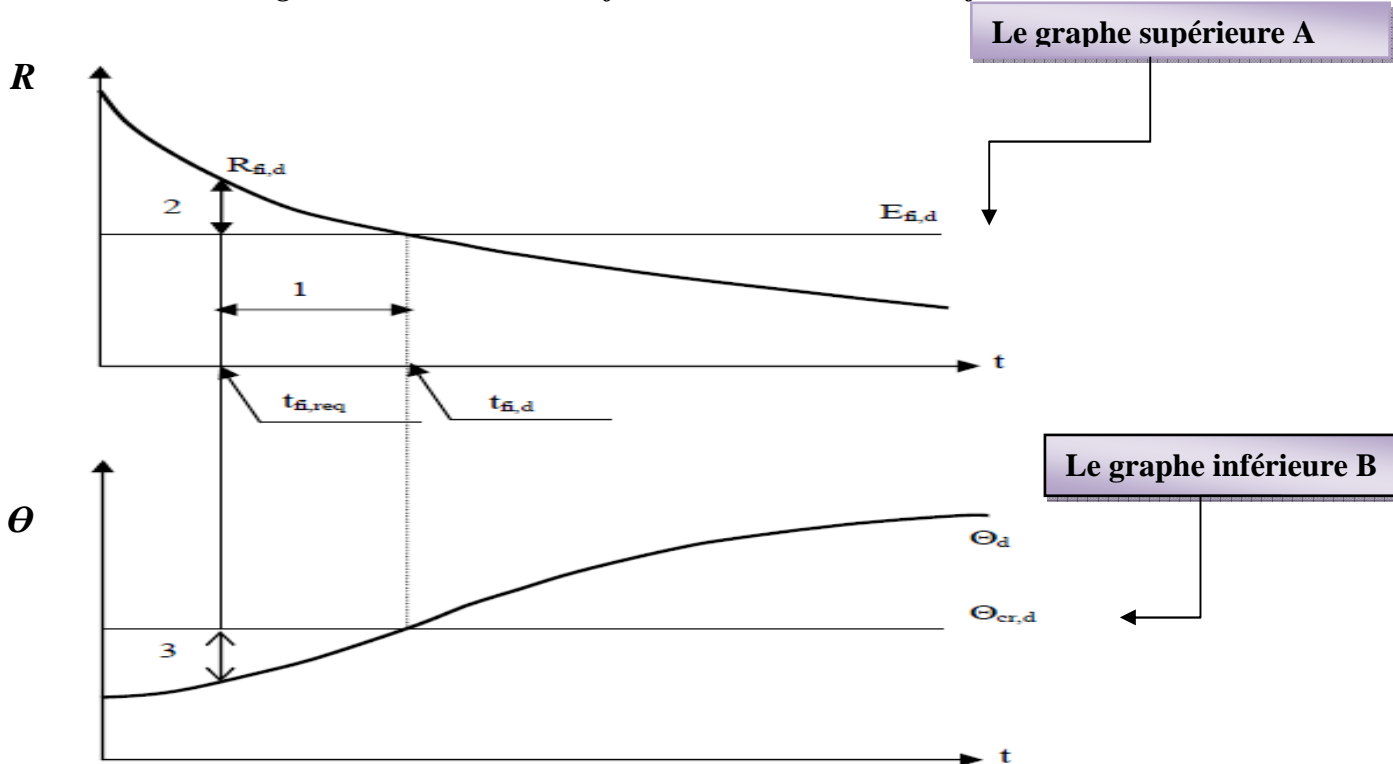


Figure 2-10: Trois vérifications équivalentes de résistance au feu [13].

II-6 INTRODUCTION A LA SECURITE INCENDIE :

Jusqu'aux années 1970-1980, les approches scientifiques de l'incendie étaient quasi inexistantes [4]. A l'heure actuelle et notamment à l'arrivée des Eurocode, les choses ont complètement changées, à un point que la sécurité incendie n'est plus un point empirique ; c'est devenue une véritable science appliquée faisant appel à des compétences variées et de haut niveau.

La sécurité incendie est une approche globale et logique dont le caractère est complexe. Elle repose sur un certain nombre d'objectifs ou d'exigences fondamentales que l'on veut atteindre et qu'il est important de définir avant de songer à adopter une stratégie de prévention et de protection contre l'incendie.

La réglementation de sécurité et de protection contre les risques d'incendie et de panique, est en relation avec l'activité et la taille des bâtiments ou des ouvrages concernés. La sécurité incendie et les textes réglementaires d'application résultent d'évolutions permanentes, qui sont souvent le fruit de l'expérience des catastrophes.

II-6 -1 Objectif de la sécurité incendie :

Les objectifs de la sécurité incendie [14] sont la protection efficace contre les risques d'incendie des personnes et des biens. Plus précisément, ils concernent :

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

Les exigences de base de la protection incendie consistent à

- réduire le développement de l'incendie ;
- éviter la propagation du feu ;
- assurer l'évacuation rapide des occupants avec une relative sécurité
- faciliter l'intervention du corps des sapeurs pompiers.

II-6 -2 Prévention et Prévision :

Le risque d'incendie existera toujours puisqu'il est impossible de n'utiliser que des produits incombustibles dans les bâtiments, aussi le respect et la mise en place d'un ensemble de Mesures de prévention adéquates [6] et leur prise en compte dans la conception du bâtiment sont essentiels pour limiter et maîtriser le risque incendie.

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

Mesure Active de prévision :

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

Le feu doit être détecté au plutôt pour être combattu efficacement. L'ensemble des mesures de Protections actives doit être efficace dans les deux premières phases de développement du sinistre [16].

Nous présentons quelques dispositifs de protection active :

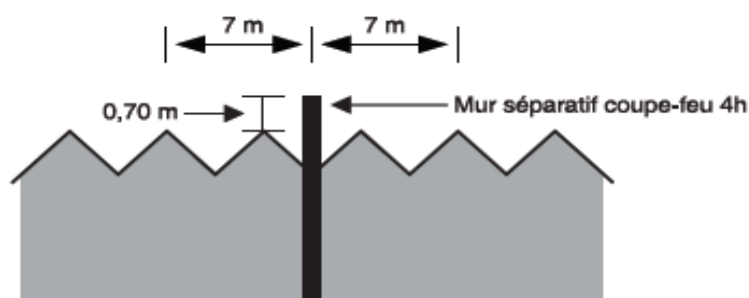
- * Les détecteurs réagissant à la fumée, à la chaleur, ou aux flammes déclenchent une alarme sonore et la mise en œuvre de certains équipements ;
- * Les consignes de sécurité et le balisage favorisent l'évacuation des occupants ;
- * Le système de désenfumage évacue les fumées toxiques, facilitant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

🚧 *Mesure Passive de prévention :*

Les protections secondaires sont dites « passives » lorsqu'elles mettent en œuvre des moyens permettant du fait de leurs conceptions et de leurs emplacements, une maîtrise des conséquences de l'incendie (compartimentage, cloisons ou planchers coupe-feu,... etc.) ; Elles constituent une protection opérationnelle à tout moment.

La protection au feu est réalisée par une série de mesures s'étendant de la conception des chemins d'évacuation, des compartiments, de la protection contre chaleur, fumées et gaz toxiques, l'inflammabilité des matériaux et le choix de l'emplacement des matières inflammables dans des locaux, jusqu'au dimensionnement au feu des structures portantes.

EXEMPLE DE MOYEN DE PRÉVENTION: LES MURS SÉPARATIFS COUPE-FEU DANS LES BÂTIMENTS INDUSTRIELS



Les murs séparatifs coupe-feu en béton (constitués de blocs, de panneaux ou les murs coulés en place) sont le meilleur moyen [5] d'assurer un cloisonnement efficace pour lutter contre l'incendie. Ils doivent avoir un degré coupe-feu de quatre heures selon la règle R 15 de l'APSAD. Construit selon les normes P 18-702 (règles BAEL 91), P 18-703 (règles BPEL 91) et la norme P 92-701 « Règles de calcul. Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton (changement de statut du DTU, règle de calcul FB 1987) », le mur doit dépasser de 70 cm le point le plus haut de la couverture.

II- 6-3 Exigence de sécurité incendie:

Toute protection incendie efficace repose sur la prise en compte du risque, tant au niveau de la conception architecturale du bâtiment (structure, dimensionnement et éléments de construction, dispositifs de circulation de l'air et des fumées, dispositions de sécurité actives et passives...) que des matériaux eux-mêmes ; l'objectif étant de stopper ou de retarder le plus longtemps possible la progression du feu à ses différentes phases d'évolution.

Une des règles fondamentales de la sécurité incendie consiste à préserver la vie humaine en favorisant l'évacuation des personnes et en facilitant l'action des sauveteurs. Mais il convient aussi de préserver durablement l'environnement ainsi que l'outil de travail et de production. Pour atteindre ces objectifs et permettre de préserver au maximum l'ouvrage, dans les meilleures conditions, il convient d'adopter des dispositions constructives destinées à maintenir le feu dans ses limites et à interdire toute propagation grâce à la constitution d'un compartimentage coupe-feu efficace et pérenne.

II- 6-3-1 Conception architecturale et sécurité incendie :

L'architecte, [5] dans le cadre de sa mission de conception, joue un rôle important : il doit prendre en compte, dans son projet, des différents paramètres parfois antinomiques. Parmi eux, la prévention contre l'incendie est l'un des plus importants. Il est primordial que le concepteur s'informe de la nature de l'ouvrage, de son activité et des risques qui en découlent ainsi que des objectifs de sécurité fixé

II- 6-3-2 Classement des établissements :

Les constructions et les bâtiments (ERP, bâtiments d'habitation, IGH, parkings, bâtiments industriels et commerciaux) se voient appliquer des dispositions de base selon leur mode d'exploitation, [12] leur hauteur, les occupants ou le public reçu. Un classement a été nécessaire pour définir les mesures de sécurité. Le classement de l'établissement, déterminé en fonction des effectifs qu'il doit accueillir et de sa hauteur, conditionne la conception future et l'emploi des matériaux. Il convient de retenir que le critère d'évacuation, établi en ayant connaissance des lieux, est fondamental.

1- Bâtiments d'habitation:

Il s'agit de villas individuelles ou en bande des résidences collectives .Le règlement détermine quatre familles de bâtiments selon la hauteur ; il est fondé sur le principe que les occupants connaissent les lieux, mais que leur évacuation n'est pas a priori organisée. Celle-ci peut être rapide dans les bâtiments bas. En revanche, pour les bâtiments plus hauts, il est nécessaire de prévoir des moyens de protection.

◆ 1^{re} famille :

- habitations individuelles isolées ou jumelées à R + 1;
- habitations individuelles en bande à rez-de-chaussée ;
- habitations individuelles en bande R + 1 lorsque les structures sont indépendantes.

◆ 2^{em} famille :

- habitations individuelles isolées ou jumelées de plus d'un étage sur rez-de-chaussée ;
- bâtiments collectifs à R + 3 maximum.

◆ 3^{em} famille :

3^{em} famille A :

- de R + 4 à R + 7 maximum;

- moins de 7 m depuis la porte palière d'un logement jusqu'à l'escalier le plus proche ;
- les accès aux escaliers sont atteints par la voie d'échelles.

3^{em} famille B :

- de R + 4 à R + 7 ne répondant pas aux règles ci-dessus.
- supérieure à R + 7 mais inférieure à 28 m de hauteur.

◆ 4^{em} famille :

Habitations dont le plancher bas du logement le plus haut est situé à plus de 28 m et à 50 m au plus au-dessus du niveau du sol utilement accessible aux engins des services de secours et de lutte contre l'incendie

2- Etablissement recevant du public (ERP) :

Il s'agit de tous bâtiments ou enceint accueillant à titre gratuit ou pas des personnes. Les établissements sont classés soit par type en fonction de l'activité, ou bien par catégories selon l'effectif du public et du personnel.

ERP, classement par type :

A - Établissements installés dans un bâtiment :

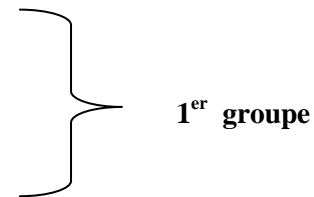
- J: structures d'accueil pour personnes âgées et personnes handicapées ;
- L : salles d'auditions, de conférences, de réunions, de spectacles ou à usage multiple ;
- M : magasins de vente, centres commerciaux ;
- N : restaurants et débits de boissons ;
- O : hôtels et pensions de famille ;
- P : salles de danse et salles de jeux ;
- R : établissements d'éveil, d'enseignements, de formation, centres de vacances, centres de loisirs sans hébergement ;
- S : bibliothèques, centres de documentation et de consultation d'archives ;
- T: salles d'expositions ;
- U : établissements de soins ;
- V: établissements de culte ;
- W : administrations, banques, bureaux ;
- X : établissements sportifs couverts ;
- Y : musées.

B - Établissements spéciaux :

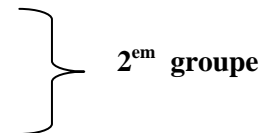
- PA : établissements de plein air ;
- CTS : chapiteaux, tentes et structures itinérants Ou à implantation Prolongée ou fixe ;
- SG : parcs de stationnement couverts ;
- OA : hôtels-restaurants d'altitude ;
- GA : gares accessibles au public ;
- EF : établissements flottants ou bateaux stationnaires et bateaux en stationnement;
- REF : refuges de montagne

ERP classement par catégories :

- 1^{er} catégorie : au-dessus de 1 500 personnes ;
- 2^{em} catégorie : de 701 à 1 500 personnes ;
- 3^{em} catégorie : de 301 à 700 personnes ;
- 4^{em} catégorie : de 300 à moins de 300 personnes,
À l'exception des établissements compris dans la 5e catégorie



- 5^{eme} catégorie : établissements dans lesquels l'effectif n'atteint
Pas le chiffre fixé par le règlement de sécurité pour chaque Type d'exploitation.



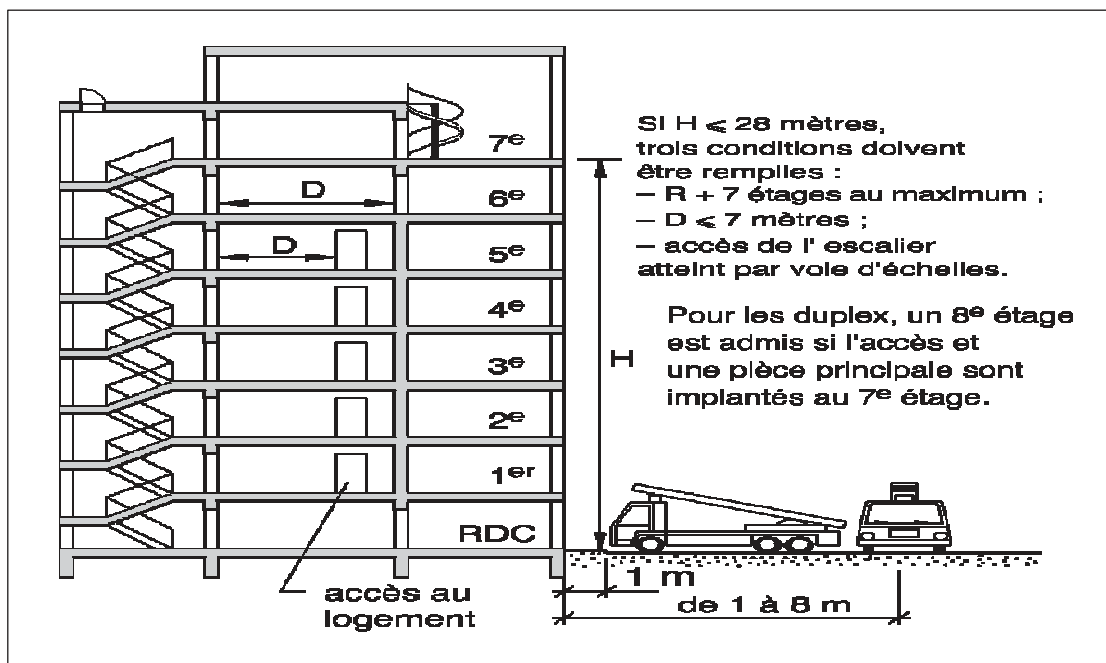
3- Immeubles de grande hauteur (IGH)

Est considéré comme IGH tout bâtiment dont le plancher du dernier niveau est situé par rapport au niveau du sol utilisable par les engins des services publics de lutte contre l'incendie :

- à plus de 50 m pour les immeubles d'habitation ;
- à plus de 28 m pour les autres immeubles.

Une évacuation totale et rapide n'est guère possible et la hauteur des bâtiments augmente les difficultés d'intervention des sapeurs-pompiers. Il en résulte qu'un compartimentage renforcé avec des planchers coupe-feu de degré deux heures est nécessaire. Ceci peut, par exemple, peut être obtenu avec des planchers en dalle pleine de béton de 11cm d'épaisseur au minimum

Exemple d'un bâtiment de logements de la 3^{em} famille [5] :



La 3^{eme} famille concerne les habitations dont le plancher bas du logement le plus haut est situé à moins de 28 m au-dessus du sol accessible aux engins des services de secours et de lutte contre l'incendie. Leur stabilité au feu est d'une heure et les planchers sont coupe-feu une heure

4- Lieux de travail :

Il s’agit des usines et, des bureaux, des entrepôts de stockage. Les lieux du travail du personnel respectant le code du travail [12] ; il existe deux catégories de bâtiments :

- * Plancher haut < 8 m → pas de notion de résistance au feu
- * Plancher haut > 8 m → il ya Notion de résistance au feu SF/CF 1h des structures.

Les bâtiments et les locaux doivent être conçus et réalisés de manière à permettre en cas de sinistre:

- l’évacuation rapide de la totalité des occupants dans des conditions de sécurité maximale;
- l’accès de l’extérieur et l’intervention des services de secours et de lutte contre l’incendie ;
- la limitation de la propagation de l’incendie à l’intérieur et à l’extérieur des bâtiments.

Plus un bâtiment est élevé, plus le temps d’évacuation est long. Il faut donc éviter tout risque d’effondrement par une bonne résistance au feu et cela pendant un temps suffisamment long pour garantir une évacuation dans de bonnes conditions.

La réglementation suit cette doctrine. Les variations de résistance au feu exigées en fonction de la hauteur pour les différentes catégories de construction peuvent être synthétisées dans le tableau (2- 5) suivant :

	0 h	1/2 h	1 h	1 h 1/2	2 h	3 et 4 h
RDC seul	ERP (5 ^{ém} catégorie) Bureaux Industries	ERP (5 ^{ém} catégorie) Avec locaux réservés au sommeil au dessus du RDC				
H < 8 m	Industries	Bureaux (2 ^e ;3 ^e ;4 ^e catégories) Habitation (2 ^e famille)	ERP 1 ^{er} catégorie			
8 < H < 28m			ERP (2 ^e ;3 ^e ;4 ^e et 5 ^e catégories) Habitation (3 ^e famille) Bureaux industries	ERP 1 ^{er} catégorie		
28 < H < 50m				Habitation 4 ^e famille	IGH Classes W,O,R,U,Z	Isolement entre: IGH et ERP IGH et parc de stationnement
H > 50m					IGH Classes A	Isolement Classes A ERP, IGH et parc de stationnement

Tableau 2- 5: récapitulatif, stabilité au feu exigée pour la structure en fonction du type d’établissement et de sa hauteur

Son examen met en évidence que la grande majorité des constructions, quelle que soit leur catégorie, se situe entre 8 m et 28 m de hauteur, ce qui correspond à une exigence de stabilité au feu d'une heure. Le béton y répond sans aucune difficulté, comme le montrent les tableaux suivants (2- 6 ; 2- 7 ; 2- 8), et ce dans de très bonne condition économique.

D'une façon générale, le béton ne nécessite aucune protection rapportée particulière, jusqu'à deux heures de stabilité au feu et de degré coupe-feu. Ce matériau obéit donc à la réglementation et couvre les exigences de la législation pour la grande majorité des bâtiments.

II- 6-4 Réponses constructives aux exigences de sécurité incendie :

Quels que soient l'activité, la hauteur et les effectifs du bâtiment, des réponses préventives existent. Ainsi, il convient :

★ **d'assurer une évacuation rapide des personnes vers l'extérieur.**

À cet effet, on mettra à leur disposition :

- des couloirs isolés des locaux voisins par des parois et des planchers résistant au feu et désenfumés;
- des escaliers isolés des volumes contigus par des parois coupe-feu et désenfumés dans tous les cas;
- des issues sur l'extérieur.

Dans tous les cas, ces dégagements devront être bien répartis tant en nombre qu'en largeur et ce, en fonction de l'effectif à évacuer.

★ **de disposer de structures et de planchers résistant au feu ou s'opposant à son passage.**

Cette résistance au feu sera proportionnelle dans le temps:

- à la hauteur du bâtiment ;
- à l'effectif des personnes l'occupant simultanément;
- à l'activité du bâtiment.

Cette nécessité sous-entend que les trémies verticales non recoupées (gainés techniques, d'ascenseurs, de vide-ordures, etc.) ne constituent pas un affaiblissement des degrés de sécurité des structures et des planchers.

★ **de disposer d'écrans d'isolement (intérieur ou extérieur).**

Cette obligation a pour but :

- d'éviter une propagation interne de l'incendie à l'ensemble du bâtiment, avant qu'il ait été complètement évacué ;
- de permettre aux secours d'intervenir dans les meilleures conditions ;
- d'isoler le bâtiment concerné vis-à-vis des tiers, qu'il s'agisse d'un incendie prenant naissance dans son sein, ou d'un sinistre ayant pris son origine chez les tiers eux-mêmes.

II- 6-5 Principales Exigences :

Les éléments porteurs doivent être stables au feu pour éviter l'effondrement du bâtiment mais aussi, dans certains cas, être coupe-feu, en particulier pour les murs et les planchers, afin d'empêcher toute extension du sinistre. En fonction du type, de la catégorie, de la hauteur du bâtiment et de la présence de locaux réservés au sommeil, les différents degrés

(tant de stabilité au feu des structures que coupe-feu des planchers, parois, trémies ou gaines) sont variables. Et sont déterminée par les réglementations de sécurité incendie.

Le compartimentage devra limiter l'extension d'un sinistre et contribuer à la bonne évacuation des occupants. [5] Les aménagements intérieurs et leur réaction au feu devront être pris en compte notamment en ce qui concerne l'effondrement de la toiture et la ruine en chaîne de la structure. Les façades et les couvertures devront être conformes aux règles et éviter toute propagation.

Le dimensionnement des structures, du point de vue de leur résistance au feu, est généralement délicat à déterminer par le calcul. Dans la plupart des cas, on peut éviter cette démarche en se référant aux résultats des essais effectués sur des éléments de structure, qui permettent d'apprécier leur degré de résistance au feu. Pour l'ensemble des ouvrages en béton armé, certaines règles constructives générales facilitent la conception de structures aptes à satisfaire les critères d'exigences de résistance au feu et elles leur confèrent des degrés coupe-feu et stable au feu largement supérieurs aux exigences requises pour la plupart des bâtiments.

II 6-5-1 Les règles constructives :

Pour l'ensemble des ouvrages en béton armé, certaines règles constructives générales facilitent la conception de structures aptes à satisfaire les critères d'exigence de résistance au feu et leur confèrent des degrés coupe-feu et stables [5] au feu largement supérieurs aux exigences de la plupart des bâtiments.

Règles simples concernant les poteaux

L'évolution des températures à l'intérieur d'un élément en béton, en fonction du temps, de l'exposition au feu et de sa section, conduit à préconiser des sections de poteaux croissant avec la durée de résistance au feu envisagée. On constate qu'avec des sections usuelles (20 x 20 cm), les poteaux exposés au feu sur une face sont stables au feu pendant trois heures, ce qui est largement supérieur aux exigences des bâtiments d'habitation (toutes familles) et de la plupart des autres bâtiments.

Durée de résistance au feu	30 min	60 min	90 min	120 min	180 min	240 min
Poteau au feu sur les quatre faces	15	20	24	30	36	45
Poteau au feu sur une face	10	12	14	16	20	26

Tableau 2- 6 : Dimensions minimales d'un poteau à section carrée en (cm) selon le degré de résistance au feu exigé.

Règles simples concernant les murs porteurs :

Les valeurs d'épaisseur et d'enrobage d'acier d'un mur en béton armé, en fonction de la résistance au feu escomptée, sont fournies par le tableau suivant. On notera que les parois en

maçonnerie de blocs béton creux présentent un degré stable au feu et pare-flamme de six heures et un degré coupe-feu de trois heures pour une épaisseur de 15 cm.

Durée de résistance au feu	30 min	60 min	90 min	120 min	180 min	240 min
Epaisseur du mur	10	11	13	15	20	25
Enrobage des aciers	1	2	3	4	6	7

Tableau 2-7 : Caractéristiques en (cm) d'un mur en béton armé selon le degré de résistance au feu exigé.

 **Règles simples concernant les dalles pleines pour plancher :**

Pour les dalles de plancher – dont les armatures au niveau des appuis sont prévues pour équilibrer les moments de flexion – l'épaisseur cumulée de la dalle et de la chape doit respecter les valeurs suivantes.

Durée de résistance au feu	30 min	60 min	90 min	120 min	180 min	240 min
Epaisseur minimale	6	7	9	11	15	17.5

Tableau 2- 8 : Caractéristiques en (cm) d'un mur en béton armé selon le degré de résistance au feu exigé.

II-6-5-2 Protection des Façades :

À l'extérieur d'un bâtiment, les risques liés à l'incendie sont attachés, soit à la propagation en façade d'un feu d'origine intérieure (C + D), soit à l'inflammation de la façade par un feu d'origine extérieure.

La résistance à la propagation verticale du feu par des façades comportant des baies est assurée en appliquant la règle du C + D, qui concerne le ralentissement de la propagation du feu d'un étage à l'autre. Les valeurs C + D doivent être liées par une des relations ci-dessous, en fonction de la masse combustible mobilisable :

$$C + D \geq 1,00 \text{ m si } M \leq 80 \text{ MJ/m}^2$$

$$C + D \geq 1,30 \text{ m si } M > 80 \text{ MJ/m}^2$$

C : est la distance verticale, exprimée en mètres, entre le haut d'une baie et le bas de la baie qui lui est superposée lorsque la façade est en maçonnerie traditionnelle ou la valeur de l'indice caractéristique des panneaux de façade vitrés déterminé par essai.

D : est la distance horizontale, exprimée en mètres, entre le plan des vitres et le nu de la grande saillie de l'obstacle résistant au feu qui sépare les murs ou les panneaux situés de part et d'autre du plancher.

M : est la masse combustible mobilisable de la façade, à l'exclusion des menuiseries, fermetures et garde-corps, exprimée en MJ/m² et rapportée au mètre carré de la façade, baies comprises.

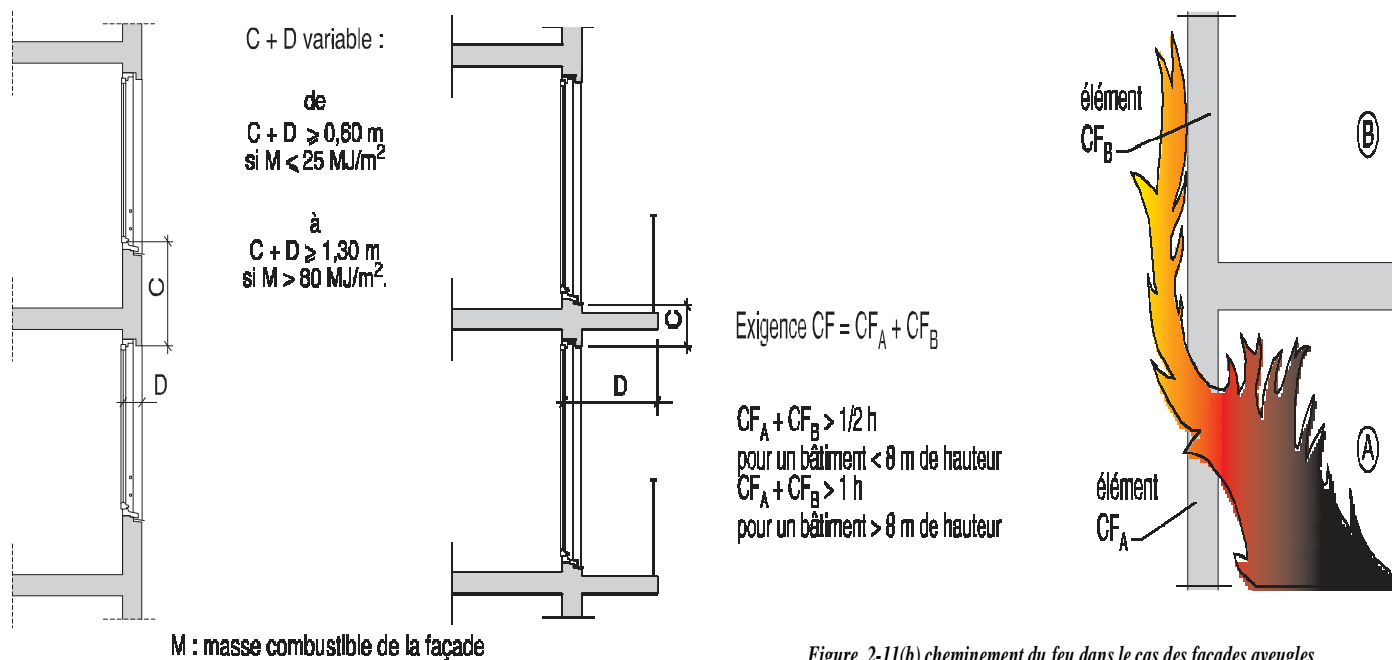


Figure 2-11 (a) montrant la règle du C + D:

Figure 2-11(b) cheminement du feu dans le cas des façades aveugles

Figure 2-11(a) : Exemple d'application de La règle C + D

Figure 2-11(b) cheminement du feu dans le cas des façades aveugles

II- 6-5-3 Compartimentage et distribution intérieure :

Le bâtiment est divisé en espaces plus petits, de telle façon qu'en cas d'incendie, le dommage soit limité à un tel espace, où l'extension de l'incendie d'un local à un autre soit freinée pour permettre l'évacuation des personnes, la sauvegarde des biens et l'intervention des services incendie.

Le compartiment est délimité par des parois séparantes ayant une résistance au feu suffisante. Les compartiments doivent permettre l'accès et la circulation des personnes et des biens. Ils sont pourvus d'ouvertures verticales pour permettre les circulations horizontales (portes) et d'ouvertures horizontales pour permettre les circulations verticales (escaliers, ascenseurs,...).

En outre, il y a généralement des percements pour les installations techniques (gaines de ventilations et autres conduites). Toutes ces ouvertures doivent pouvoir être fermées efficacement de façon à conserver intacte la résistance au feu des parois du compartiment.

Cela signifie que, non seulement les murs, les planchers et les plafonds qui délimitent un compartiment doivent avoir une résistance au feu, mais également que toutes les ouvertures doivent être pourvues de systèmes de fermeture assurant une résistance au feu suffisante.

Les cages d'escaliers et les chemins d'évacuation sont généralement traités comme des compartiments particuliers. Ces compartiments permettent l'évacuation des personnes en toute sécurité, ainsi que l'accès au bâtiment par les pompiers qui doivent, si nécessaire, secourir les blessés et combattre le feu à l'intérieur du bâtiment.

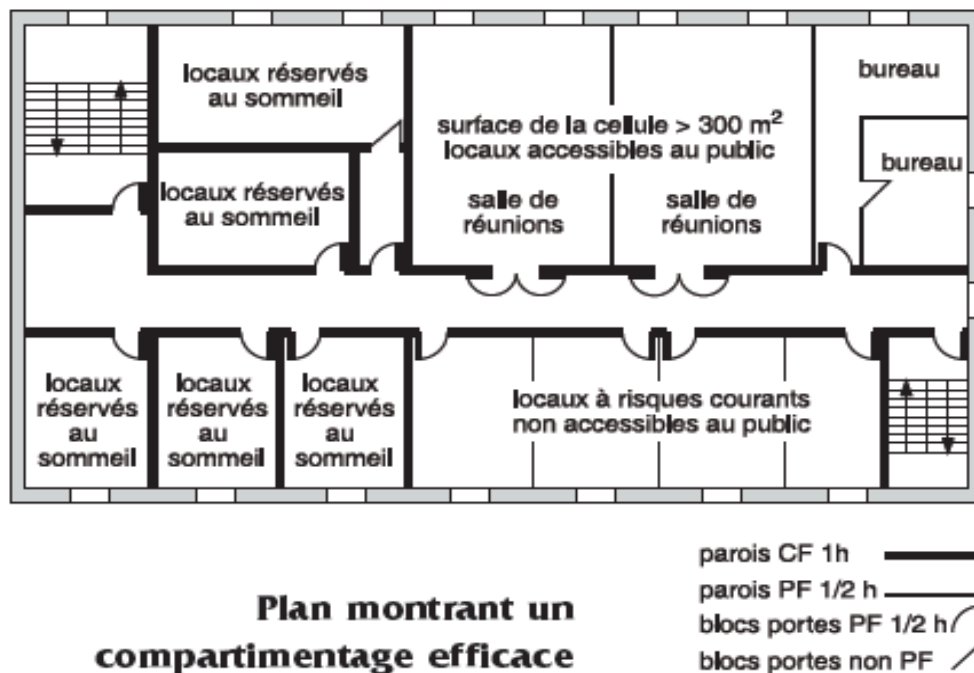


Figure 2- 12 : plan schématisant un bon compartimentage contre le feu. [5]

II-7 CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons présentée la notion générale à la modélisation d'un incendie, ayant trait à son déroulement, son développement et sa propagation. Ainsi que les différents scénarios du feu qui donnent l'évolution de la température des gaz en fonction du temps dans un compartiment en feu « les courbes normalisées qui constituent le point de départ pour toutes simulation concernant la résistance au feu des structures ».

Nous avons aussi abordée plusieurs points lié à la résistance au feu accompagné d'explications ; parmi aux les exigences réglementaires de vérification de la résistance au feu des éléments de constructions, c'est dans le but d'encren la problématique et d'en comprendre la philosophie de l'incendie dans l'esprit du lecteur.

Enfin nous avons détaillé d'une manière explicite les objectifs et les exigences de la sécurité incendie, les moyens de prévention et de protection pour limiter et maîtriser le risque d'incendie. Ainsi les textes réglementaires d'applications pour la conception de structures aptes à satisfaire les critères de résistances au feu.

CHAPITRE III:

CARACTÉRISTIQUES THERMO- MECANQUES DES MATERIAUX BETON ET ACIERS.



III-1 INTRODUCTION :

Lors d'un incendie, les structures perdent leur résistance mécanique suite à l'augmentation de la température, ce qui entraîne la ruine du bâtiment. Pour effectuer la vérification des éléments de structure, il nous faut donc connaître le comportement thermo-mécanique du béton et de l'acier.

Dans ce chapitre nous commençons d'une part par la présentation générale des matériaux Béton et Acier et le composite béton-armé, ses constituants, sa microstructure, ainsi ses caractéristique à températures normale 20°C.

D'autre part présentée les différents transformations physico-chimiques et les caractéristiques thermo-mécaniques du béton et de l'acier de construction, de précontrainte à des températures élevées.

Enfin, faire une comparaison sur la réduction de la résistance des matériaux Béton et acier en fonction de l'élévation de la température

III- 2 GENERALITE SUR LES MATERIAUX BETON-ACIER :**III- 2-1 BETON :**

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment, d'eau et d'éventuel adjuvant .Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydratée et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomerat solide. Les adjuvants et les additifs servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

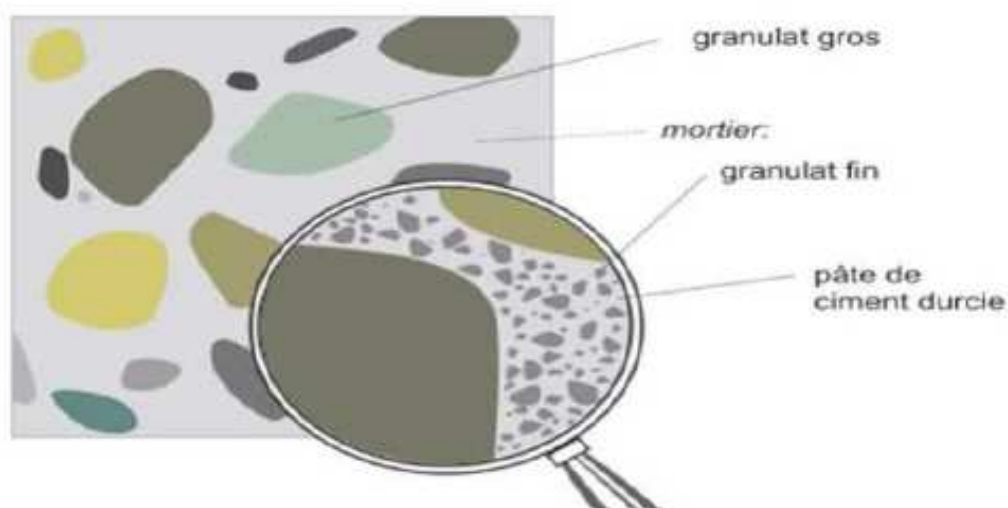


Figure 3-1: Composants d'un béton [17]

Le béton occupe, depuis son invention, la première place en volume d'utilisation des matériaux dans le domaine du bâtiment et du génie civil. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité et son faible coût. Il présente

également d'autres qualités, telles une excellente tenue au feu, une grande résistance aux chocs, une bonne protection contre les radiations nucléaires, etc.....

III- 2-2 ACIER :

L'acier est un alliage fer carbone en faible pourcentage, il se présente sous forme de barre de grande longueur (souvent 12m), il est introduit avant bétonnage de l'élément. D'où l'appellation du matériau résultant « béton-armé ». De plus l'acier présente le même comportement que ça soit en tractions ou en compressions, il est classé comme un matériau homogène. Généralement deux types d'aciers sont utilisés pour le renforcement du béton. Acier à haute adhérence (HA) et l'Acier lisse (doux). (Voir figure 3-2)

★ **Les aciers lisses** : barres lisses ou fils tréfilés lisses. Elles sont de section circulaire sans aucune gravure.

★ **Les aciers à haute adhérence** : dont la surface présente des saillies ou des creux. La surface de ces armatures présente des aspérités en saillies inclinées par rapport à l'axe de la barre appelée verrous, ou des aspérités en creux appelées empreintes qui sont destinées à favoriser l'adhérence des armatures au sein du béton.

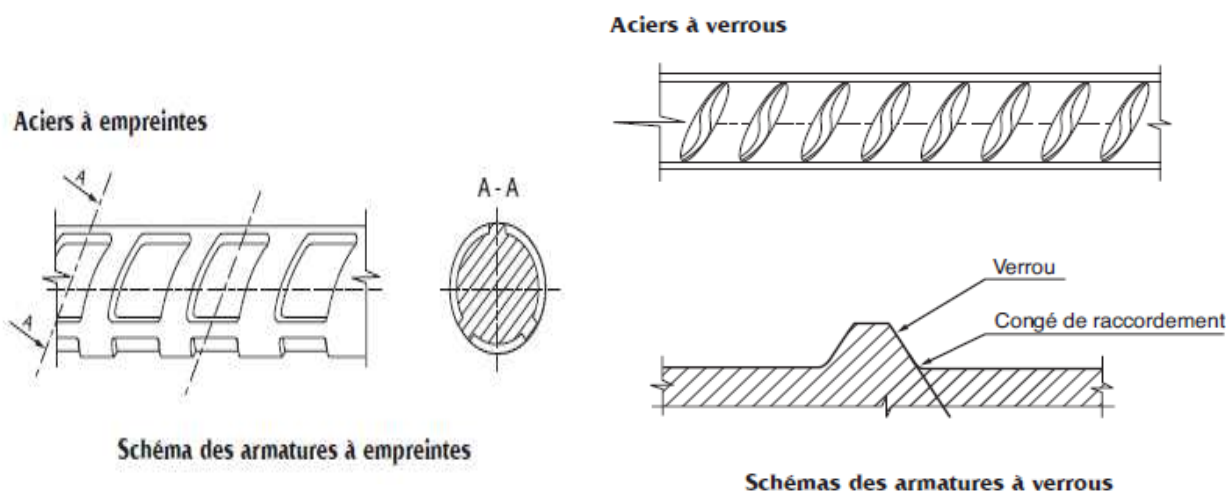


Figure 3-2 : schéma des différents types d'Aciers. [18]

III- 2-3 COMPOSITE BETON- ARME :

Le béton est un matériau capable de supporter des efforts de compression importants (10 à 100 MPa) alors que sa résistance aux efforts de traction est très faible (de l'ordre du dixième de sa résistance à la compression). C'est donc pour pallier cette insuffisance qu'est née l'idée de placer, dans les zones soumises à des efforts de traction en particulier, et de compression en générale des barres d'acier (armatures) [19] qui, elles sont résistantes aussi bien en compression qu'en traction. Le matériau résultant de l'association du béton et de l'acier est appelé « béton armé ». Dans une structure en béton armé, les aciers principaux sont

positionnés dans les parties tendues du béton pour compenser la faible résistance du béton en traction.

III-3 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX A TEMPERATURE AMBIANTE :

A- BETON :

A- 1 - Resistance Caractéristique en Compression f_{cj} :

Le béton présente une relative bonne résistance à la compression. Nous nous intéressons donc uniquement aux caractéristiques du béton car ce sont elles qui déterminent sa résistance. Cette résistance est obtenue par un grand nombre d'essais de compression jusqu'à rupture sur une éprouvette normalisée (16 x 32) cm de forme cylindrique. [22]

Elle est définie comme la valeur de la résistance en dessous de laquelle on peut s'attendre à rencontrer 5% au plus de l'ensemble des ruptures des essais de compression.

Aussi, la valeur conventionnellement retenue pour le calcul des ouvrages est f_{c28} , est La résistance caractéristique du béton à 28 jours, celle-ci varie en fonction de la granulométrie, du dosage en ciment et de la quantité d'eau de gâchage.

Pour des calculs en phase de réalisation, on adoptera les valeurs à ($j \leq 28$ jours), définies à partir de f_{c28} , par les lois suivantes extraites de (Art A.2.1, 11/ BAEL 91 modifiées 99 ; CBA 93) [21]. Le durcissement du béton étant progressif, f_{cj} est fonction de l'âge du béton.

- Pour $f_{c28} \leq 40$ MPa $\frac{j}{4.76+0.83j} f_{c28}$ avec f_{c28} exprimé en MPa

- Pour $f_{c28} > 40$ MPa $\frac{j}{1.40+0.95j} f_{c28}$ avec f_{c28} exprimé en MPa

Le diagramme contrainte - déformation utilisable pour le calcul aux états limites ultimes du béton comprimé est le suivant :

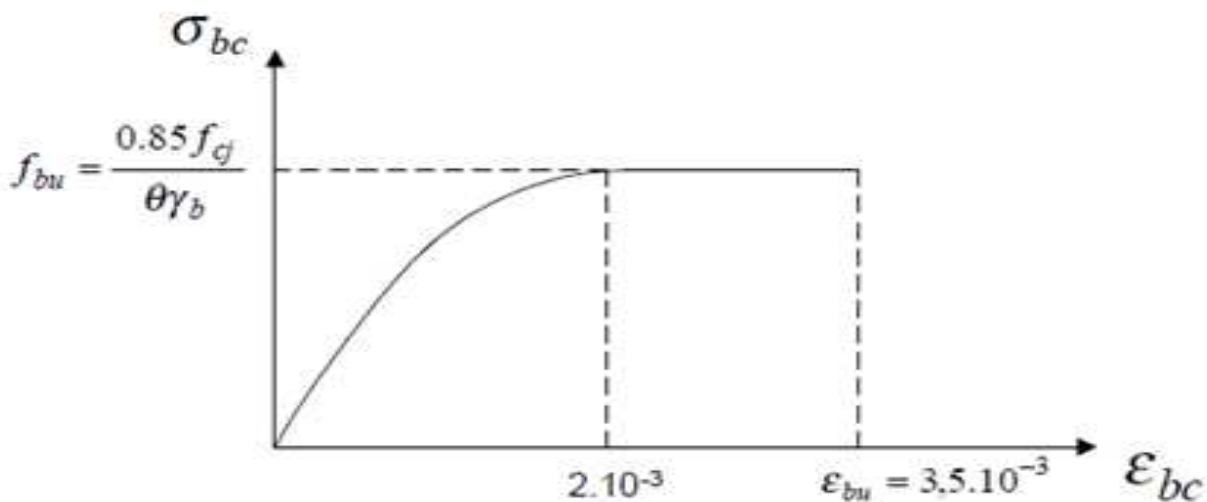


Figure 3-3 : Diagramme contraintes - déformation du Béton à l'ELU. [20]

La contrainte limite du béton à l'ELU f_{bu} , correspond à l'état limite de compression est donné par la formule suivante :

$$-f_{bu} = \frac{0.85 \times f_{C28}}{\theta \gamma_b} \text{ en MPa (Art A. 4. 3, 41/ BAEL 91 modifiées 99 ; CBA 93) [21].}$$

- Le coefficient θ dépend de la durée d'application des charges :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = 1 \dots\dots\dots \text{si } t > 24 \text{ h} \\ \theta = 0.9 \dots\dots\dots \text{si } 1 \text{ h} \leq t \leq 24 \text{ h.} \\ \theta = 0.85 \dots\dots\dots \text{si } t \leq 1 \text{ h} \end{array} \right.$$

- γ_b est le coefficient de sécurité a pour valeurs :

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 1.5 \quad (\text{cas courants}) \\ \gamma_b = 1.15 \quad (\text{combinaisons accidentelles}). \end{array} \right.$$

Dans le domaine des poutres et dalles mixtes du bâtiment, on utilise habituellement un béton de type C20 à C25. Toutefois, selon la situation, il se peut qu'on utilise un béton de moindre (C16 ; C18) ou de meilleure qualité (C30, C40, C50). Le module d'Elasticité du béton E_{ij} est une caractéristique présentant une dispersion non négligeable, qui dépend essentiellement de la résistance à la compression sur éprouvette cylindrique. Les propriétés du béton varient. Cependant au cours du temps. Le fluage et le retrait sont les principaux phénomènes qui influencent le comportement du béton.

A- 2 Résistance Caractéristique en Traction f_{tj} :

La résistance caractéristique à la traction du béton est faible, elle représente 10% de la résistance à la compression noté f_{tj} à « j » jours est définie conventionnellement en fonction de la résistance caractéristique à la compression par la relation suivante extraite de (Art A. 2.1, 12/ BAEL 91 modifiées 99 ; CBA 93) :

$$f_{tj} = 0.6 + 0.06 f_{cj}$$

La formule est valable jusqu'à des valeurs de $f_{cj} < 60$ MPa

Avec

f_{cj} : Résistance caractéristique à la compression à « j » jours exprimée en (MPa).

La Figure 3-4 présente l'évolution de la résistance caractéristique à la traction f_{tj} en fonction de celle à la compression f_{cj} .

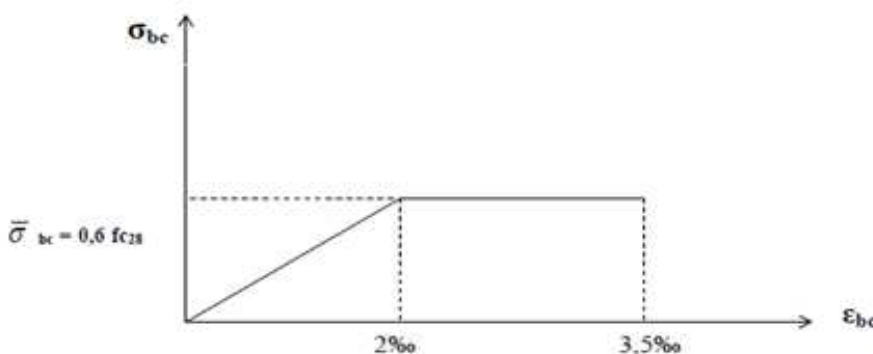


Figure 3-4 : Diagramme contraintes - déformation du Béton à l'ELS [20]

A- 3 Module de déformation longitudinale :

(Appelé aussi le module de Young), On distingue deux modules de déformation instantané E_{ij} et différé E_{vj} . Telle que le module différé est pris égal à trois fois le module instantané.

$$E_{vj} = 3 E_{ij}$$

A- 3- 1 Module de déformation instantané :

Il est utilisé pour le calcul sous chargement inférieur à 24 heures. D'après de (Art A. 2.1, 21/ BAEL 91 modifiées 99 ; CBA 93) le Module de déformation instantané est donnée

par la formule suivante : $E_{ij} = 11\,000 \sqrt[3]{f_{cj}}$ (MPa)

A- 3- 2 Module de déformation différé :

Il est utilisé pour le calcul sous chargement de longue durée (cas courant), sachant que ce module prend en compte *artificiellement* les déformations de fluage du béton. D'après de (Art A. 2.1, 22/ BAEL 91 modifiées 99 ; CBA 93) le Module de déformation différé est

donnée par la formule suivante : $E_{vj} = 3\,700 \sqrt[3]{f_{cj}}$ (MPa).

A- 4 Module de déformation transversale :

D'après de (Art A. 2.1, 3/ BAEL 91 modifiées 99 ; CBA 93) le Module de déformation transversale

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Avec :

E : Module de Young

ν : Coefficient de poisson défini par le rapport entre déformation transversale et déformation

longitudinale $\nu = \frac{\text{déformation transversale}}{\text{déformation longitudinale}}$, il est pris égale à : $\begin{cases} \nu = 0 \text{ à l'ELU} \\ \nu = 0,2 \text{ à l'ELS} \end{cases}$

B- ACIERS :

L'acier est utilisé pour équilibrer les efforts de traction auquel le béton résiste mal. Il existe plusieurs types de classification des aciers, basés soit sur leurs compositions chimiques (aciers alliés, aciers non alliés,...etc.) soit sur leur caractéristiques mécaniques (résistance à la traction, limite d'élasticité). La classification couramment utilisée en construction métallique est *la nuance d'acier* qui est définie par sa limite d'élasticité f_e .

L'Eurocode 4 couvre le calcul des structure mixtes fabriquée à partir des matériaux en aciers relevant des nuances courantes S235 ; S275 ; S355 ; S460 ; définies dans les normes européennes EN 10025 et EN 10113. Le comportement des aciers pour les calculs à l'ELU vérifie une loi de type élasto-plastique parfaite, comme décrit sur le diagramme contrainte-déformation de la figure (3-5).

On notera qu'un seul modèle est utilisé pour décrire le comportement des quatre types d'acier, ce modèle étant fonction de la limite d'élasticité garantie f_e . est donné par la relation suivante extraite de (Art A. 5.5, 32/ BAEL 91 modifiées 99 ; CBA 93) [21] :

$$\sigma_{st} = \frac{f_e}{\gamma_s}$$

Avec - σ_{st} : est la contrainte d'élasticité de l'acier

- γ_s : Coefficient de sécurité

$$\begin{cases} \gamma_s = 1,15 & \text{(En situation courante).} \\ \gamma_s = 1,00 & \text{(En situation accidentelle).} \end{cases}$$

Le module d'élasticité longitudinale de l'Acier est pris égal à $E_s = 200\,000\text{ MPa}$.

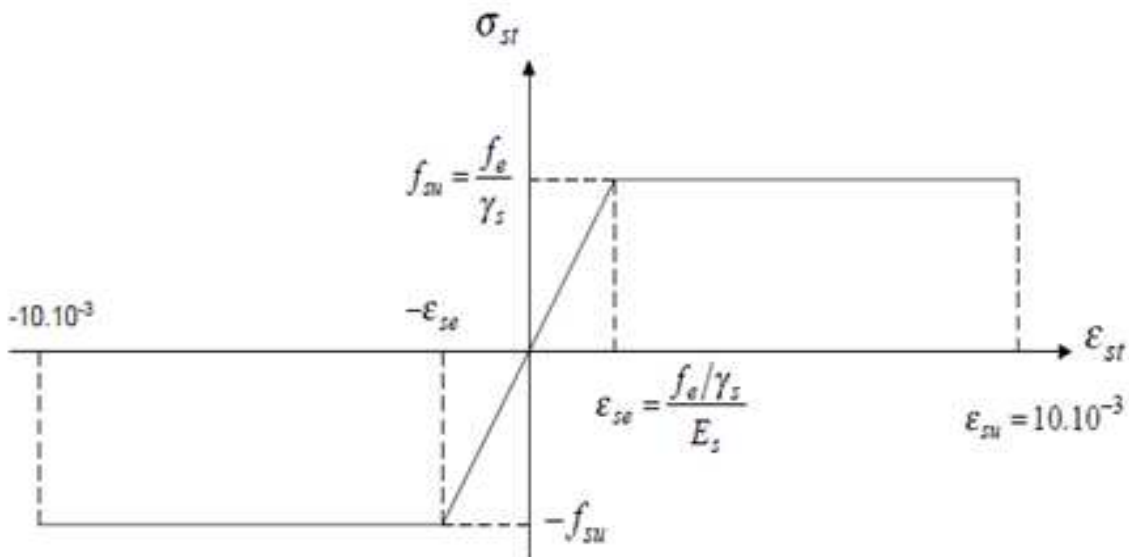


Figure 3-5 : Diagramme contraintes - déformation du Calcul des Aciers. [20]

III- 4 COMPORTEMENT DES MATERIAUX BETON ET ACIERS A TEMPERATURES ELEVEES :

Tous les auteurs s'accordent sur le fait que la résistance caractéristique des matériaux Béton et Acier varient en fonction de l'élévation de la température à laquelle ils sont exposés ou ont été exposés. Des comportements différents (thermique et mécanique) peuvent être observés selon que les essais sont effectués au cours de chauffage ou après refroidissement. Ces propriétés sont présentées dans les paragraphes qui suivent.

A- BETON :

A- 1 Comportement des bétons à haute température :

L'exposition du béton à une température élevée provoque des modifications physicochimiques que subissent ses composants (la matrice cimentaire et les granulats), telles que la déshydratation par séchage du béton et la décarbonatation. Ces phénomènes peuvent produire de retrait et de pertes de résistance et de raideur des matériaux.

Pour comprendre le comportement de ce matériau à haute température, il est nécessaire de connaître les principales modifications physico-chimiques. L'interface pâte-granulats est plus ou moins affectée selon la nature du ciment et des granulats.

A- 1-1 Phénomènes physiques et chimiques dans le béton à haute température :

L'élévation de la température entraîne des phénomènes très complexes dans le béton, dont la prévision s'avère plutôt difficile, notamment à cause de son hétérogénéité et des changements de phases. Ces changements de phases sont dus, en particulier au départ de l'eau chimiquement liée, se traduisant par une augmentation considérable de la porosité du béton qui entraîne alors de forts changements de la microstructure du béton et donc un changement des propriétés mécaniques, thermiques, hydriques du celui-ci

Les principales réactions physico-chimiques dans le béton au cours de son échauffement sont Regroupées dans le Tableau 3-1.

Température dans le béton en [°C]	Réaction du béton.
Entre 30°C et 105°C	L'eau libre et une partie d'eau absorbée la moins liée s'échappent du béton. Elle est complètement éliminée à 105°C.
Entre 130°C et 170°C	Une double réaction endothermique peut avoir lieu correspondant à la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
Autour de 180°C et jusqu'à environ 300°C	On a la première étape de la déshydratation. La chaleur brise le gel de ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton.
A environ 250°C et 370°C	On peut avoir de petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques.
Entre 450°C et 550°C	Il y a décomposition de la portlandite en chaux libre : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
Autour de 575°C	Il y a transformation de structures du quartz α en quartz β , accompagnée d'un gonflement pour les granulats quartziques
Entre 600°C et 700°C	Il y a décomposition des phases de CSH et formation de $\beta\text{-C}_2\text{S}$. C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bi-calciques
Entre 700°C et 900°C	Il y a décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 800°C en $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique
A partir de 1 300°C à 1 400°C	Début de la fusion de la pâte de ciment, et des granulats. Le béton se présente sous forme de masse fondue.

Tableau 3- 1 : Comportement et Réactions du béton à une attaque thermique [23].

A- 1- 2 Influence de la température sur la pâte de ciment :

Les principales modifications physico-chimiques se passent dans la pâte de ciment, en raison de la présence de l'eau sous différentes formes dans la structure.

Dans la pâte de ciment chauffée, tous les changements commencent par l'évaporation de l'eau libre et de l'eau absorbée entre 30°C et 120°C et, au-delà de 105°C, on observe les premiers signes de la décomposition des hydrates selon Hilsdorf [24]. Cependant d'autres travaux, notamment ceux de Harmathy [25], montrent que la déshydratation de la pâte de ciment débute dès l'évacuation de l'eau évaporable.

La pâte de ciment hydratée subit une expansion jusqu'à environ 150°C, puis une contraction due à un fort retrait de dessiccation qui mène à la perte d'eau [26]. Ensuite à partir de 180°C et jusqu'au-delà de 800°C, le gel de CSH se décompose essentiellement en silicate de calcium β -C₂S, β -CS et en eau [27] et la portlandite donne CaO.

A l'aide de la diffraction des rayons X, Piasta et al. [28] ont observé un phénomène d'hydratation additionnelle entre 200°C et 300°C. Cette réaction se traduit par une diminution des phases β -C₂S et β -C₃S ainsi qu'une faible augmentation de la quantité de Ca(OH)₂.

La porosité de la pâte de ciment à haute température augmente d'une manière parabolique en fonction de la température. Cette augmentation est confirmée par les travaux de Bazant et al. [29], elle est accompagnée d'une évolution de la taille moyenne des pores et du volume poreux total. Ceci est dû en partie à la rupture interne de la structure du gel CSH lors du processus de déshydratation.

A- 1 -3 Influence de la température sur les granulats :

Les granulats jouent un rôle important dans le béton car ils en constituent le squelette par lequel sont transmis les efforts. Sous l'effet de la température, les granulats se décomposent et subissent des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques micros structurales du matériau.

Nous distinguerons les granulats siliceux et calcaires car ce sont les plus utilisés dans le domaine de la construction.

Une analyse thermique différentielle (ATD) permet de déterminer, par des pics endothermiques et exothermiques, les températures auxquelles une instabilité peut survenir dans les granulats. Les analyses thermogravimétriques (ATG) donnent des indicateurs de la progression des réactions de décomposition en mesurant les variations de masse des granulats au cours du chauffage.

Comme le montre la figure (3-6) La majorité des granulats est généralement stable jusqu'à 600°C. La structure des granulats siliceux contient dans ces minéraux environ 20 % d'eau combinée. Entre 120°C et 600°C, cette eau est capable de se libérer partiellement en réduisant la résistance de ce matériau. Ce départ d'eau peut entraîner un clivage des granulats.

Un autre phénomène concernant le quartz à 575°C : un changement de phase avec un changement de volume de 1 à 5,7% le quartz présent dans ces granulats siliceux SiO₄ est sous

forme d'un édifice tétraèdres soudés par les sommets en chaînes. C'est une forme stable à basse température de silice. Au-dessus de 575°C, subit une légère rotation des liaisons pour former une structure cristalline de symétrie hexagonale, Cette variation de structure chimique du quartz dans les granulats peut provoquer un endommagement dans le béton.

Pour les granulats calcaires, le phénomène observé est différent. Les granulats calcaires ont un comportement thermique stable jusqu'à 700°C.

Au-delà de cette température, on assiste à la décarbonatation ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). En phase de refroidissement, la chaux libre (CaO) formée lors de la réaction de décarbonatation, se combine avec l'humidité atmosphérique pour former la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec une augmentation de volume de 44%. [30] [31] La formation de cette nouvelle Portlandite entraîne un accroissement de fissure dans le béton, qui est sans doute à l'origine de la diminution des résistances mécaniques résiduelles (résistance mesurer après refroidissement) par rapport à la résistance à chaud des bétons à granulats calcaires chauffés au-delà de 700°C.

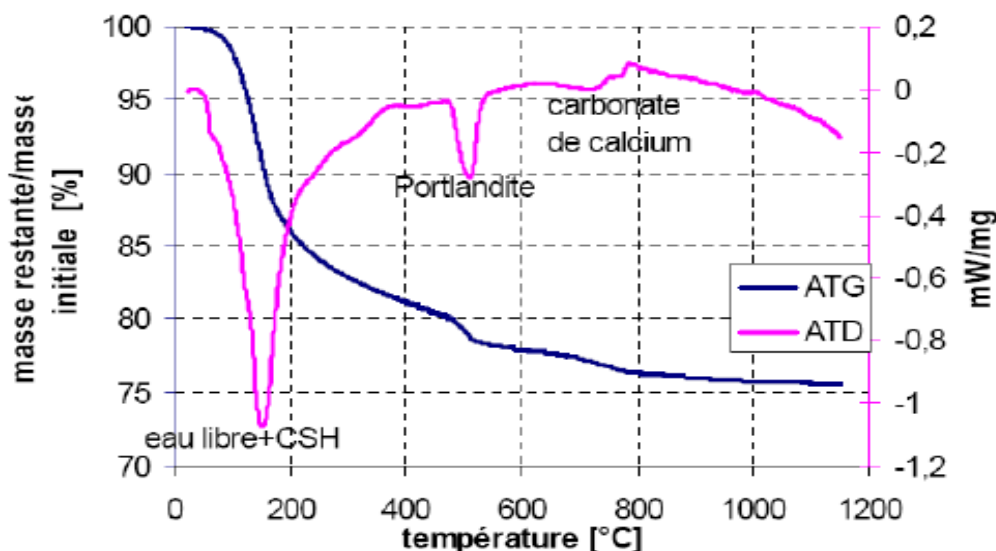


Figure 3-6 : Evolution de la masse de la pâte de ciment (courbes ATG / ATD) montrant les zones principales de déshydratation. [32]

A- 1 -4 Influence de la température sur la microstructure du béton Interface (pâte - granulats) :

Dans les bétons ordinaires, l'interface pâte-granulats, appelée aussi « l'auréole de transition », est la partie la plus fragile, la plus poreuse et mieux cristallisée que la matrice cimentaire. A haute température, cette partie se dégrade progressivement. Ceci est dû au départ de l'eau (libre, liée chimiquement) contenue dans les pores et dans les hydrates. Le retrait de dessiccation favorise le développement des fissures et au-delà de 120°C, les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide au niveau de cette zone à cause de la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats

(expansion). Ce phénomène est d'autant plus accentué que l'humidité du béton est élevée et que l'échauffement est rapide. Des fragments de béton peuvent alors être projetés de la surface de l'élément avec plus ou moins de violence (éclatement et écaillage du béton).

Plus le matériau est hétérogène plus la différence entre les coefficients de dilatation thermique des constituants est importante. Ces coefficients varient en fonction de la température, et dépendent du type (nature) des granulats et de ciment utilisée.

A- 2 PHENOMENES D'ECLATEMENTS ET D'ECAILLAGE DU BETON :

Le matériau béton offre une bonne résistance au feu car il est incombustible. Mais les accidents survenus dans les tunnels ces dernières années ont montré une certaine sensibilité à l'écaillage [33] et à l'éclatement des bétons. Le phénomène est plus marqué pour les bétons à hautes performances. En effet, leur microstructure plus dense réduit la migration de l'eau et de la vapeur d'eau et engendre donc l'apparition des problèmes d'instabilité.



a) Tunnel sous la Manche : fort écaillage du béton.



b) Mont Blanc : éclatement du béton.

Figure 3-7 : Dommage du béton après un incendie.

Dans un incendie typique, la température atteinte est d'environ 500°C en 10 minutes, et 950°C en 1 heure. A une telle température, seulement les couches superficielles du béton deviennent rigoureusement chaudes, alors que le cœur du béton demeure froid et il en résulte alors les phénomènes l'écaillage et à l'éclatement, qui sont bien définie dans les paragraphes qui suivent :

❖ L'écaillage :

L'écaillage consiste en un détachement progressif (figure 3-8) et continu de très petits morceaux de béton qui sont expulsés avec force du parement exposé au feu. Ces morceaux ont la particularité d'être de très faible épaisseur (quelques millimètres) et très

aplatis (leurs dimensions perpendiculaires à l'épaisseur sont de l'ordre de quelques centimètres). Ces morceaux sont très nombreux et sont assimilables à des copeaux minces qui se détachent successivement en grand nombre et sur des surfaces très étendues en proportion de leur taille. La manifestation de ce phénomène peut commencer dès les premières minutes de l'incendie. Elle dépend de caractéristiques telles que la composition du béton et ses propriétés associées, sa teneur en eau et sa géométrie. Dans certains cas, elle se poursuit continuellement tant que l'incendie n'est pas maîtrisé, à une vitesse qui semble quasi constante. L'épaisseur de la pièce diminue donc progressivement et de façon quasi proportionnelle au temps. La présence d'une cage d'armature ne modifie pas significativement le phénomène sauf si les barres d'acier sont d'un diamètre tel qu'elles constituent un obstacle physique à l'expulsion du béton qu'elles masquent. Elles permettent alors de limiter le phénomène aux zones masquées par les barres. En revanche, les aciers de petit diamètre ne permettent pas d'escompter l'effet de ralentissement significatif de l'enlèvement progressif de matière. C'est la forme la plus dangereuse de délitescence.



Figure 3-8 : l'écaillage lors de l'incendie du tunnel de MONT BLANC

❖ **L'éclatement :**

L'éclatement désigne le mécanisme par lequel les parements en béton perdent une partie de leur béton de surface. Il s'agit de morceaux de béton qui se détachent au cours de l'agression par le feu, souvent dans les zones les plus chauffées et les moins confinées, tels que, par exemple, les angles inférieurs de la retombée rectangulaire d'une poutre de plancher: on constate alors que des morceaux significatifs de section triangulaire se détachent mettant à nu l'armature latérale du premier lit d'acier (figure 3-9). Ces morceaux sont assez gros et peu nombreux. Ils résultent du détachement de la zone d'enrobage non armée située dans l'angle de section. Les morceaux détachés ne proviennent jamais du volume intérieur à la cage d'armature. Ils sont d'autant plus gros que l'enrobage des aciers est important

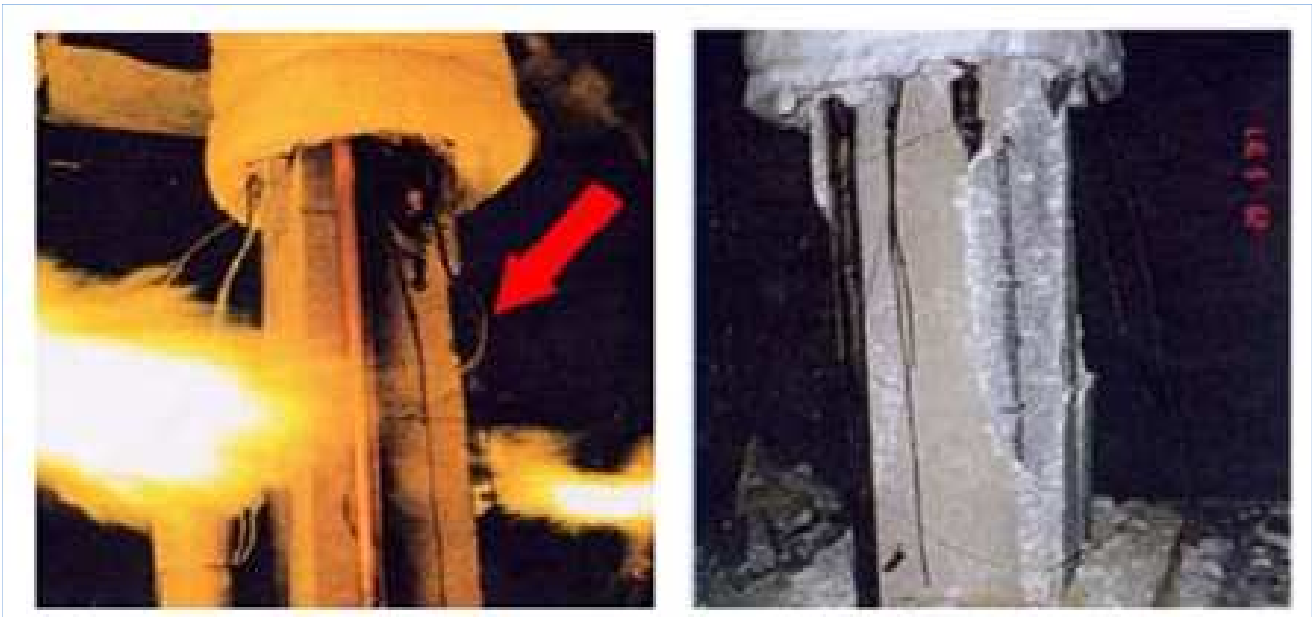


Figure 3-9 : Eclatement d'un poteau durant un essai au feu.

A- 2-1- Mécanisme d'éclatement et d'écaillage du béton :

Le comportement au feu des éléments de structure en béton est caractérisé par un risque d'éclatement et d'écaillage. Les premières mentions concernant cette dégradation datent des années soixante. Les observations du comportement des bétons à haute température menées par Harmathy, 1964 [34] ont montré que les matériaux chauffés pouvaient présenter, dans certains cas, un comportement explosif. Deux principales raisons de l'éclatement ont été attribuées. Premièrement aux effets du gradient thermique et la formation de pressions de vapeur d'eau dans le matériau. Il faut noter que ces observations et la théorie développée par Harmathy, 1964[34] concernent les bétons ordinaires. Ce n'est que ces dernières années que Hertz [35], en étudiant les propriétés de bétons à haute performance (120 MPa et 170 MPa) soumis aux températures élevées, a observé une forte sensibilité de ces bétons à l'éclatement. L'éclatement des bétons entre 300°C et 350°C a été observé et attribué aux pressions de vapeur d'eau dans ces bétons denses, de porosité limitée.

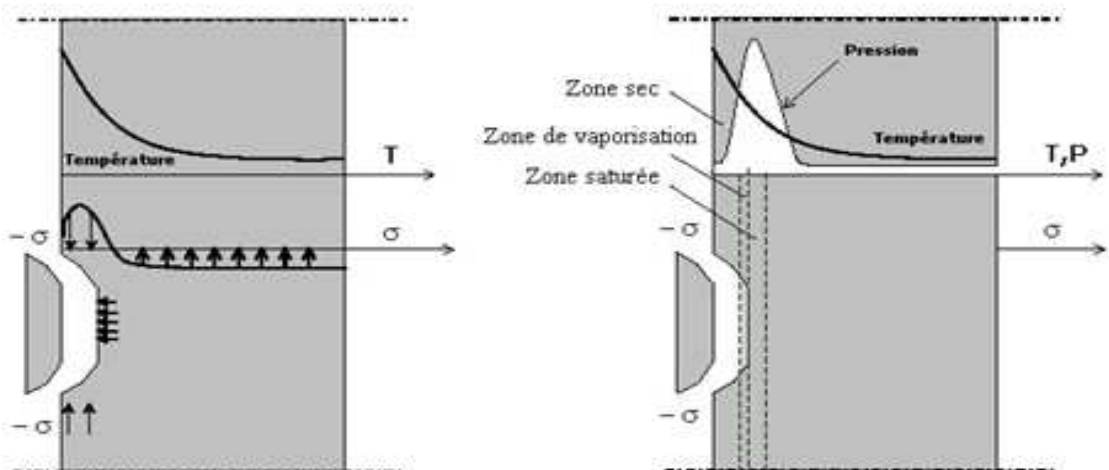
A- 2-1-1 Écaillage par pressions internes et contraintes thermomécaniques :

L'hypothèse d'un écaillage résultant de la pression proche de la surface chauffée est sans doute due à deux phénomènes, Comme décrite par Anderberg [36]: D'une part, l'échauffement du béton est souvent accompagné d'un gradient thermique élevé, ce qui entraîne des déformations différentes entre la surface et le cœur de l'échantillon. Ces déformations induisent des contraintes thermiques très élevées. D'autre part, lorsque la température augmente, l'eau qui se trouve dans le matériau que ce soit sous forme libre ou liée s'évapore. Une partie de cette eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et une autre partie migre vers l'intérieur, où la température est encore faible et se condense. Elle forme ainsi une zone quasi-saturée qui joue le rôle d'une tranche étanche à la vapeur d'eau et c'est à

proximité de cet endroit que la pression dans les pores atteint son maximum. Ce pic peut atteindre des valeurs très importantes et induit des contraintes hydriques importantes.

A- 2-1-2 Écaillage par dilatation thermique empêchée :

L'hypothèse d'un écaillage résultant de la dilatation thermique empêchée est soutenue par BAZANT [27] et Ulm [28]. Ils considèrent que la destruction du matériau est due à des contraintes internes de compression dans la direction parallèles à la surface chauffée (Figure 3-10). Selon Bazant, c'est cette compression qui provoque la fissuration, tandis que les pressions internes dans la structure ne jouent qu'un rôle secondaire en influençant



a) Dilatation thermique empêchée d'après BAZANT [27].

b) Pression internes Anderberg [36]

Figure 3-10: Principales raisons d'apparition de l'écaillage.

A - 3- PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES :

A -3-1 Dilatation thermique :

La déformation thermique $\epsilon_c(\theta)$ ou bien la dilatation thermique $(\Delta l / l)_c$ du béton en fonction de la température est illustrée à (la figure 3-11). D'après l'Eurocode 2[38] la dilatation thermique du béton se détermine à partir des expressions suivantes et par référence à la longueur à 20°C :

Granulats siliceux :

$$(\Delta l / l)_c = - 1,8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \theta + 2,3 \times 10^{-11} \theta^3 \quad \text{pour } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 700^\circ\text{C}$$

$$(\Delta l / l)_c = 14 \times 10^{-3} \quad \text{pour } 700^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$$

Granulats calcaires :

$$(\Delta l / l)_c = -1,2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6} \theta + 1,4 \times 10^{-11} \theta^3 \quad \text{pour } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 805^\circ\text{C}$$

$$(\Delta l / l)_c = 12 \times 10^{-3} \quad \text{pour } 805^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$$

Où :

θ_c est la température du béton en °C

l_c est la longueur à la température normale (20°C) de la pièce

Δl_c est l'allongement provoquée par la température en °C

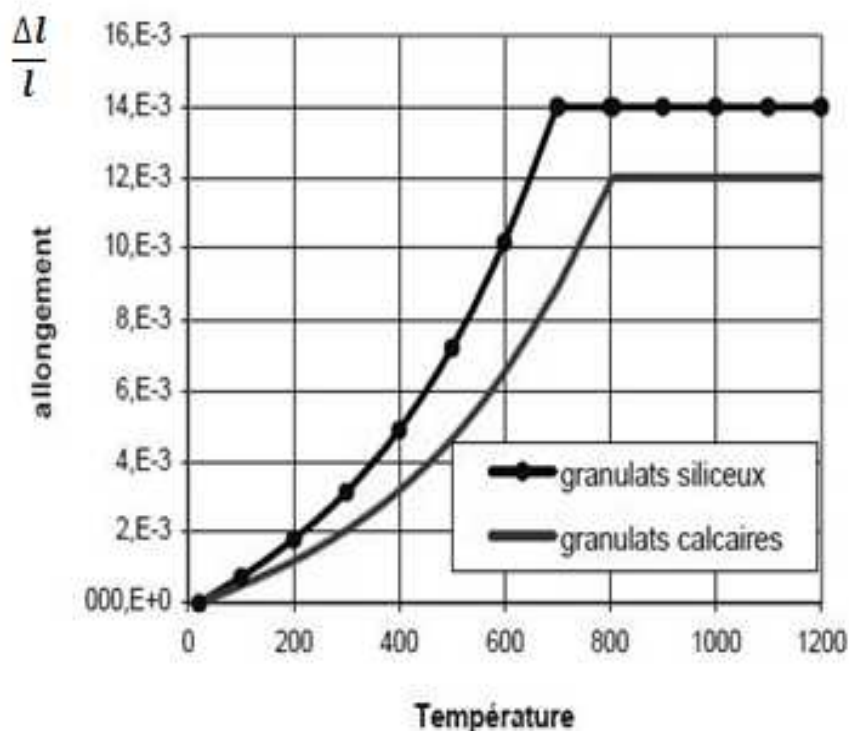


Figure 3-11: Dilatation du béton en fonction de la température. [38]

La dilatation du béton à granulats calcaires augmente lentement avec l'évolution de la température jusqu'à atteindre 800 C° où la dilatation devient constante malgré l'augmentation de température. De la même façon pour le béton siliceux mais avec plus d'allongement qui atteint 14×10^{-3} à 700 C° puis devient constant.

A -3-2 Chaleur spécifique :

La chaleur spécifique est la quantité d'énergie nécessaire pour faire monter de 1°K la température d'un Kilogramme de matériau (béton).

La variation de la chaleur spécifique $C_p(\theta)$ du béton en fonction de la température et de la teneur en eau est illustrée à la figure (3-12). D'après l'Eurocode 2 [38] la chaleur spécifique

$C_p(\theta)$ du béton sec (pour une teneur en eau, $u = 0\%$) peut être déterminée à partir des relations suivantes :

Granulats siliceux et calcaires :

$C_p(\theta) = 900 \text{ (J/kg K)}$	pour $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$
$C_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \text{ (J/kg K)}$	pour $100^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C}$
$C_p(\theta) = 1000 + \frac{(\theta - 200)}{2} \text{ (J/kg K)}$	pour $200^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400^\circ\text{C}$
$C_p(\theta) = 1100 \text{ (J/kg K)}$	pour $400^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$

Où :

θ est la température du béton en ($^\circ\text{C}$),

$C_p(\theta)$ en (J/kg K) pour trois teneurs en eau, u , différentes : 0%, 1,5% et 3% du poids du béton
Lorsque la teneur en eau n'est pas prise en compte dans la méthode de calcul, la fonction adoptée pour la chaleur spécifique du béton de granulats siliceux ou calcaires peut être modélisée par une valeur constante, $C_{p,peak}$, située entre 100°C et 115°C et un décroissant linéaire entre 115°C et 200°C :

$C_{p,peak} = 900 \text{ (J/kg K)}$	pour une teneur en eau de 0 % du poids du béton
$C_{p,peak} = 1470 \text{ (J/kg K)}$	pour une teneur en eau de 1,5 % du poids du béton
$C_{p,peak} = 2020 \text{ (J/kg K)}$	pour une teneur en eau de 3,0 % du poids du béton

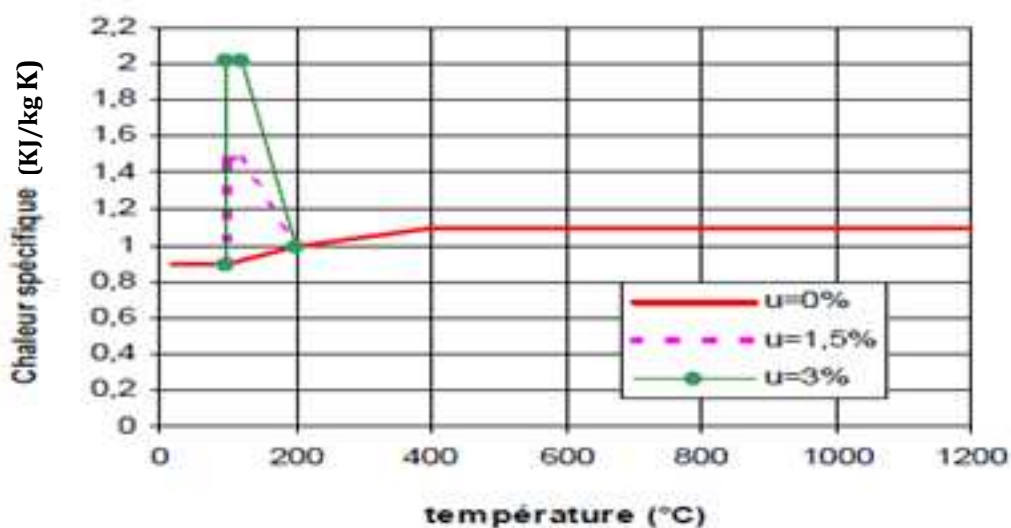


Figure 3-12: Chaleur spécifique du béton, $C_p(\theta)$ en fonction de la température pour Trois teneurs en eau. [15]

Le pic observé entre 100 et 200 $^\circ\text{C}$ correspond à la chaleur nécessaire pour évaporer l'eau contenue dans le béton.

A-3-3 Masse volumique :

Pour les modèles de réponse thermique, la valeur $\rho = 2\,300 \text{ kg/m}^3$ peut être utilisée pour les bétons de densité normale (siliceux ou calcaires), La variation de la masse volumique

selon la température est influencée par la perte en eau. D'après l'Eurocode 2 [38] la masse volumique est définie comme suit:

$$\begin{aligned} \rho(\theta) &= 2300 \dots (20^\circ\text{C}) && \text{pour } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 115^\circ\text{C} \\ \rho(\theta) &= 2300 \times \left(1 - 0,02 \times \frac{(\theta-115)}{85}\right) && \text{pour } 115^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C} \\ \rho(\theta) &= 2300 \times \left(0,98 - 0,03 \times \frac{(\theta-200)}{200}\right) && \text{pour } 200^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400^\circ\text{C} \\ \rho(\theta) &= 2300 \times \left(0,95 - 0,07 \times \frac{(\theta-400)}{800}\right) && \text{pour } 400^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned}$$

L'évolution de la masse volumique du béton en fonction de la température, donnée par l'Eurocode 2, est représentée sur la figure (3-13)

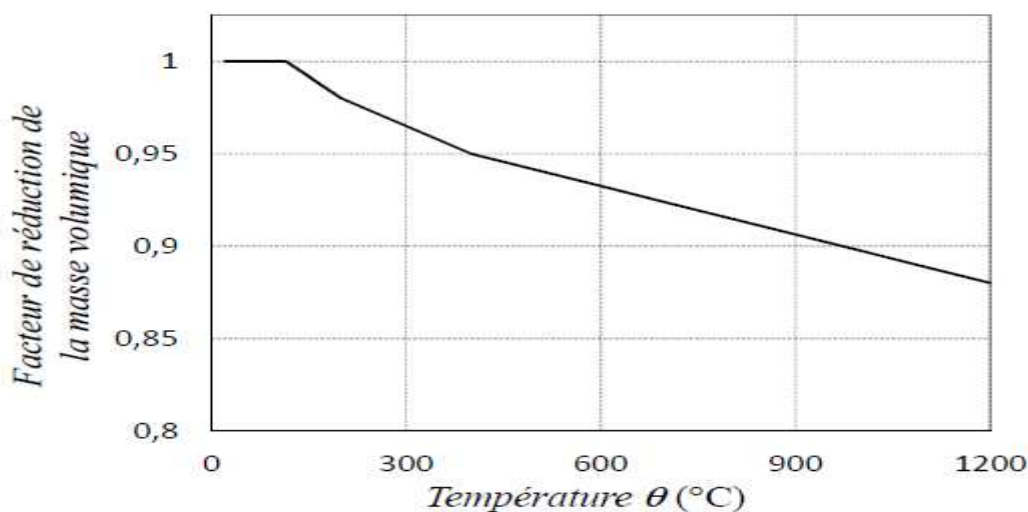


Figure 3-13: Évolution de la masse volumique du béton en fonction de la température

A -3-4 Conductivité thermique :

La conductivité thermique est l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Elle dépend pour le béton de nombreux paramètres : la porosité, la teneur en eau, la température, le degré d'hydratation et le type de granulats. Cette propriété diminue d'une manière générale lorsque la température augmente. La variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique λ_c du béton, en fonction de la température, est illustrée à la figure (3-13). La conductivité thermique λ_c du béton peut être déterminée entre les valeurs limites inférieures et supérieures.

- La limite supérieure de la conductivité thermique λ_c du béton de densité normale peut être déterminée à partir de :

$$\lambda_c = 2 - 0,245 \left[\frac{\theta}{100}\right] + 0,0107 \left[\frac{\theta}{100}\right]^2 \quad (\text{W/m K}) \quad \text{Pour } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}.$$

- La limite inférieure de la conductivité thermique λ_c du béton de densité normale peut être déterminée à partir de :

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 \left[\frac{\theta}{100} \right] + 0,0057 \left[\frac{\theta}{100} \right]^2 \quad (\text{W/m K}) \quad \text{pour } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}.$$

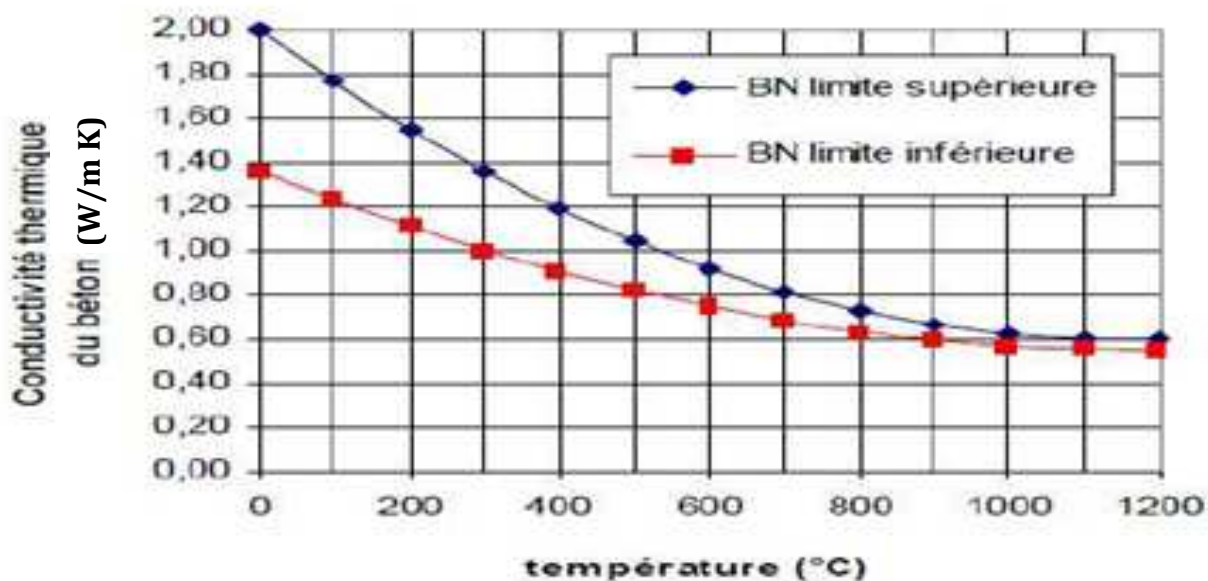


Figure 3-14: Variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique pour les bétons normaux (BN) en fonction de la température [38]

La limite inférieure de la conductivité thermique a été obtenue à partir de la comparaison avec des températures mesurées dans des essais au feu de différents types de structures en béton. Elle donne des températures plus réalistes pour les structures en béton, que la limite supérieure qui a été obtenue à partir d'essais sur des structures composites en acier/béton. Les courbes de conductivité thermique font apparaître à 20 °C une conductivité thermique des bétons de calcaire inférieure d'environ 20 % à celle des bétons de silice.

A - 4 PROPRIETES THERMO- MECANQUES DU BETON :

Les propriétés de résistance et de déformation données dans l'Eurocode 4 [39] sont fondées sur des essais en régime permanent ainsi que sur des régimes transitoires et parfois sur une combinaison de ceux-ci.

Les propriétés de déformation du béton sous contrainte uniaxiale à températures élevées sont obtenues à partir de la relation contrainte-déformation, illustrée par la figure suivante. On précise que dans la mesure où les effets du fluage ne sont pas explicitement pris en compte, les modèles de comportement des matériaux dans l'Eurocode 4 sont présentés dans (figure 3-15). où est présentée la partie croissante et la partie décroissante des contraintes dans le béton.

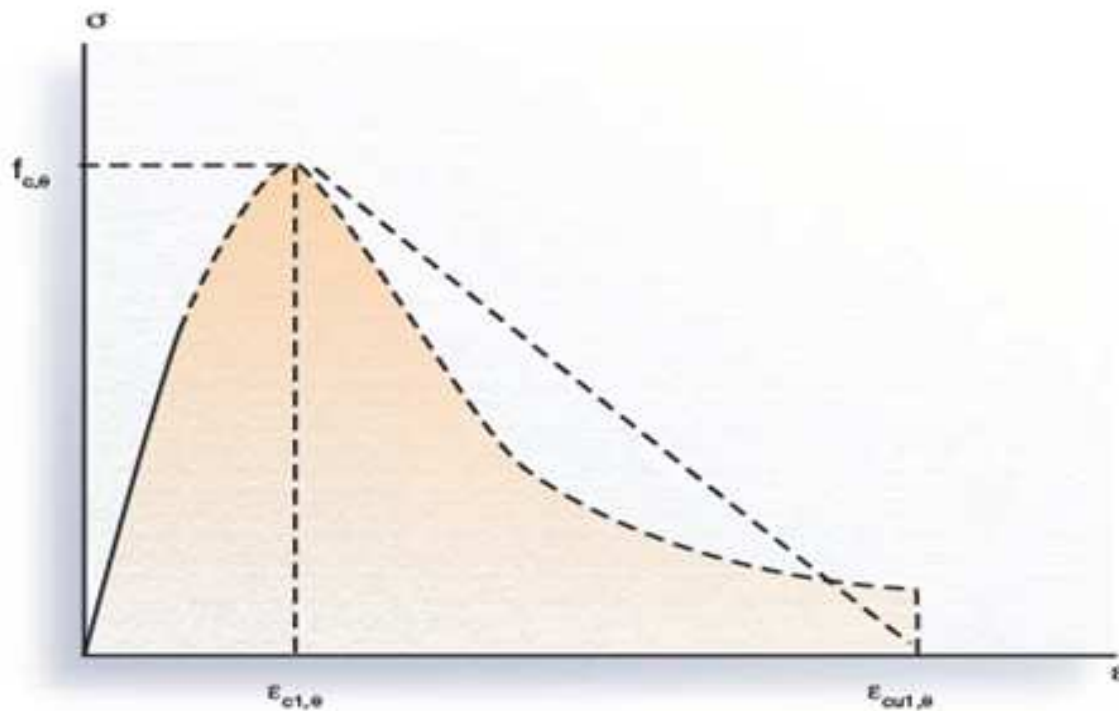


Figure 3-15 : Modèle mathématique expriment la relation contrainte-déformation du béton en compression aux températures élevées.

Intervalle	Contrainte $\sigma(\theta)$
$\epsilon_c \leq \epsilon_{c1,\theta}$	$\frac{3 \epsilon_c F_{c,\theta}}{\epsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}$
$\epsilon_{c1,\theta} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu1,\theta}$	<p>Pour des questions d'ordre numérique, il convient d'adopter une partie descendante.</p> <p>Les modèles linéaires ou non linéaires sont admis.</p>

Tableau 3 -2 : Relation entre les différents paramètres du modèle de la figure (3-15) [39]

La relation contrainte-déformation est définie par deux paramètres :

- ★ la résistance à la compression, $f_{c,\theta}$,
- ★ la déformation $\epsilon_{cu1,\theta}$ correspondant à $f_{c,\theta}$

Les valeurs de chacun de ces paramètres sont données dans le tableau (3-3) en fonction des températures du béton.

Pour les valeurs de température intermédiaires, une interpolation linéaire peut être utilisée. Les paramètres spécifiés dans le tableau suivant, Peuvent être utilisés pour du béton de densité normale réalisé avec des granulats calcaires (sont considérés comme granulats calcaires ceux contenant au moins 80% en masse de granulats calcaires).

Les valeurs de $\varepsilon_{cu1,\theta}$ qui définissent la borne de la partie descendante de la courbe peuvent être obtenues à partir de la colonne 4. du Tableau (3 -3) . Pour un béton de densité normale réalisé avec des granulats siliceux et à partir de la colonne 7 pour un béton de densité normale réalisée avec des granulats calcaires.

L'effet de l'élévation de la température induit une diminution sensible de la résistance mécanique du matériau, telle que la réduction de la résistance caractéristique à la compression du béton est définie en fonction de la température θ par le facteur $K_c(\theta)$ comme suit :

$$f_{c,\theta} = K_c(\theta) \times f_{ck,(20^\circ\text{C})} \quad \text{ou bien :} \quad K_c(\theta) = f_{c,\theta} / f_{ck,(20^\circ\text{C})}$$

En l'absence d'informations plus précises, les valeurs ci-après du facteur $K_c(\theta)$, applicables aux bétons de granulats siliceux et calcaires sont déterminé à partir des relations suivantes :

$$K_c(\theta) = 1,0 \quad \text{pour } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 100^\circ\text{C}$$

$$K_c(\theta) = (1\,600 - \theta) / 1\,500 \quad \text{pour } 100^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 400^\circ\text{C}$$

$$K_c(\theta) = (900 - \theta) / 625 \quad \text{pour } 400^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 900^\circ\text{C}$$

$$K_c(\theta) = 0 \quad \text{pour } 900^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1\,200^\circ\text{C}.$$

Le graphique ci-contre (fig. 3-15) montre l'évolution de la résistance du béton en fonction de la température et du type de granulats utilisés

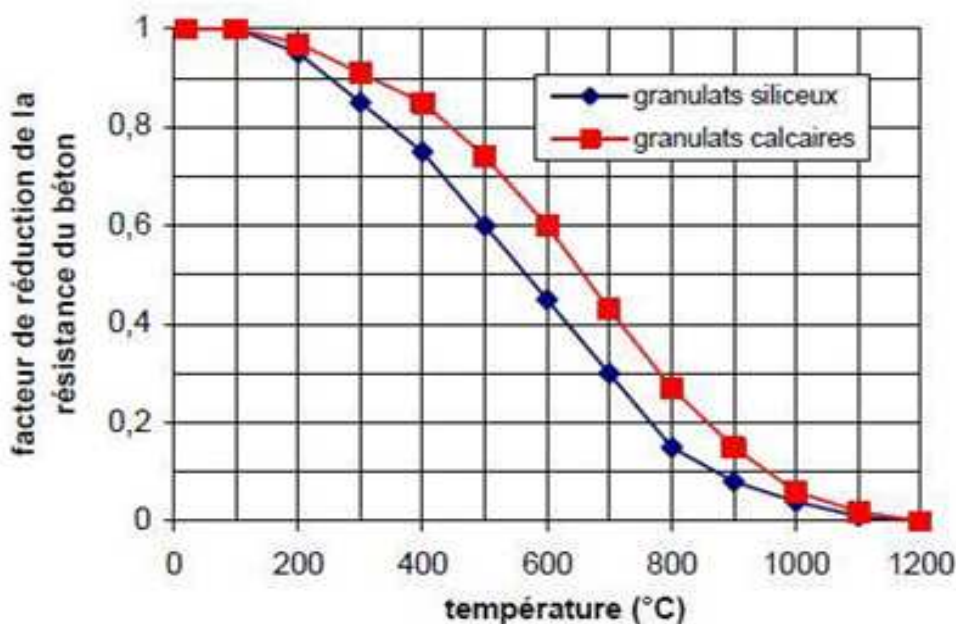


Figure 3-16 : Facteur de réduction $K_{c,\theta}$ applicable pour la démunissions de la résistance caractéristique à la compression du béton à température élève [15]

La figure (3-16) montre que le facteur de réduction de la résistance caractéristique du béton siliceux est faible par rapport à celui du béton calcaire. Et cela signifie que la résistance du béton siliceux est inférieure à celle du béton calcaire, et de même à une faible conductivité thermique des granulats.

Notons que la contrainte limite de ce type de béton (béton siliceux) est réduite de 50% à une température de 600°C.

Le tableau (3- 3) donne, en fonction de la température du béton θ_c , les facteurs de réduction $k_{c,\theta}$ à appliquer, à $f_{ck,20^\circ C}$ pour déterminer $f_{c,\theta}$ et la déformation $\epsilon_{cu,\theta}$.

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

Températures du béton θ_c [°C]	Facteur de réduction pour la relation contrainte- déformation du béton $K_{c,\theta}$ à la température θ_c .					
	Granulats Siliceux			Granulats calcaires		
	$K_{c,\theta} = f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$	$K_{c,\theta} = f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
1	2	3	4	5	6	7
20°C	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100°C	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200°C	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300°C	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400°C	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500°C	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600°C	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700°C	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800°C	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900°C	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1 000°C	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1 100°C	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1 200°C	0,00	-	-	0,00	-	-

Pour des valeurs intermédiaires de température du béton θ_c , une interpolation peut être utilisée.

Tableau 3- 3 : Variation en fonction de la température les paramètres $K_{c,\theta}$ et $\epsilon_{c1,\theta}$ et $\epsilon_{cu1,\theta}$ pour béton [39]

Pour obtenir les évolutions des propriétés mécaniques du béton à haute température on se réfère essentiellement aux courbes contraintes-déformations.

Une représentation graphique des relations contraintes- déformations obtenue en compression uniaxiale à différentes températures [20°C ; 100°C ; 300°C ; 500°C ; 700°C], sans écrouissages, est donnée à la figure (3-16) suivante.

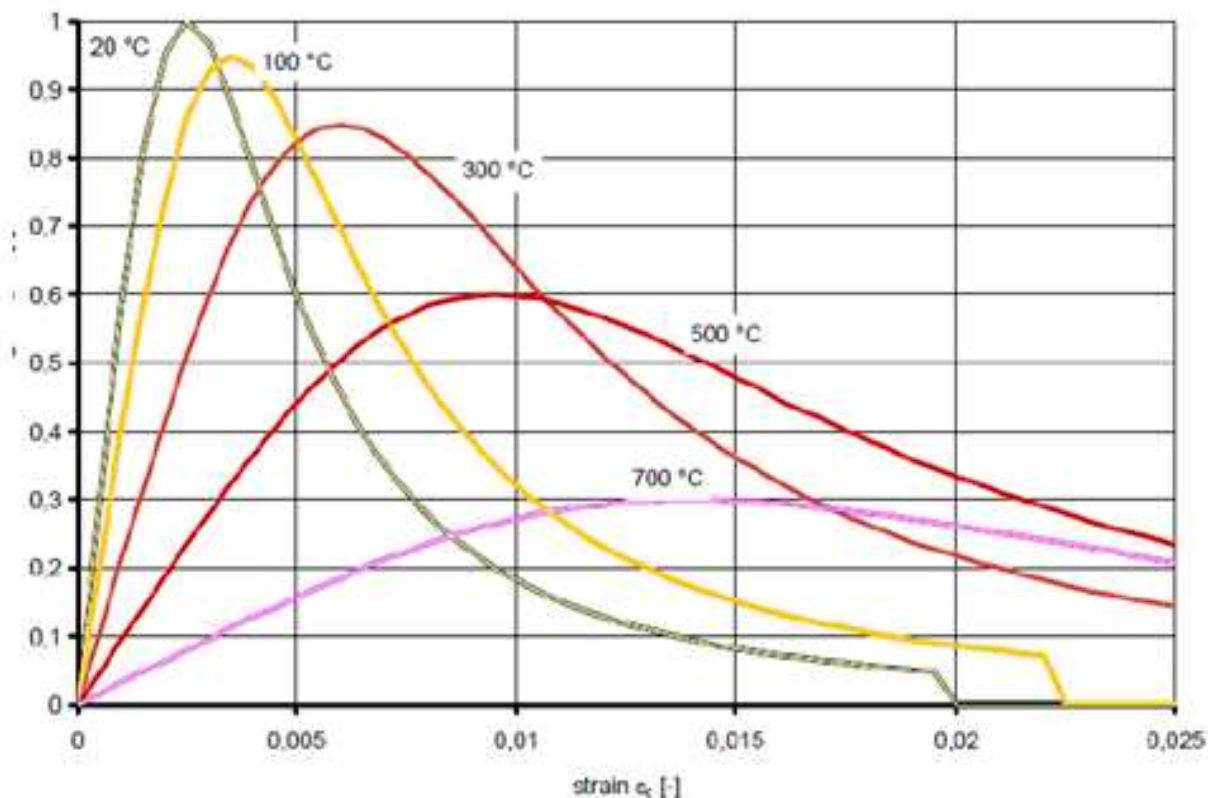


Figure 3-17 : Représentation graphique des relations contrainte-déformation du béton siliceux, sous compression uniaxiale à des températures élevées différents, avec une branche descendante linéaire. [40]

B- ACIER :

B- 1- LES PHENOMENES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DANS L'ACIER :

L'influence de la température peut provoquer la transformation totale d'un élément solide (le cas de l'acier) à un fluide ce qui entraîne le changement des caractéristiques du solide, les auteurs (B. Barthélémy, J. Kruppa) dans leur ouvrage [41] ont expliqué ce phénomène par : Tout corps solide est le siège d'une agitation moléculaire constante due à l'oscillation des atomes autour de leur position d'équilibre. Toute élévation de température entraîne une augmentation de la fréquence et de l'amplitude de ces mouvements. C'est le phénomène d'agitation thermique. Par ailleurs, l'échauffement entraîne une diffusion des atomes de carbone, qui entraîne une transformation du réseau cristallin. Aux environs de

1500°C, l'acier n'est plus qu'une solution liquide de carbone dans le fer. Ces transformations, structurelles entraînent bien entendu des modifications des propriétés des aciers.

B -2 PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES :

B -2-1 Dilatation thermique de l'acier :

La variation de la dilatation thermique en fonction de la température est illustrée à la figure (3-18). Dans le modèle de calcul simplifié, la relation entre la dilatation thermique relative et la température de l'acier peut être considérée comme constante. Dans ce cas la dilatation relative peut être déterminée par les relations suivantes selon les règles de l'Eurocode 3 [42]

$$(\Delta l / l)_s = - 2,416 \times 10^{-4} + 1,2 \times 10^{-5} \theta_s + 0,4 \times 10^{-8} \theta_s^2 \quad \text{pour } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$(\Delta l / l)_s = 1,1 \times 10^{-3} \quad \text{pour } 750 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 860 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$(\Delta l / l)_s = - 6,2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} \theta_s \quad \text{pour } 860 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$$

Ou :

l_s est la longueur a 20°C,

$(\Delta l)_s$ est la dilatation de l'acier due à la température

θ_s est la température de l'acier(C°)

Nous constatons une diminution de la conductivité thermique en fonction de l'évolution de la température jusqu'aux valeurs entre 700 C° et 900 °C où elle présente un pallier.

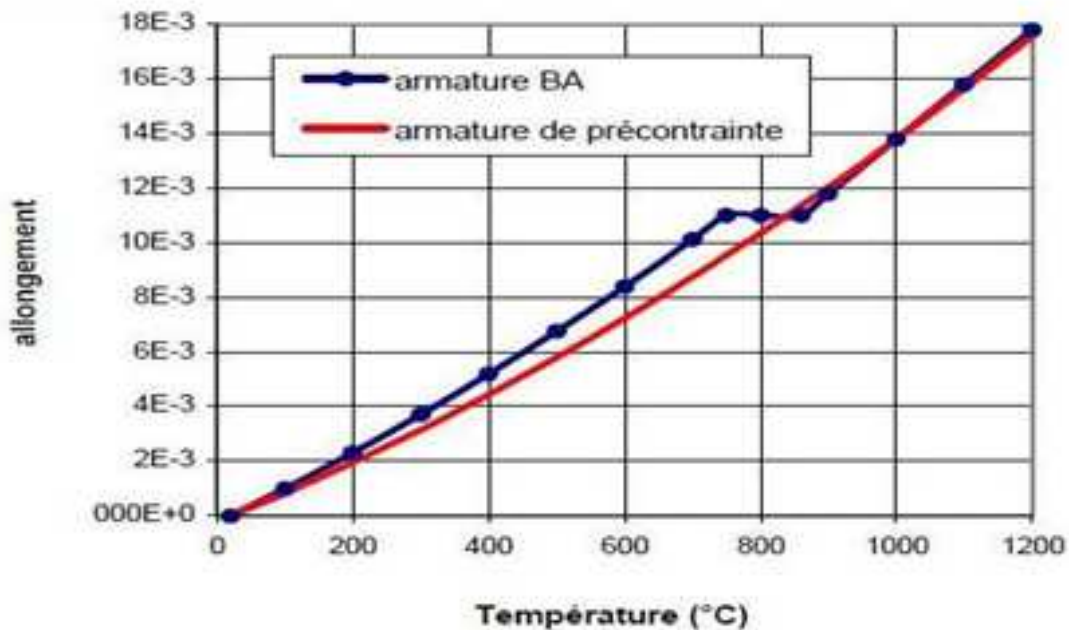


Figure 3-18 : Dilatation thermique de l'acier [42]

B -2-2 Chaleur spécifique de l'acier

La chaleur spécifique de l'Acier C_a est la quantité d'énergie nécessaire pour faire monter de 1°K la température d'un Kg de matériau (acier). Il est exprimé en (J/ kg K), valable pour toutes les nuances d'aciers de construction et d'armature, et peut être déterminé par les formules suivantes :

- pour $20\text{ °C} \leq \theta \leq 600\text{ °C}$

$$C_a = 425 + 7,37 \times 10^{-1} \theta_s - 1,96 \times 10^{-3} \theta_s^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_s^3 \quad (\text{J/ kg K}),$$

- pour $600\text{ °C} \leq \theta \leq 735\text{ °C}$

$$C_a = 666 - \frac{13002}{\theta_s - 738} \quad (\text{J/ kg K}),$$

- Pour $735\text{ °C} \leq \theta \leq 900\text{ °C}$

$$C_a = 545 + \frac{17820}{\theta_s - 731} \quad (\text{J/ kg K}),$$

- Pour $900\text{ °C} \leq \theta \leq 1\ 200\text{ °C}$

$$C_a = 650 \quad (\text{J/ kg K}),$$

Où : θ_s est la température de l'acier en °C.

Dans les modèles de calcul simplifiés, la chaleur spécifique peut être considérée comme indépendante de la température de l'acier. Dans ce cas, on prend la valeur moyenne suivante : $C_a = 600$ (J/ kg K),

La chaleur spécifique de l'acier (en J/kg K) varie avec la température. La courbe donnant sa variation est représentée à la (figure 3-19). Nous pouvons noter que la courbe donnée par l'Eurocode 3 [27] présente un pic autour de 735 °C, dont le sommet est environ de 5000 J /kg K. Ce pic tient compte du caractère endothermique du changement de phase qui a lieu vers cette température

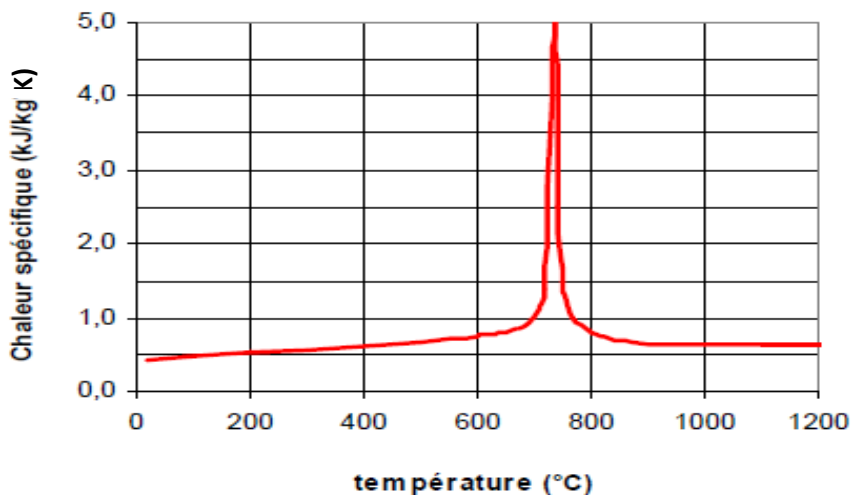


Figure 3-19: Chaleur spécifique de l'acier en fonction de la température [42]

B -2- 3 Masse volumique :

Selon les règles de Eurocode 3 partie 1-2 [42]. La masse volumique de l'acier ρ_s doit être considérée comme indépendante de la température, sa valeur est égale à :

$$\rho_s = 7850 \text{ Kg/ m}^3.$$

B -2- 4 Conductivité thermique de l'acier

La variation de la conductivité thermique λ_s de l'acier en fonction de la température est illustrée à la figure (3-20) :

La conductivité thermique de l'acier λ_s , valable pour toutes les nuances d'acier (de construction et d'armature), peut être déterminée par la formule donnée ci-dessous extrait de l'Eurocode 3 .

$$\lambda_s = 54.333 \cdot 10^{-2} \theta \quad (\text{W/m K})$$

$$\text{Pour } 20 \text{ C}^\circ \leq \theta_s \leq 800 \text{ C}^\circ$$

$$\lambda_s = 27.3 \quad (\text{W/m K})$$

$$\text{Pour } 800 \text{ C}^\circ \leq \theta_s \leq 1200 \text{ C}^\circ$$

Où θ_s : est la température de l'acier (C°)

Dans les modèles de calcul simplifier la conductivité thermique peut être considérée comme indépendante de la température de l'acier. Dans ce cas on prend la valeur moyenne $\lambda_s = 45 \text{ (W/m K)}$.

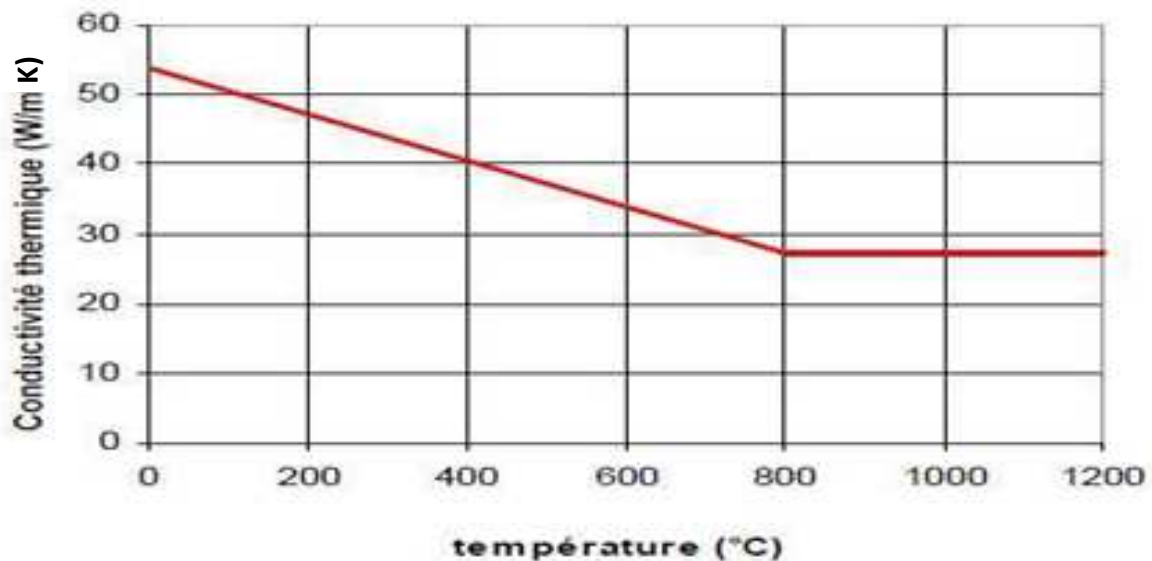


Figure 3-20 : Conductivité thermique de l'acier en fonction de la température. [42]

B - 3- PROPRIETES THERMO- MECANIQUES :**B - 3-1 Acier De Béton Armé :**

Les propriétés de déformation de l'acier de Béton Armé aux températures élevées sont obtenues par la relation contraintes- déformations présentée à la figure (3-20).

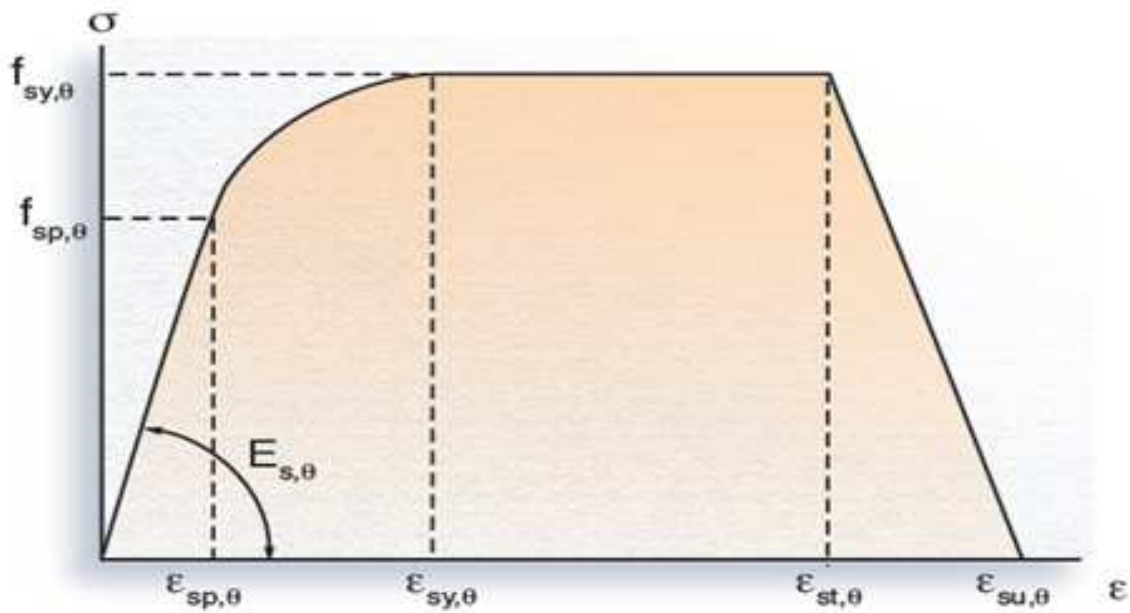


Figure 3-21: Modèle mathématique exprimant la relations contrainte- déformation de l'Acier de Béton-Armé à température élevée.

Avec :

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

$\epsilon_{sy,\theta}$: Déformation plastique

$\epsilon_{su,\theta}$: Déformation ultime

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

$f_{sy,\theta}$: est la limite d'élasticité efficace ;

$f_{sp,\theta}$: est la limite de proportionnalité ;

$E_{s,\theta}$: est la pente du domaine élastique linéaire ;

Le tableau (3-4) donne les trois paramètres de réduction par rapport aux valeurs appropriées à 20°C pour la relation contrainte-déformation de l'acier de béton armé à températures élevées indiqués dans la figure (3-21). Ces paramètres sont les suivants :

- ★ Limite d'élasticité efficace $f_{sy,\theta}$, rapportée à la résistance à la compression à 20 °C :
 $k_{sy,\theta} = f_{sy,\theta}/f_{yk}$;
- ★ Limite de proportionnalité $f_{sp,\theta}$, rapportée à la limite d'élasticité à 20 °C
 $k_{sp,\theta} = f_{sp,\theta}/f_{yk}$;
- ★ Pente du domaine linéaire élastique $E_{s,\theta}$, rapportée au Module d'élasticité à 20 °C :
 $k_{Es,\theta} = E_{s,\theta}/E_s$

Intervalle	Contrainte $\sigma(\theta)$	Module tangent
$\varepsilon_{sp,\theta}$	$\varepsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\varepsilon_{sp,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)}{a [a^2 - (\varepsilon - \varepsilon_{sy,\theta})^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{sp,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{sc,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	0
$\varepsilon_{sc,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{su,\theta}$	$f_{sy,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{sc,\theta}) / (\varepsilon_{su,\theta} - \varepsilon_{sc,\theta})]$	—
$\varepsilon = \varepsilon_{su,\theta}$	0,00	—
Paramètre*	$\varepsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta}$ $\varepsilon_{sy,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{sc,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,20$ Armature de classe A : $\varepsilon_{sc,\theta} = 0,05$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,10$	
Fonctions	$a^2 = (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + c/E_{s,\theta})$ $b^2 = c (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$	
* Les valeurs des paramètres $\varepsilon_{sp,\theta}$ et $\varepsilon_{su,\theta}$ pour l'acier de précontrainte peuvent être obtenues dans le tableau 3.3. Les armatures de Classe A sont définies dans l'Annexe C de l'EN 1992-1-1.		

Tableau 3 -4 : Relation entre les différents paramètres du modèle mathématique de la figure 3-20 [42]

Le tableau (3 -5) donne, en fonction de la température de l'acier θ_s , les facteurs de réduction $k_{s,\theta}$ à appliquer à la valeur appropriée $E_{s,20^\circ\text{C}}$ ou $f_{yk,20^\circ\text{C}}$ pour déterminer les paramètres définis au- dessus . Pour les valeurs de température intermédiaires, une interpolation linéaire peut être utilisée.

Températures de l'acier θ_s	Facteur de réduction à la température θ_s par rapport à la valeur de f_y ou E_s à 20°C					
	Facteur de réduction (par rapport à f_{yk}) Pour la Limite d'élasticité efficace $k_{sy,\theta} = f_{sy,\theta} / f_{yk}$;		Facteur de réduction (par rapport à f_{yk}) pour la limite de proportionnalité $k_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / f_{yk}$;		Facteur de réduction (par rapport à E_s) pour la Pente du domaine linéaire élastique $k_{s,\theta} = E_{s,\theta} / E_s$	
	Laminé à chaud	Laminé à froid	Laminé à chaud	Laminé à froid	Laminé à chaud	Laminé à froid
1	2	3	4	5	6	7
20°C	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100°C	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200°C	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300°C	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400°C	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500°C	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600°C	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700°C	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800°C	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900°C	0,00	0,00	0,04	0,05	0,07	0,05
1 000°C	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1 100°C	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1 200°C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tableau 3-5 : Facteurs de réduction pour la relation contrainte-déformation de l'acier du béton Armée à des températures θ_s différentes par rapport aux valeurs de f_{yk} et E_s à 20°C. [38].

Températures de l'acier θ_s	Facteur de réduction à la température θ_s par rapport à la valeur de f_y ou $E_{s,\theta}$ à 20°C		
	Facteur de réduction (par rapport à f_{yk}) Pour la Limite d'élasticité efficace $k_{sy,\theta} = f_{sy,\theta} / f_{yk}$;	Facteur de réduction (par rapport à f_{yk}) pour la limite de proportionnalité $k_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / f_{yk}$;	Facteur de réduction (par rapport à E_s) pour la Pente du domaine linéaire élastique $k_{s,\theta} = E_{s,\theta} / E_s$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1 000°C	0,040	0,0250	0,0450
1 100°C	0,020	0,0125	0,0225
1 200°C	0,000	0,000	0,000

Tableau 3 -6 : Tableau "simplifiée" du Facteurs de réduction pour la relation contrainte-déformation de l'acier du béton armé à des températures θ_s par rapport aux valeurs de f_{yk} et E_s à 20°C selon l'Eurocode 3 [42].

Le réduction de la résistance caractéristique de l'acier de béton armé, est définie en fonction de la température Θ par le facteur $k_{s,\theta}$ illustré à la figure (3-22) comme suite :

$$f_{sy,\theta} = K_{s,\theta} \times f_{yk,20^\circ C} .$$

Dont laquelle :

- $f_{yk,20^\circ C}$ est la valeur caractéristique de la limite d'élasticité à 20 °C ;
- $K_{s,\theta}$ est le facteur de réduction défini en fonction de la température Θ .

Ce facteur varie selon le type d'acier (laminé à chaud ou à froid) et en fonction de l'allongement des aciers. En l'absence d'informations plus précises, il convient de définir le facteur $K_{s,\theta}$ comme suit pour des armatures de béton armé .

Pour les armatures tendues des poutres et des planchers (acier laminé à chaud) pour des déformations $\geq 2 \%$ les valeurs ci-dessous du facteur de réduction de la résistance peuvent être utilisées (voir Figure 3-22 — Courbe 1). Elles correspondent aux :

$$k_{s,\theta} = 1,0 \quad \text{pour } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 350 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k_{s,\theta} = (6\,650 - 9\theta) / 3\,500 \quad \text{pour } 350 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 700 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k_{s,\theta} = (1\,200 - \theta) / 5\,000 \quad \text{pour } 700 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 1\,200 \text{ }^\circ\text{C}$$

Il convient d'utiliser les facteurs de réduction applicables à la résistance garantie à 0,2 % d'allongement des armatures longitudinales de compression dans les poteaux et dans les zones comprimées des poutres et des planchers tels que définis dans les expressions ci-dessous (voir Figure 3-22 — Courbe 2).

Ces expressions s'appliquent également au cas des armatures comprimées ou armatures tendues pour des déformations $< 2 \%$. (Voir Figure 3-22 — Courbe 3) dans l'utilisation des méthodes de calcul simplifiées ou générales.

$$k_{s,\theta} = 1,0 \quad \text{pour } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k_{s,\theta} = (1\,100 - \theta) / 1\,000 \quad \text{pour } 100 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 400 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k_{s,\theta} = (8\,300 - 12\theta) / 5\,000 \quad \text{pour } 400 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 650 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k_{s,\theta} = (1\,200 - \theta) / 5\,500 \quad \text{pour } 650 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 1\,200 \text{ }^\circ\text{C}$$

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

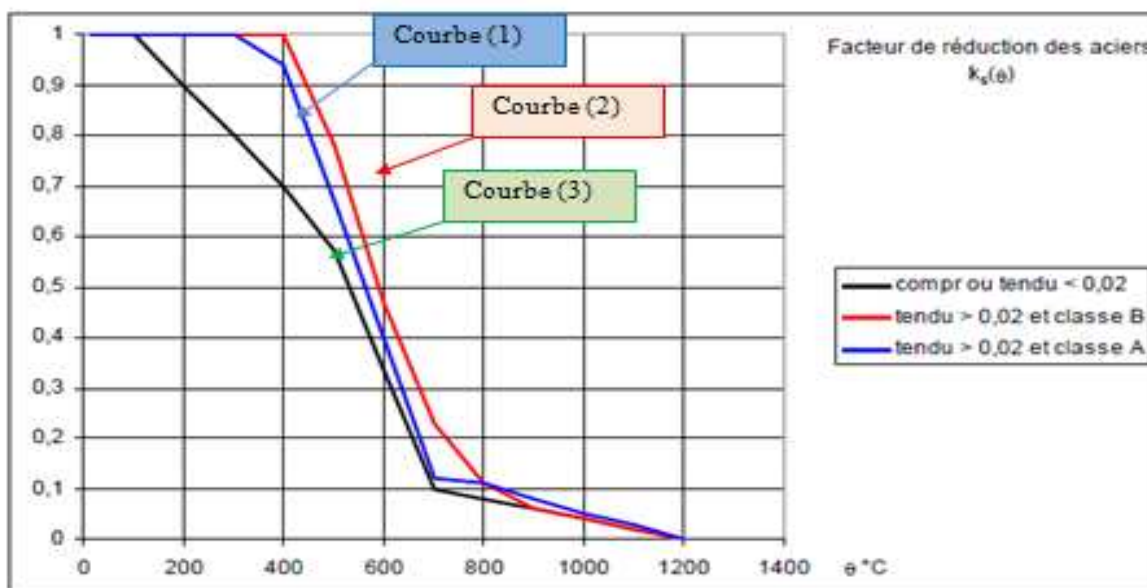


Figure 3-22 : facteur de réduction $k_s(\theta)$ appliquer à la résistance caractéristique Des aciers du béton -Armé. [38]

Un exemple de représentation graphique des relations contraintes- déformations pour les différentes températures, sans écrouissage. Est illustrée à la figure (3-23) suivante.

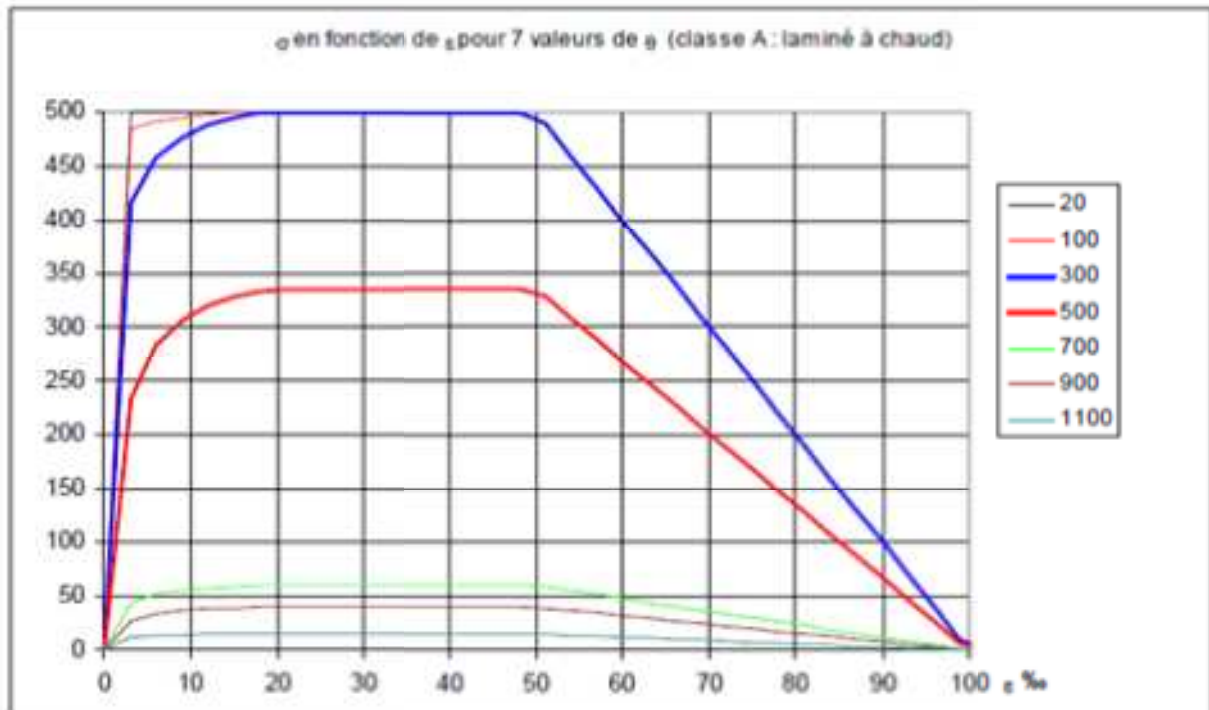


Figure 3-23 : Représentation graphique des relations contrainte-déformation de l'acier du béton-armé, à des températures différentes laminées à chaud, conformément à la Figure 3-20 Et au Tableau 3-4.avec des branches descendantes linéaires.

B - 3 -2 Acier De Précontrainte :

Les propriétés de résistance et de déformation de l'acier de précontrainte à températures élevées peuvent être obtenues par le même modèle mathématique que celui de l'acier de béton armé.

Les valeurs des paramètres pour les aciers de précontraintes formes a froids (torons et fils) et trempés et revenus (barres) a températures élevées sont données par :

$$f_{py,\theta}/(\beta f_{pk}) ; f_{pp,\theta}/(\beta f_{pk}) ; E_{p,\theta}/E_p ; \epsilon_{pt,\theta} ; \epsilon_{pu,\theta}.$$

Ces paramètres sont identiques à ceux présentés précédemment pour les aciers de béton armé. Seul l'indice *s* devient *p* pour précontrainte.

La valeur de β est liée au choix de la Classe A ou de la Classe B. Pour la Classe A, seule autorisée par l'Annexe Nationale, β est donné par l'expression :

$$\beta = \left[\left(\frac{\epsilon_{ud} - f_{p0,1k}/E_p}{\epsilon_{uk} - f_{p0,1k}/E_p} \right) \times \left(\frac{f_{pk} - f_{p0,1k}}{f_{pk}} \right) + \frac{f_{p0,1k}}{f_{pk}} \right]$$

où les définitions et valeurs de ϵ_{ud} , ϵ_{uk} , $f_{p0,1k}$, f_{pk} et E_p à température normale sont données dans Eurocode 2 [38], la clause 3.3 de l'EN 1992 partie 1-1.

Les valeurs caractéristiques de l'acier de précontraintes utilisées dans les simulations sont présentées dans le tableau (3 -6) ci-dessous

Températures de l'acier $\theta_p [^\circ C]$	Facteur de réduction pour la relation contrainte- déformation de l'acier de précontrainte à la température θ_p								
	$K_{py,\theta} = f_{py,\theta} / (\beta f_{yk})$			$K_{pp,\theta} = f_{pp,\theta} / (\beta f_{yk})$		$k_{s,\theta} = E_{p,\theta} / E_p$		$\epsilon_{pt;\theta}$	$\epsilon_{pu;\theta}$
	ff		t & r	ff	t & r	ff	t & r	ff	t & r
	Classe A	Classe B							
1	2a	2b	3	4	5	6	7	8	9
20°C	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,050	0,100
100°C	1,00	0,99	0,98	0,68	0,77	0,98	0,76	0,050	0,100
200°C	0,87	0,87	0,92	0,51	0,62	0,95	0,61	0,050	0,100
300°C	0,70	0,72	0,86	0,32	0,58	0,88	0,52	0,055	0,105
400°C	0,50	0,46	0,69	0,13	0,52	0,81	0,41	0,060	0,110
500°C	0,30	0,22	0,26	0,07	0,14	0,54	0,20	0,065	0,115
600°C	0,14	0,10	0,21	0,05	0,11	0,41	0,15	0,070	0,120
700°C	0,06	0,08	0,15	0,03	0,09	0,10	0,10	0,075	0,125
800°C	0,04	0,05	0,09	0,02	0,06	0,07	0,06	0,080	0,130
900°C	0,02	0,03	0,04	0,01	0,03	0,03	0,03	0,085	0,135
1 000°C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,090	0,140
1 100°C	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,095	0,145
1 200°C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,100	0,150
Pour des valeurs intermédiaires de température, une interpolation peut être utilisée.									

Tableau 3 -7 : Facteurs de réduction pour la relation contrainte-déformation de l'acier de précontrainte à des températures élevées θ_p [38]

Le réduction de la résistance caractéristique de l'acier de précontrainte, est définie en fonction de la température θ_p par le facteur $k_{p,\theta}$ illustré à la figure (3-24) comme suite :

$$f_{pK,\theta} = k_{p,\theta} \cdot f_{yk,20^\circ}$$

Dans laquelle :

- $f_{pk,20^{\circ}C}$ est la valeur caractéristique de la limite d'élasticité à 20 °C ;
- $k_{p,\theta}$ est le facteur de réduction défini en fonction de la température θ_p .

En l'absence d'informations plus précises, il convient d'utiliser les valeurs du facteur $k_{p,\theta}$ relatives aux aciers de précontrainte définis ci-dessous (voir Figure 3-24) :

★ Pour les barres :

$k_{p,\theta} = 1,0$	pour $20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_p \leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$
$k_{p,\theta} = (1\ 500 - \theta) / 1\ 500$	pour $100\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_p \leq 250\text{ }^{\circ}\text{C}$
$k_{p,\theta} = (700 - \theta) / 5\ 00$	pour $250\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_p \leq 650\text{ }^{\circ}\text{C}$
$k_{p,\theta} = (1\ 000 - \theta) / 3\ 500$	pour $650\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_p \leq 1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$
$k_{p,\theta} = 0$	pour $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_p \leq 1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$

★ Pour les fils et les torons :

$k_{p,\theta} = 1,0$	pour $20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_p \leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$
$k_{p,\theta} = (850 - \theta) / 750$	pour $100\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_p \leq 250\text{ }^{\circ}\text{C}$
$k_{p,\theta} = (650 - \theta) / 500$	pour $250\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_p \leq 600\text{ }^{\circ}\text{C}$
$k_{p,\theta} = (1\ 000 - \theta) / 4\ 000$	pour $600\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_p \leq 1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$
$k_{p,\theta} = 0$	pour $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_p \leq 1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$

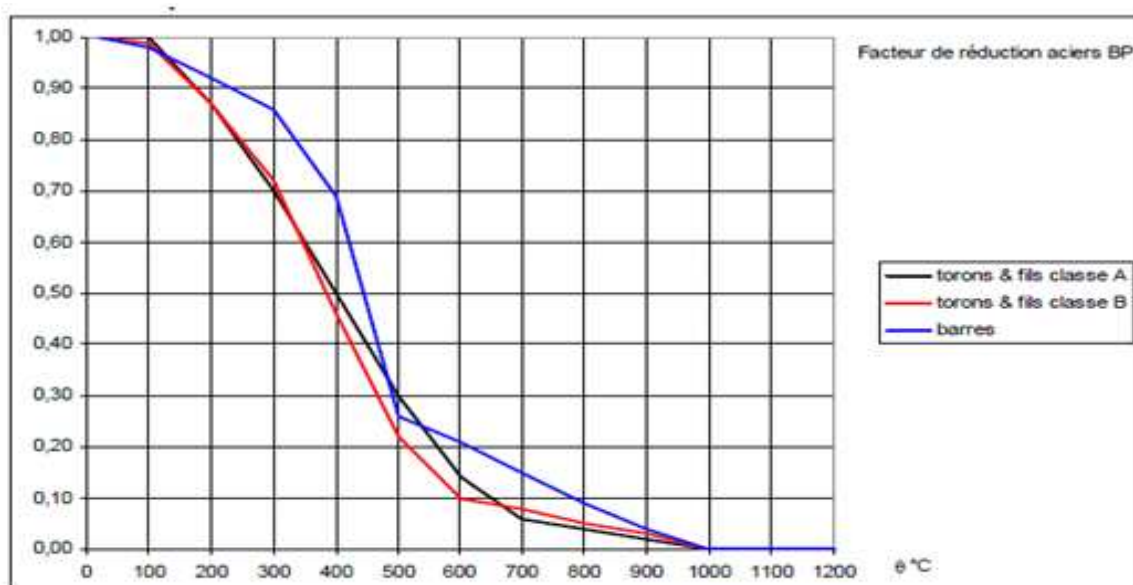


Figure 3-24 : facteur de réduction $k_p(\theta)$ appliqué à la résistance caractéristique F_{pk} des aciers de précontrainte [38]

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

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

Un exemple de représentation graphique des relations contraintes- déformations pour les différentes températures, sans écrouissage. Est illustrée à la figure (3-25) suivante :

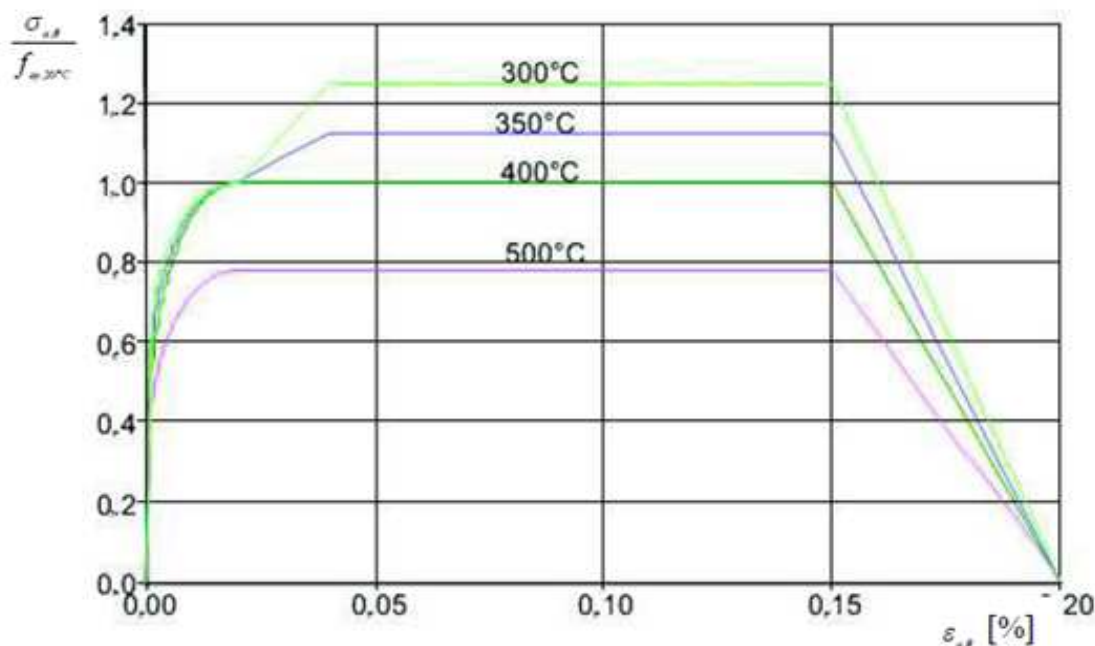


Figure 3-25 : Représentation graphique des relations contrainte-déformation de l'acier de précontrainte, à températures élevées trempées, conformément à la figure (3-20) et au Tableau (3-4)

III- 5 EVOLUTION DE LA RESISTANCE DU BETON ET CELLE DE L'ACIER EN FONCTION DE ELEVATION DE LA TEMPERATURE :

III-5-1- BETON :

Les évolutions et les altérations du béton en cas de hausse de température, résumés dans (le tableau 3- 1) [43], se traduisent entre autres par un affaiblissement de la résistance à la compression du matériau. La résistance reste constante jusqu'à 250 °C puis décroît pour ne plus représenter à 600 °C que 45 % de ce qu'elle était à 20 °C; elle devient nulle à 1000 °C.

La courbe ci-dessous présente les résultats d'essais montrant cette décroissance pratiquement linéaire de la résistance d'un béton courant à partir de 250 °C. Le fuseau autour de la courbe moyenne exprime principalement les différences de valeurs obtenues suivant la nature des granulats. Les bétons de granulats siliceux se situent en partie basse du fuseau alors que les bétons de granulats calcaires, résistant mieux à la température, en occupent la partie haute.

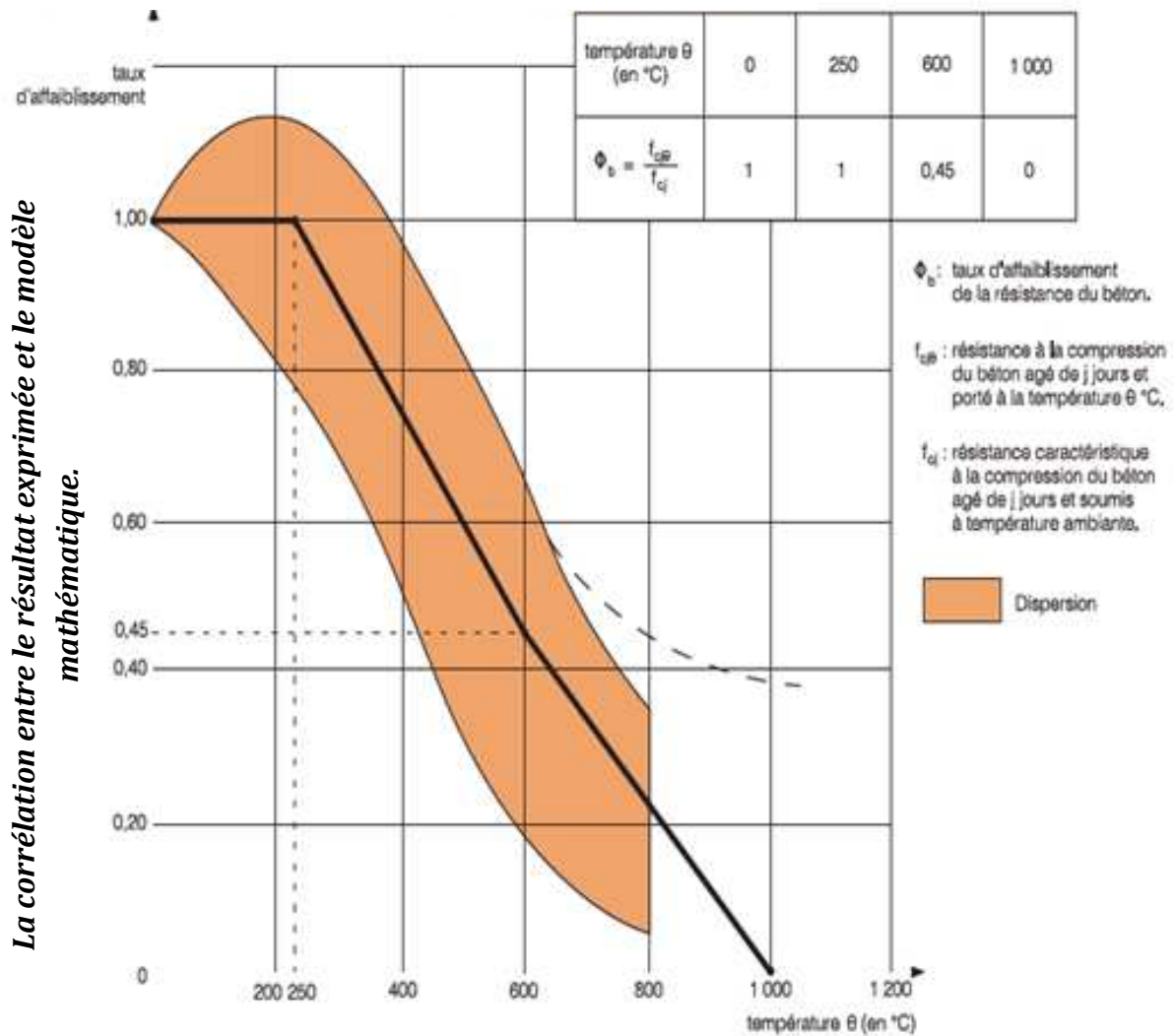
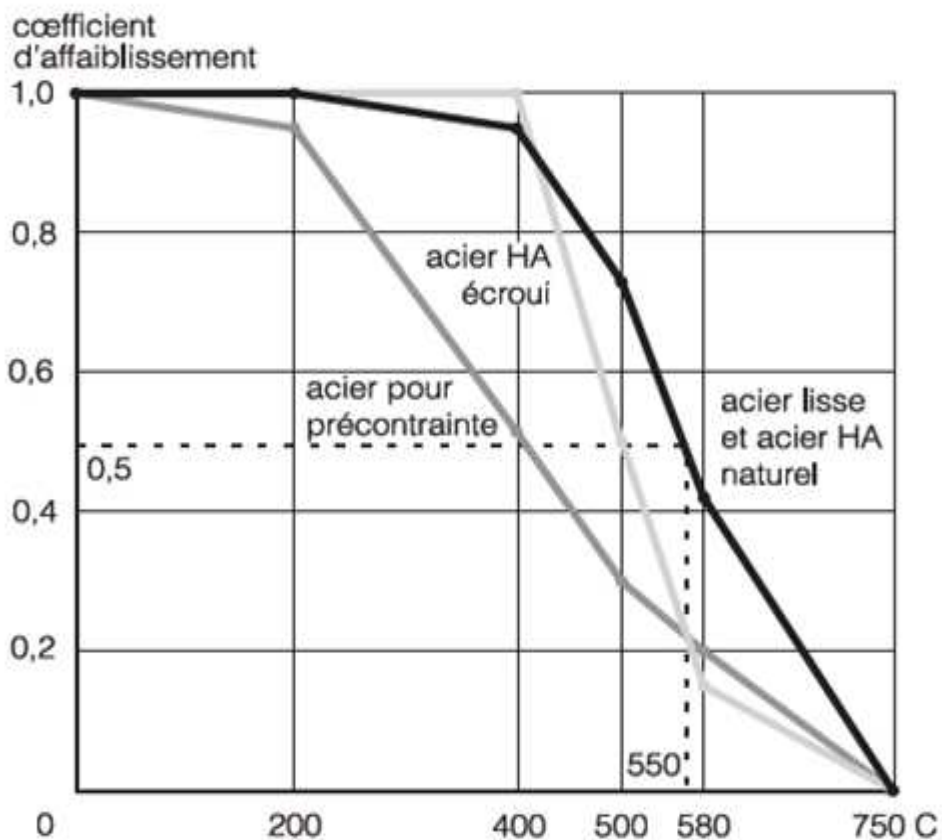


Figure 3-26 : Evolution de la résistance à la compression d'un béton en fonction de la température normale extrait de la norme P92-701 [44]

III-5-2- ACIER :

Pour l'acier, on retiendra, d'après les données de la norme P 92-701[44]. Que sa résistance à la température décroît à partir de 150°C à 200 °C selon les nuances pour devenir nulle à 750 °C. Le tableau ci-dessous donne ces résistances à la température en pourcentages de leur résistance à froid pour trois nuances d'aciers courants. On constate que les aciers pour précontrainte ayant subi un traitement thermique lors de leur fabrication sont plus sensibles à la chaleur que les nuances utilisées pour le béton armé.



Remarque : tous les aciers ont perdu plus de 50 % de leur résistance à 550 C

Température θ (°C)	0	200	400	500	580	750
Acier lisse et acier HA naturel	1	1	0,95	0,73	0,42	0
Acier HA écroulé	1	1	1	0,50	0,15	0
Acier pour précontrainte	1	0,95	0,515	0,30	0,20	0

Figure 3-27 : Affaiblissement de la résistance de trois nuances d'acier En fonction de la température par rapport à leur résistance à froid. [43]

En conséquence, il est nécessaire de concevoir l'ouvrage et ses éléments de façon que la température atteinte par les armatures lors d'un incendie reste modérée (de 150°C à 200 °C) et conserve à l'acier une résistance suffisante pour maintenir la stabilité pendant le temps requis. De même, il est nécessaire que la section de béton non altérée soit suffisante pour absorber les contraintes développées à l'état ultime de rupture. On adapte alors l'épaisseur de béton d'enrobage des aciers et l'épaisseur des pièces, en tenant compte de la géométrie des éléments soumis au feu, du principe d'armature et de la nuance d'acier.

La norme P 92-701 définit les conditions à respecter dans ces domaines pour assurer une résistance au feu donnée. Le tableau suivant fournit une synthèse de ces conditions. Par exemple, pour assurer une résistance au feu de deux heures, le recouvrement varie de 2,5 à 4 cm et de 2 à 4 cm, respectivement pour une dalle et pour une poutre en béton armé. Il est de 3 cm pour une poutre en béton précontraint. Pour un même degré de résistance au feu, l'épaisseur minimale des dalles est de 11 cm, celle des poutres rectangulaires de 24 cm. Comme le béton soumis à température va s'échauffer, sa dilatation doit être prise en compte dans la conception des ouvrages et éléments d'ouvrage qui subiront la déformation correspondante. Avec un coefficient de dilatation moyen du béton de 1.10^{-5} , la dilatation d'un ouvrage est de l'ordre de 0,5 % à 500 °C.

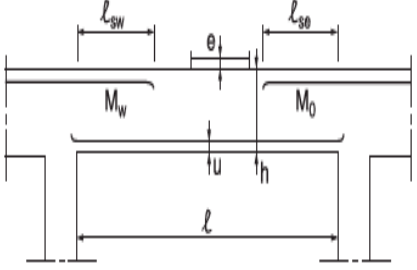
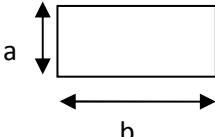
Condition à respecter pour les dalles, les poteaux et les poutres afin d'assurer une résistance au feu donnée {extrait de la norme P 92- 701}			Degré de résistance au feu					
			½ h	1 h	1h30	2 h	3 h	4 h
(1) Dalle	Epaisseur minimale	(h + e) [cm]	6	7	9	11	15	17.5
 <p>On opère par interpolation linéaire pour u et $\frac{l_{sw} + l_{so}}{l}$ en fonction de la valeur de $\frac{M_w + M_0}{2M_0}$</p>	Sans aciers sur appuis							
	$\frac{M_w + M_e}{2M_0} = 0$	U [cm]	1	2	3	4	6	8
		$\frac{l_w + l_e}{l}$	0	0	0	0	0	0
	Avec aciers sur appuis avec consoles.							
$\frac{M_w + M_e}{2M_0} \geq 0,5$	U [cm]	1	1,5	2	2,5	3,5	4,5	
	$\frac{l_w + l_e}{l}$	0,25	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6	
(2) Poteau	Carré		15	20	24	30	36	45
 <p>Minimum en [cm]</p> <p>Interpolation sur l'aire si $1 < \frac{b}{a} < 5$</p>	Carré : une face exposée au feu	10	12	14	16	20	26	
	Rectangulaire	10	12	14	16	20	26	

TABLEAU 3 -8 : Condition à respecter pour les Dalles, les poteaux afin d'assurer une résistance au feu donné par (la norme P 92- 701) [44]

(3) Poutres		Degré de résistance au feu					
		½ h	1 h	1h30	2 h	3 h	4 h
Epaisseur minimale (h ₂ + e) [cm]	Entraxe des poutrelles au plus égal à 2,5 m	5	6	8	10	14	16,5
	Entraxe des poutrelles supérieur à 2,5 m	6	7	9	11	15	17,5
	Poutres croisées avec un espacement maximal de 2,5 m dans chaque sens.	4	5	7	9	13	15,5
$\frac{M_w + M_e}{2M_0} = 0$	Poutres rectangulaires b minimal en cm	12	16	20	24	32	40
	Poutres à talon b minimal en cm	16	20	24	32	40	50
	b ₀ minimal en cm	9	10	12	14	16	18
	h ₀ minimal en cm	5	9	12	20	32	50
	Nombre minimal de lits inférieurs avec b minimal	2,5	4	5,5	6,5	8,0	9,0
	et avec un nombre minimal de barres par lit de : U (en cm)	2	2	2	4	4	5
	avec b supérieur à la plus grande des 2 valeurs 1 m ou 1,5 h ₁ et avec 10 barres par lit : $\frac{l_{sw} + l_{se}}{l}$	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0		
$\frac{M_w + M_e}{2M_0} \geq 0,5$	Poutres rectangulaires b minimal en cm	9	11	14	17	23	29
	Poutres à talon b minimal en cm	12	16	20	24	32	40
	b ₀ minimal en cm	8	10	12	14	16	18
	h ₀ minimal en cm	5	8	12	20	32	50
	Nombre minimal de lits inférieurs avec b minimal	2,5	2,5	3,3	4,0	5,2	9,0
	et avec un nombre minimal de barres par lit de : u (en cm)	2	2	2	3	3	4
	avec b supérieur à la plus grande des 2 valeurs 1 m ou 1,5 h ₁ et avec 10 barres par lit : $\frac{l_{sw} + l_{se}}{l}$	1	1,5	2	2,5	3,5	4,5
0,25	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6		
U ₁ en [cm]	$\tau \leq 0,03 f_{cj}$ ou béton précontraint classes I et II	Néant					
	$\tau \leq 0,03 f_{cj}$ ou béton précontraint classes I et II si tout en cadres	1,5	2	2,5	3	3	4,5
	$0,03 f_{cj} \leq \tau \leq 0,1 f_{cj}$ si 40 % au moins en étriers ou épingles	Néant					
	$0,1 f_{cj} \leq \tau \leq 0,15 f_{cj}$ il faut au moins 40 % en étriers et épingles	1,5	2	2,5	3	3	4,5

TABLEAU 3-9 : Condition à respecter pour les poutres pour une résistance au feu donné par (la norme P 92- 701) [44].

Ou :

h : épaisseur de la dalle en [cm].

e : épaisseur de la chape et de son revêtement en [cm].

M_0 : moment isostatique sous les charges permanentes et les charges variables.

M_w et M_e : moments de flexion équilibrés par les aciers sur appuis de longueur libre à l'intérieur de la travée considérée l_{sw} et l_{se} .

À défaut de prescriptions différentes dans les documents particuliers du marché, ces moments sont plafonnés à la valeur du moment provoqué par les seules charges permanentes, dans le cas où il s'agit de moments de continuité isostatique (console).

V : Effort tranchant une fois déduit la transmission directe

τ : Contrainte tangente conventionnelle correspondante à $\tau = \frac{V}{b.d}$ (b , b_0 s'il y a un talon).

III- 6 COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES MECANQUES DES MATERIAUX ACIER-BETON :

Les chutes de résistance du béton et de l'acier [3], sont portées ci-dessous sur un même graphique. Pour l'acier, c'est la courbe 1 (relative à une déformation de l'acier inférieure à 2%) qui est portée sur la (Figure 3-29).

Les chutes de rigidité du béton et de l'acier sont également portées sur un même graphique (Figure 3-30). Ce graphique n'est pas commun : il montre que la chute relative de rigidité est plus forte pour le béton que pour l'acier ! Ceci reflète la capacité pour le béton, comme exprimé plus haut, de s'accommoder du bridage. Le bridage d'un élément de construction est l'action d'entraver, de bloquer les déformations de cette élément.

Cette chute importante de rigidité du béton à température élevée influence relativement peu la rigidité des éléments comprimés en béton, puisque seuls les premiers centimètres à partir de la surface sont affectés.

Par contre, la diffusivité thermique de l'acier, 25 fois plus élevée que celle du béton combinée avec une faible massivité des pièces, influence gravement le comportement au flambage des pièces en acier (voir photo).



[photo: RASTRA]



Flambage des profilés en Acier.

Figure 3-28 : Montre deux photos comparatives des caractéristiques mécaniques des matériaux Acier - Béton soumis à haute température [3]

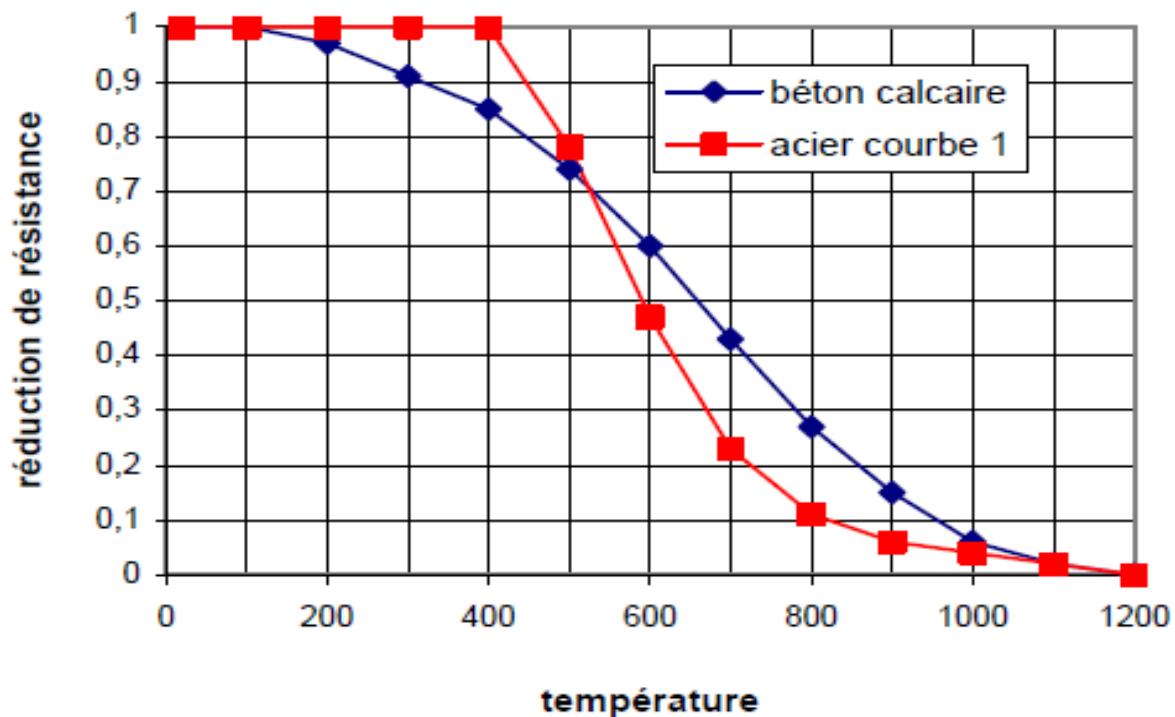


Figure 3 -29 : Chute de Résistance du béton et de l'Acier

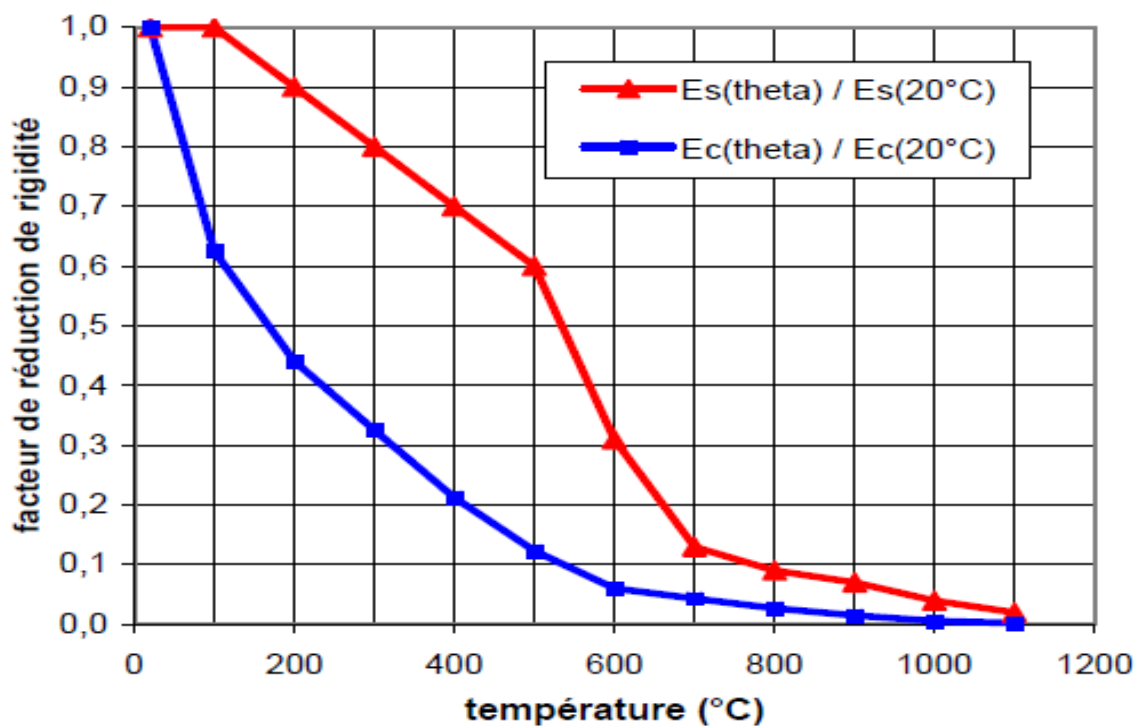


Figure 3- 30 : Chute de Rigidité du béton et de l'Acier [3],

Exemple Comparatif pour l'élévation de la température entre les deux matériaux :

L'essai, décrit ci-après, [43] illustre le phénomène suivant : un poteau en béton et un poteau en acier de 240 x 240 mm sont soumis à un feu ISO (feu de référence pour les essais). On constate que:

- ◆ presque instantanément, les différentes parties du profilé acier, peu épaisses et très conductrices de la chaleur, sont portées à 550 °C, température de ruine de l'acier, qui ne présente plus alors de caractéristiques mécaniques significatives ;
- ◆ après quinze minutes, la surface du poteau en béton atteint cette même température de 550 °C mais « à cœur », la température est d'environ 20 °C et à 4 cm de la surface, zone où l'on trouve les armatures, elle n'atteint pas 100 °C. Le poteau en béton et ses armatures présentent donc des caractéristiques mécaniques non affectées par l'exposition au feu.

Les armatures du béton armé et du béton précontraint ont un rôle déterminant dans la tenue des ouvrages : elles assurent prioritairement, et presque toujours seules, la résistance à l'état ultime des parties sollicitées en traction-flexion. C'est donc leur comportement aux températures atteintes pendant un incendie qui détermine la tenue de l'ouvrage.

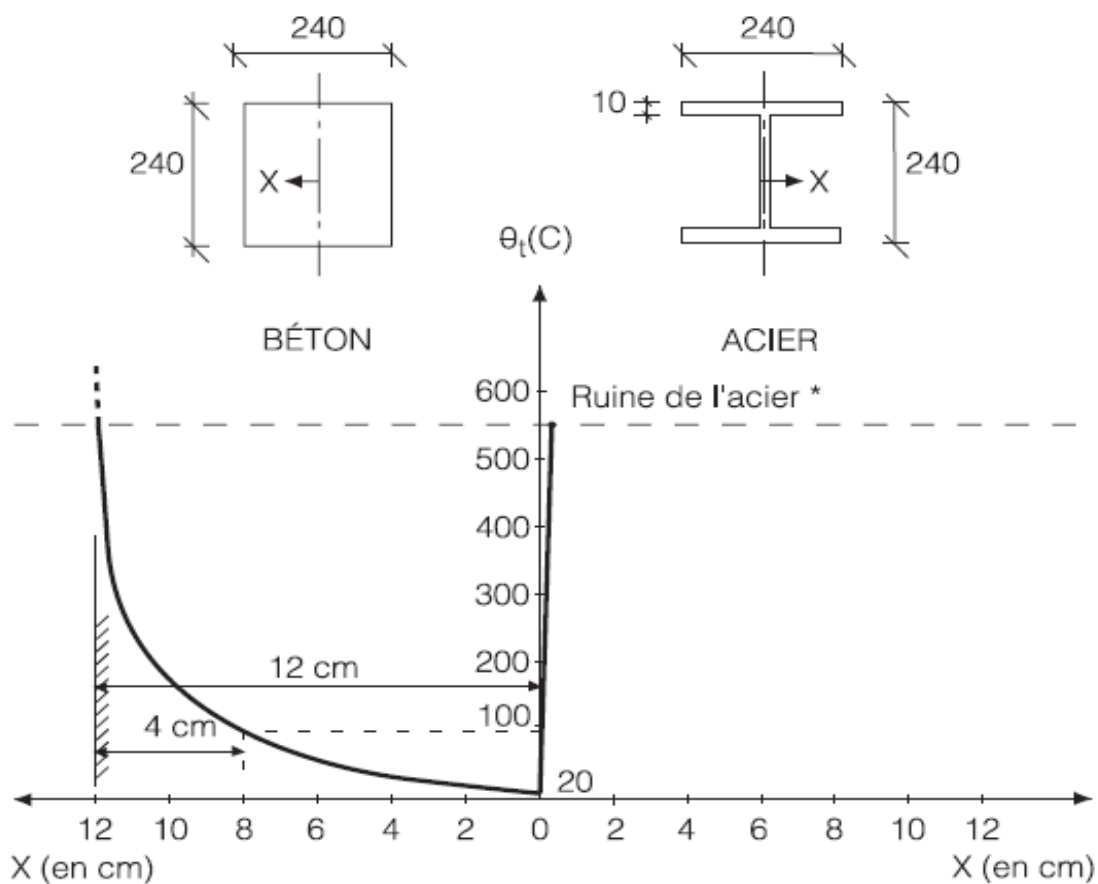


Figure 3 -31 : Evaluation de la température en profondeur dans les sections
Du béton et de l'Acier [43]

III- 7 CONCLUSION :

Le béton armé est de plus en plus utilisé dans le domaine du bâtiment. Une meilleure connaissance de ce matériau est acquise grâce aux différents travaux et projets de recherches menées depuis plusieurs années au niveau national et international. Ces travaux ont mis en évidence les caractéristiques intrinsèques et les performances très satisfaisantes de ce matériau. Malgré ses bonnes performances à températures ambiante, il peut présenter un comportement critique à haute température. L'analyse des effets de hautes températures sur sa microstructure est une étape nécessaire à la compréhension des phénomènes macroscopiques complexes, car le béton subit des modifications physico-chimiques qui influencent fortement son comportement thermo-mécanique.

Dans ce chapitre on a fait une étude bibliographique sur le comportement thermomécanique des matériaux (béton ordinaire ; acier de béton armé et acier de précontrainte) en cas d'incendie, qui se compose de trois parties :

Dans la première partie, on s'intéresse à donner des définitions générales des matériaux de construction (béton, acier et le composite béton-armé). Et leurs caractéristiques mécaniques à températures ambiantes (20°C).

La deuxième partie, consiste à décrire pour des températures élevées le comportement des différents matériaux (béton ; acier), en se basant sur les règles de l'Eurocode 2 ; 3 ; 4. Et sur des études expérimentales et numériques faites à travers le monde.

L'augmentation de la température provoque la réduction des propriétés thermo-physiques (dilatation thermique, chaleur spécifique, conductivité thermique...etc.), thermo-mécaniques (déformation) et chimiques (déshydratation). Ainsi nous avons pu voir lors de notre étude que lorsque le béton est soumis à de hautes températures, il se produit une destruction de la pâte de ciment et des granulats, qui affecte directement les propriétés mécaniques et le transfert du matériau. L'évolution des propriétés mécaniques est fortement liée à l'évolution de la microstructure et au départ d'eau présente dans les pores et les hydrates, et au changement physico-chimiques (réaction de déshydratation). Notamment dans le cas des bétons à haute résistance BHP ou l'augmentation de la pression de vapeur contribue d'une façon significative à l'apparition du phénomène d'écaillage ou d'éclatement du béton, quoique ce dernier est le problème qui intriguait les chercheurs pendant la dernière décennie. Il a été déduit que la disposition des aciers transversaux et la quantité d'additif employée pour augmenter la résistance du béton représentent la cause principale de la naissance de ce phénomène néfaste. Car la porosité et la perméabilité du béton jouent un rôle important pendant les hautes températures. Elles facilitent l'évaporation de l'eau. Un béton dense possède une faible porosité, la quantité d'eau emprisonnée provoque des pressions interstitielles, dont le taux dépasse celui de la résistance du béton. Elles entraînent alors l'éclatement de celui-ci. A titre d'exemple, la porosité diminue quand le taux de fumée de silice employée dans une pâte de béton est élevé. En conclusion, une utilisation d'additif avec

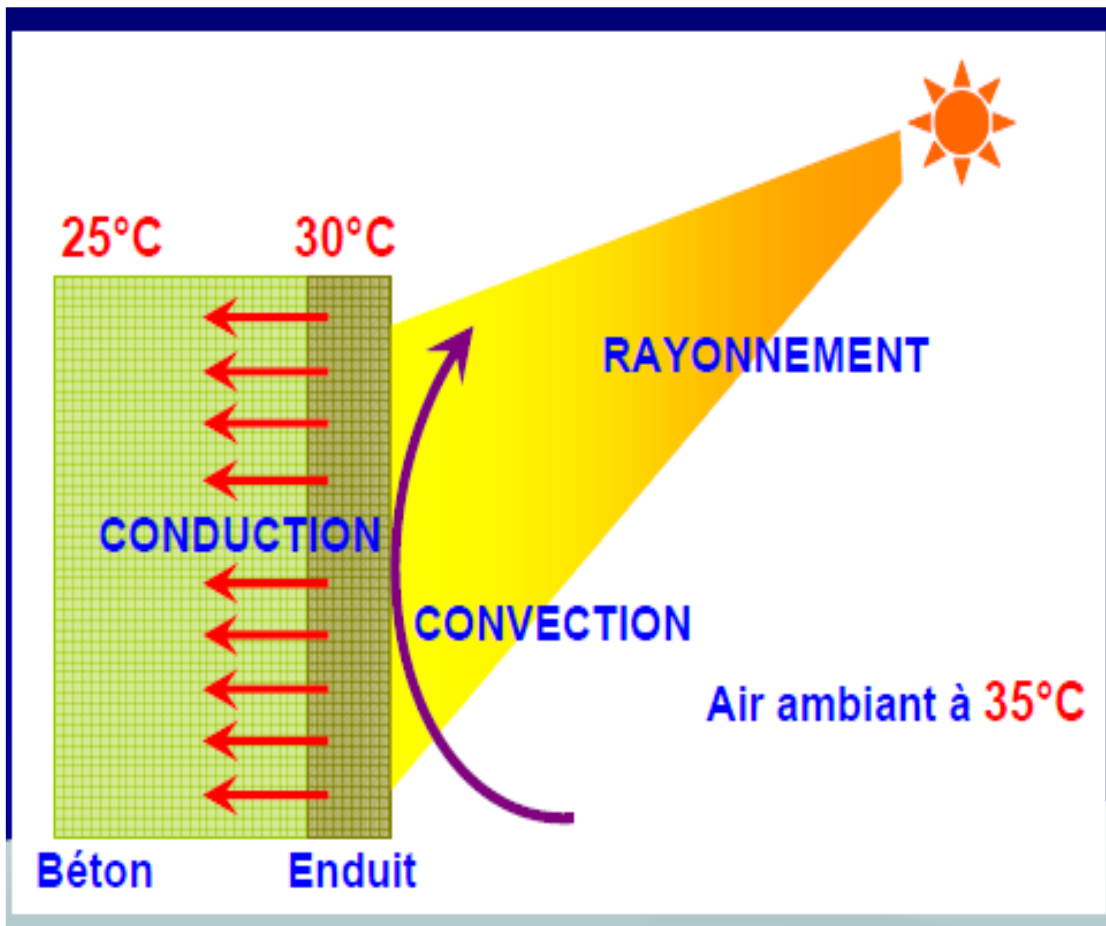
une proportion adéquate et selon les règles en plus d'un bon confinement et une bonne disposition des aciers transversaux (rapprochement des cadres, apport d'étriers) éloignent le problème d'écaillage. Le béton à haute résistance, dans ces conditions, ne risque l'apparition d'écaillage qu'après de longues durées d'exposition au feu ce qui permet l'obtention d'une résistance pouvant atteindre 6 heures.

La dernière partie, est une comparaison entre les caractéristiques mécaniques et thermiques des deux matériaux béton et acier sous l'effet de hautes températures. On a constaté que la résistance au feu d'une colonne en béton est 25 fois plus grande que celle en acier (voire figure 3-31). Il faut retenir que même endommager le béton agit en tant que couche isolante, que bouclier thermique. Il protège le noyau porteur du plein effet des hautes températures.

La capacité de résistance au feu du béton est intéressante car elle permet aux structures de rester en service et d'assurer la stabilité des constructions. Les structures peuvent ainsi rester stables pendant une durée suffisante pour permettre l'intervention des secours et l'évacuation des occupants. Au-delà de sa haute résistance, le béton est un matériau à très faible valeur calorifique (qui produit donc très peu de chaleur et alimente très faiblement le feu). De plus, le béton, qui ne transmet que faiblement les flux de chaleur, aura une température au centre bien plus faible que la température extérieure. Ainsi, alors que les différents phénomènes de transformations susmentionnés tendraient à indiquer que vers 500 °C, les modifications dans le béton devraient entraîner un affaiblissement des qualités mécaniques du matériau, l'inertie du béton à la propagation du flux de chaleur dans sa masse permet à certaines constructions soumises à des températures supérieures à 1 000 °C de résister. Nous proposons dans le quatrième chapitre de cette thèse d'étudier les différents phénomènes de transfert de la chaleur dans un matériau exposée à des températures élevées.

CHAPITRE IV:

MECANISME DE TRANSFERT DE CHALEUR



IV -1 INTRODUCTION :

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre.

La thermique (ou thermocinétique) [45] se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

Le but principal de ce chapitre est de fournir aux lecteurs les notions fondamentales des problèmes thermiques, qui sont les différents phénomènes de transfert de la chaleur.

Le transfert peut être défini comme la transmission d'énergie d'une région à une autre sous l'influence d'un gradient. Un transfert d'énergie a lieu chaque fois qu'un gradient de température existe à l'intérieur d'un système, ou lorsque deux systèmes à températures différentes sont mis en contact. Le processus par lequel le transfert de l'énergie s'effectue est désigné par les termes Transmission de chaleur ou Echange énergétique ; La grandeur transférée, appelée " chaleur " ne peut être ni mesurée ni observée, mais les effets qu'elle produit sont sujets à l'observation et aux mesures. Les principes de thermodynamique qui sont basés sur ces observations ont été réunis dans des lois qui sont supposées régir tous les phénomènes se présentant dans la nature.

IV -2 DEFINITIONS :

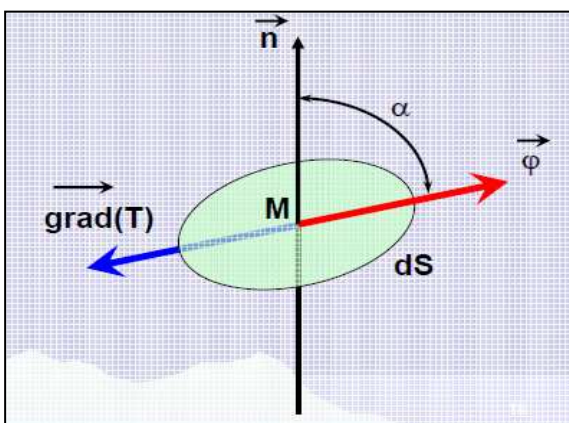
2-1 *Champ de température :*

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x, y, z, t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

2-2 *Gradient de température*

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :



$$\overrightarrow{\text{grad}}(T) = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n}$$

Avec :

\vec{n} : Vecteur unitaire normale à la surface dS

$\frac{\partial T}{\partial n}$: Dérivée de la température le long de la normale.

Figure 4-1 : Isotherme et gradient thermique [48]

2-3 Le flux de chaleur :

- La quantité de chaleur ϕ en [W] qui, pendant l'intervalle de temps, traverse une paroi de surface (S) et d'épaisseur e constituée d'un matériau homogène et isotrope de conductivité λ , est proportionnel à la différence de température ΔT entre les deux faces est donnée par la relation de Fourier : $\phi = \frac{\lambda \cdot S}{e} \Delta T$

Où : S est l'aire de la surface (m²) ;

Dans cette formule la température s'exprime en Kelvin [K], une différence de 1K correspond à une différence de 1°C ;

La conductivité λ du matériau constituant la paroi s'exprime donc [W. m⁻¹.K⁻¹]

- La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur : $q = \frac{\lambda}{e} \Delta T$

- la Résistance thermique "R" d'une paroi traduit la résistance aux transferts thermiques $\phi = \frac{\lambda \cdot S}{e} \Delta T \leftrightarrow \Delta T = \frac{e \cdot \phi}{\lambda \cdot S}$ D'où $\Delta T = R_t \cdot \phi$

Donc $R_t = \frac{e \cdot \phi}{\lambda \cdot S}$

IV -3 Rappel sur le Mécanisme de transfert de la chaleur :

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

Les mécanismes [46] des deux premiers modes convection et rayonnement dépendent uniquement de l'existence d'un gradient de température, mais celui du dernier mode la convection dépend aussi bien de la différence de température que d'un mécanisme de transfert de masse. Dans le cas de l'acier matériau homogène la chaleur est uniquement transférée par conduction. Mais pour le béton qui est un matériau poreux, l'échange de chaleur est plus complexe, donc les trois phénomènes sont pris en compte (Le transfert thermique se fait par conduction à l'intérieur de l'élément et par convection et rayonnement sur les parties extérieures ou latérales).

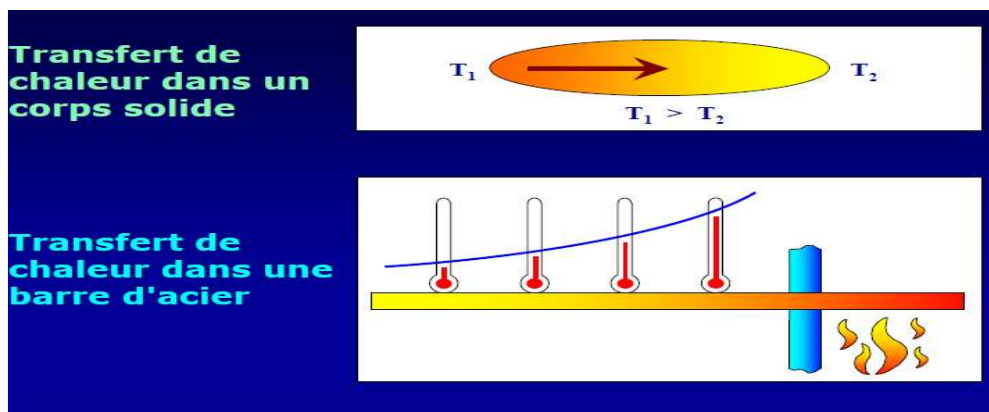


Figure 4-2: Mécanisme de développement de la chaleur dans les matériaux Acier et Béton [50]

IV -3 -1 Différents problèmes liés aux mécanismes de transferts de chaleur :

Afin de mieux comprendre les différents problèmes liés aux mécanismes de transfert de chaleur, considérons un compartiment incendié, présentant une ouverture par laquelle pénètre l'air frais (fig. 4-3) et examinons comment se pose le problème de transfert de chaleur.

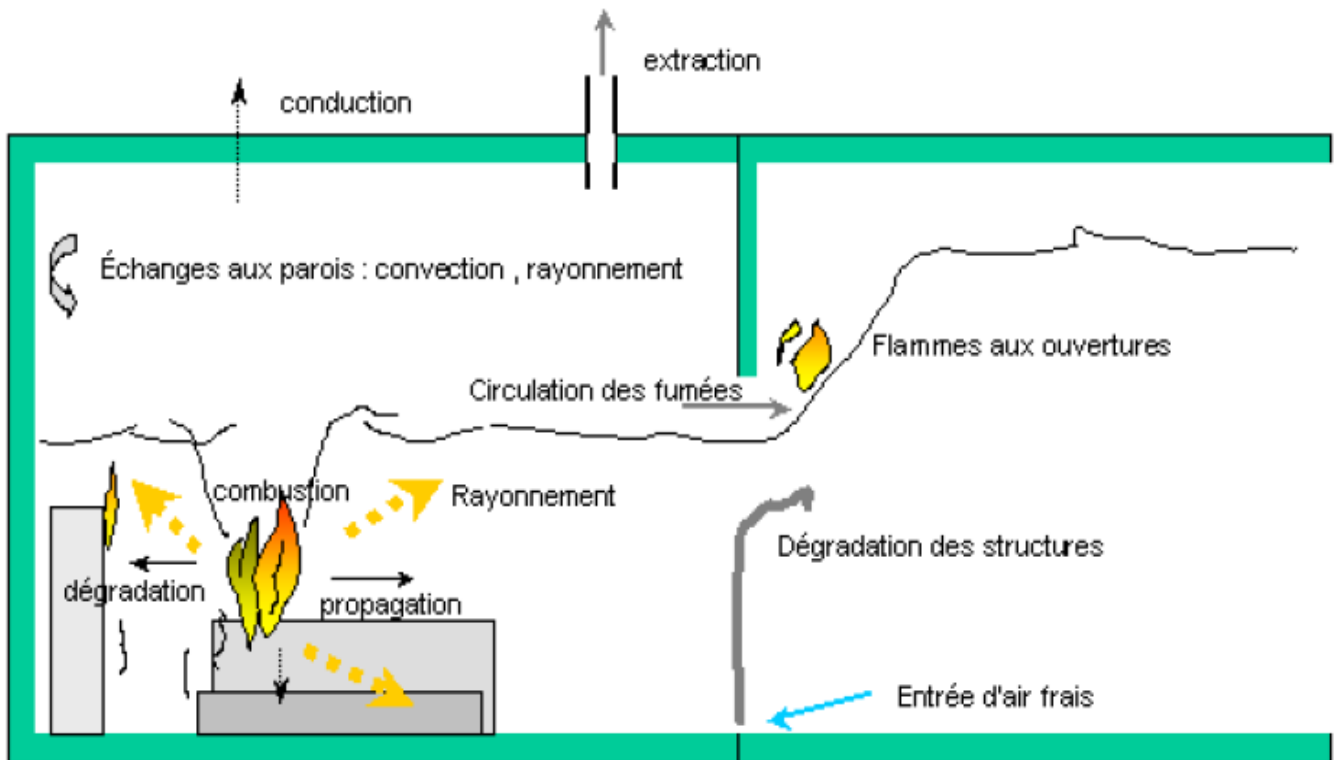


Figure 4-3 : Schématisation des transferts de chaleur dans un local incendié [51]

A l'origine, l'incendie a souvent un caractère localisé : une colonne convective s'établit au-dessus du lit du combustible, atteint le plafond du local et sort par la partie supérieure de l'ouverture, alors que l'air frais pénètre par la partie inférieure. Un écoulement d'air s'établit par l'ouverture, la mise en mouvement étant provoqué par la combustion (convection naturelle). [4] Les échanges de chaleur se produisent par convection sur les parois verticales et horizontales, par rayonnement de la flamme et des fumées vers les éléments directement visibles, et par conduction au sein des parois et dans le combustible non brûlé. Les problèmes à envisager sont de différentes natures :

- ◆ Des problèmes de combustion et de problèmes de thermocinétiques, c'est-à-dire de mécanique des fluides et de thermique liés à l'écoulement gazeux que provoque le feu, l'écoulement de l'air frais et surtout, à cause des risques d'asphyxie, celui des gaz brûlés et des fumées ;

- ◆ Des problèmes de transfert thermique qui consistent à déterminer la température dans les parois. En effet, il est nécessaire de savoir si une paroi n'a pas atteint une température critique au-delà de laquelle il y a risque d'auto-inflammation, de dégagement de gaz toxique,

de ramollissement voir de fusion s'il s'agit de produits plastiques. Dans le cas d'une structure portante, il est nécessaire d'évaluer la pénétration de la chaleur à l'intérieur de l'élément.

IV- 4 Les lois fondamentale du transfert de chaleur :

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

Ces trois modes interférents durant un incendie, il y a prédominance plus au moins prononcé de l'un ou de l'autre suivant le moment et l'endroit.

IV- 4 -1 Transfert de la chaleur par Convection :

Lorsque le transfert de chaleur s'accompagne d'un transfert de masse, il est appelé transfert par convection. Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux Fluides ou lorsque un fluide circule autour d'un solide. Ce phénomène de transfert par convection apparaît lorsque les particules constitutives du milieu sont libres de se mouvoir (liquides et gaz). Elles emportent avec elles la chaleur qu'elles ont reçue, soit au contact des parties fixes plus chaudes, soit encore en leur sein même, par suite d'une dissipation interne (réaction chimique). L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi. La quantité de chaleur échangée par unité de temps dépend de plusieurs paramètres :

La différence de température entre la paroi et le fluide ; la vitesse du fluide ; la capacité thermique massique du fluide ; la surface d'échange ; l'état de surface du solide ; sa dimension etc. . . . Selon le mécanisme qui génère le mouvement du fluide, on distingue :

- La convection naturelle ;
- La convection forcée autour d'un solide.

Lorsque le mouvement du fluide est due à une action mécanique extérieur (pompe, ventilateur, ...), on dit que la convection est forcée. Lorsque se sont les effets thermiques eux même qui mettent en mouvement le fluide, on dit que la convection est naturelle ou libre. Ce mouvement est provoqué par une différence de masse volumique entre particules fluides chaudes ou froides.

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

La convection est régie par le transport de la chaleur vers un solide à partir des mouvements des gaz qui l'entoure. Elle suppose que le flux de chaleur net q_c sur un élément de surface est proportionnel à la différence de température du milieu ambiant T_f et la température de l'élément de surface T_p , Ce phénomène peut s'exprimer par la relation suivante en considérant la conductivité Thermique.

$$q_c = \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_s \quad \Leftrightarrow \quad q_c = h_c (T_f - T_p) \quad (4-1)$$

Où :

T_p : température à 1m² de la paroi du solide, en kelvins [K]

T_f : température du fluide exprimé en kelvins;

h_c : coefficient d'échange par convection [W/m²K], il dépend essentiellement des conditions d'écoulement du fluide (dans le cas de l'incendie : les gaz chauds) mais également des

caractéristiques physique et géométriques du matériau. Il est disponible sous forme d'un tableau (*table IV-1*). En convection naturelle la valeur du coefficient d'échange h_c variant de 6 à 40 [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$], selon la face de la paroi considérée (exposée ou non au feu).

Type de convection	h en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Convection libre dans l'air	5-30
Convection libre dans l'eau	500-1000
Convection forcée dans l'air	100-500
Convection forcée dans l'eau	100-15000

Tableau IV -1 : quelques valeurs de coefficient d'échange par convection [46].

IV - 4 -2 Transfert de la chaleur par Rayonnement :

IV- 4-2-1 Définition :

Le rayonnement thermique est le transfert d'énergie par ondes électromagnétiques (Photon), et ne requiert la présence d'aucun milieu entre la source de chaleur et le receveur. D'un point de vue phénoménologique, le transfert par rayonnement se traduit par un échange de chaleur entre deux corps séparés par un milieu n'autorisant aucun échange par conduction ou par convection (exemple : le vide).

Dans ce processus qui joue un rôle important dans la propagation du feu, la chaleur à la surface d'un corps est transformée selon les lois de la thermodynamique en rayonnement thermique. Des modèles servent à représenter la propagation et les effets de ce rayonnement :

- l'aspect ondulatoire, qui assimile à un rayonnement électromagnétique,
- l'aspect quantique, qui en fait un faisceau de photons.

Le rayonnement thermique est analogue à la lumière visible, mais de longueur d'onde supérieure (infrarouge). Lorsqu'il tombe à la surface d'un autre milieu, il est en partie réfléchi, en partie transmis si le milieu est partiellement transparent, et en partie absorbé c'est-à-dire dégradé en chaleur. Le résultat équivaut à un transfert de chaleur d'un corps à l'autre. Ce qui se propage n'est cependant pas de la chaleur, mais du rayonnement.

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

IV- 4-2-2 Lois d'émissions de la chaleur :

Le flux d'énergie émis dans toutes les directions (émission hémisphérique) est caractérisé par l'émissance énergétique M . Les lois qui régissent, pour un corps quelconque, la variation de M avec la température sont complexes. On les détermine par référence à celles bien connues d'un corps idéal, dit absorbant parfait, ou corps noir.

Corps noir : Un corps noir absorbe intégralement tout rayonnement incident, et la qualité et l'intensité du rayonnement qu'il émet ne dépend que de sa température. De plus, il a la propriété d'émettre, pour une température donnée, le plus d'énergie. Le pouvoir émissif d'un corps noir vers une surface hémisphérique située en avant de la surface noire est donné par la loi de **Stephan-Boltzmann**. Elle s'écrit :

$$M_0 = \sigma_0 T_K^4 \quad (4-2)$$

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

L'énergie croît donc comme la puissance quatrième de la température. Ceci explique la prédominance, à température élevée, des échanges de chaleur par rayonnement sur les échanges par convection ou par conduction.

Corps gris : Les corps non noirs émettent, à une température donnée, moins d'énergie que les corps noirs. On écrit que leur émission est égale à celle du corps noir à la même température T_k multipliée par un facteur noté ε compris entre 0 et 1 ($0 < \varepsilon < 1$), qu'on appelle facteur d'émission.

$$M = \varepsilon \sigma_0 T_K^4 \quad (4-3)$$

Le facteur d'émission d'émissions est défini comme le rapport à la même température T_k entre le flux de la puissance émis par le corps gris et le flux émis par le corps noir.

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{Gris}}}{M_{\text{noire}}}$$

Le calcul des échanges de chaleur entre corps noirs est complexe et ne peut être effectué de manière analytique que pour des conditions géométriques relativement simples. Dans le cas particulier de deux plans parallèles infinis situés à des températures T_{k1} et T_{k2} , on peut montrer que le flux de chaleur échangé est donné par :

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

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

Si on appelle ε_1 et ε_2 les facteurs d'émission relatifs aux surfaces 1 et 2, la relation (4-4) devient dans le cas d'un corps gris :

$$q_{rg} = \varepsilon_{12} \sigma_0 (T_{K1}^4 - T_{K2}^4) \quad (4-5)$$

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

$$1/\varepsilon_{12} = 1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1$$

On voit que, dans le cas particulier de corps noir ($\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$), $\epsilon_{12} = 1$, et on retrouve la relation établie dans ce cas.

Le caractère simple est commode de la relation (4-5) a conduit à l'utilisation d'une formule du même type pour déterminer le flux de chaleur absorbé par une paroi à la température T_{kp} , lorsque les conditions géométriques sont beaucoup plus complexes. Dans ce cas, les autres surfaces entourant l'élément et les flammes sont désignées sous le terme global « environnement » dont la température de référence vaut T_{ke} est prise égal à la température des gaz dans le local (par exemple la courbe ISO ou paramétrique).

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

$$q_r = \epsilon_{ep} \sigma_0 (T_{ke}^4 - T_{kp}^4) \tag{4-6}$$

Où :

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

IV- 4-3 Transfert de la chaleur par Conduction :

Le transfert de chaleur par **conduction** correspond à un transfert d'énergie interne dû aux interactions entre les particules qui constituent le système thermodynamique (exemple : chocs de molécules dans les gaz, vibrations dans les solides cristallins, etc.) Il est présent dans tous les corps, quel que soit leur état (solide, liquide ou gazeux). Le transfert d'énergie s'effectue des zones à températures élevés à celle de valeurs faibles, par ailleurs il est intéressant de noter que la conduction thermique n'existe pas dans le vide.

On peut faire directement l'expérience de ce mode de transfert en tenant à la main un barreau métallique, [50] et en mettant l'autre extrémité au contact d'une flamme (comme schématisé à la figure 4-2). Au bout d'un certain temps, on est obligé de lâcher le barreau, pour éviter de se brûler. L'expérience du barreau suggère que le flux de chaleur qui se propage par conduction dans la matière est lié aux variations spatiales de température. Joseph Fourier a trouvé expérimentalement, en 1822, la relation entre la densité de flux de chaleur et le champ de température par la loi suivante :

$$\vec{q} = -\lambda . \overrightarrow{grad} T \tag{4-7}$$

et $\phi = q . S$

$$donc : \vec{\phi} = -\lambda . S . \overrightarrow{grad} T \tag{4-8}$$

Sous forme algébrique : $q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$ et $\phi = -\lambda . S \frac{\partial T}{\partial x}$

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

Ou :

λ : Conductivité thermique du milieu considéré [W/m K]

T : Température en [K]

\vec{q} Dans certains paragraphes on le trouve sous le symbole de « ϕ » est :

Le Vecteur densité de flux thermique ($\|\vec{q}\|$ S'exprime en $W . m^{-2}$).

$$\overrightarrow{grad} = \begin{cases} \frac{dT}{dx} \\ \frac{dT}{dy} \\ \frac{dT}{dz} \end{cases} \tag{4-9}$$

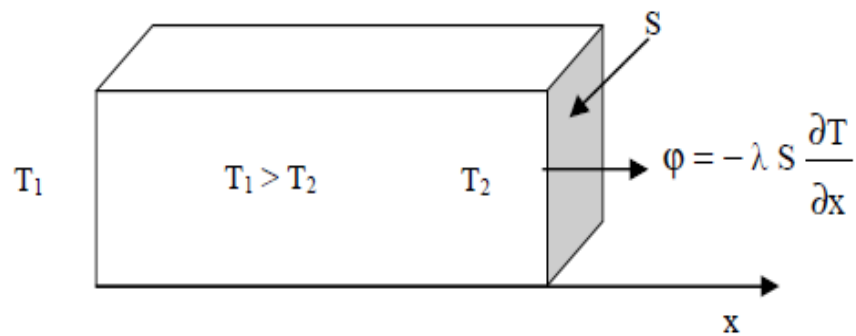


Figure 4-4: Schéma de transfert de chaleur conductif.

Le flux de chaleur ϕ est donc nul si le champ de température est uniforme (le système est alors dans un état d'équilibre thermique), et augmente avec les variations spatiales de température. Par ailleurs, à gradient de température fixé, le flux est d'autant plus grand que la conductivité thermique λ est élevée. Cette dernière est une caractéristique du corps considéré, de l'état dans lequel il se trouve, et pour un corps et une phase donnés, elle dépend généralement de la température (dans le cas des gaz, elle dépend aussi de la pression). Le tableau suivant donne quelques valeurs de conductivité thermique. Les corps dont la conductivité à la température ambiante est de l'ordre de 0,1 (W/ m K), ou inférieure à cette valeur, peuvent être considérés comme des isolants thermiques.

C'est le cas des gaz, généralement mauvais conducteurs de la chaleur. En ce qui concerne les solides, on notera que les bons conducteurs électriques (les métaux tels que le fer ou le cuivre) font aussi de bons conducteurs thermiques.

Matériau	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Matériau	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Chrome	449	Ardoise	2,2
Argent	419	Grès	1,8
Cuivre	386	Verre	0,78
Aluminium	204	Papier	0,48
Zinc	112	Chêne	0,17
Fer (pur)	73	Laine de verre	0,038
Acier Inox	16	Eau	0,556
Mercure	8,2	Air	0,0262

Tableau IV-2 : conductivité thermique de quelques matériaux, à la température ambiante. [49]

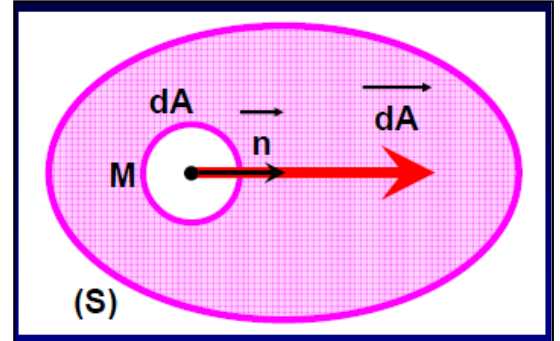
IV- 4-3-1 Lois de comportement de FOURIER :

Considérons un milieu [47] solide (S) dans lequel une surface élémentaire dA est orientée par sa normale \vec{n} .

Le corps (S) initialement il est en déséquilibre thermique, évolue en fonction du temps, chaque point du ce corps (S) est caractérisé

Par sa température T [soit en régime permanent ou transitoire $T = T(x, y, z)$; ou bien en régime Transitoire $T = T(x, y, z, t)$].

L'énergie de chaleur δQ qui traverse la surface dA Pendant l'intervalle de temps dt dans le sens de La normale \vec{n} est donnée par la loi de Fourier :



$$\delta Q = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T \overrightarrow{dA} dt \tag{4-10}$$

Avec :

$$\overrightarrow{dA} = dA \cdot \vec{n} : \text{Vecteur de surface}$$

Donc l'équation devient :
$$\delta Q = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T dA \vec{n} dt \tag{4-10a}$$

\vec{n} : Vecteur unitaire normal à la surface dA

λ : Conductivité thermique du milieu considéré [W/m K]

T : Température en kelvin [K]

δQ : Energie de chaleur en Joule [J]

On a également :

$$dq = \frac{\delta Q}{dt dA} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T \vec{n} \tag{4-12}$$

$$d\phi = \frac{\delta Q}{dt} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T dA \vec{n} \tag{4-13}$$

Si la surface dA est située sur une surface isotherme, les vecteurs $\overrightarrow{\text{grad}}$ et \vec{n} sont collinaire on a dans le cas unidirectionnel :

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad \phi = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} dA \tag{4-14}$$

Pour les corps anisotropes tel que les cristaux ou les corps composites (Bois, fibre enrobées, milieux poreux.....etc.) la loi de Fourier se généralise sous forme tensorielle

$$\delta Q = -\bar{\lambda} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T dA \vec{n} dt \quad \text{Avec :} \quad \bar{\lambda} = \begin{pmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{zx} & \lambda_{zy} & \lambda_{zz} \end{pmatrix}$$

D'où chaque composante de densité du flux de chaleur q sera de la forme suivante :

$$q_x = -\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_{xy} \frac{\partial T}{\partial y} + \lambda_{xz} \frac{\partial T}{\partial z} . \tag{4-15}$$

IV- 4- 3- 2 Equation d'équilibre du champ thermique :

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

$$\lambda \nabla^2 T + P = C_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4-16)$$

Où:

C_v : chaleur massique,

ρ : masse volumique,

P : puissance éventuellement dissipée par unité de volume (effet de Joule, réactions chimiques, réactions nucléaires...) et

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (\text{Opérateur de la divergence}). \quad (4-17)$$

NB :

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

L'équation de conduction de la chaleur ne suffit pas pour représenter les différents phénomènes qui se produisent dans les éléments en béton portés à des températures élevées. En effet, en plus du transfert de chaleur, il se produit des transferts de masse provoqués par la migration de vapeur et d'humidité. Ces deux phénomènes se superposent et sont décrits par un système d'équations différentielles couplées. En pratique, cependant, on n'utilise pas cette formulation, trop complexe, et on se contente de représenter la vaporisation de l'eau libre contenue dans le béton, soit en faisant intervenir le terme P de l'équation de conduction, soit en augmentant la capacité thermique du matériau aux environs de 100°C.

IV- 5 Coefficient De Transfert De Chaleur Dans Les Phénomènes d'incendie :

La décomposition de l'échange thermique global en processus élémentaires a pour but de faciliter l'analyse du phénomène. En réalité tous ces processus se manifestent simultanément et ils interagissent les uns avec les autres. La convection est, par exemple, toujours accompagnée d'un échange de rayonnement. D'autre part, l'échange conductif dans un matériau poreux fait intervenir la convection et le rayonnement au sein de l'air qui remplit

les pores. Dans les calculs pratiques, il n'est pas toujours nécessaire de décomposer l'échange thermique global en ses phénomènes élémentaires. On peut, dans certains cas, se borner à considérer le processus d'échange principal, quitte à tenir compte des processus secondaires en introduisant des facteurs de correction. Ainsi par exemple, dans un matériau poreux, la chaleur est principalement transmise par conduction. Les échanges convectifs et rayonnants qui se manifestent dans les pores interviennent indirectement dans le calcul par une majoration appropriée du coefficient de conductibilité. Lors d'un échange calorifique au voisinage d'une paroi, la convection et le rayonnement se manifestent souvent simultanément. On admet alors généralement que ces deux contributions sont additives.

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

$$q = h(T_e - T_p) + \sigma_0 \varepsilon_{ep} (T_e^4 - T_p^4) \quad (4-18)$$

Dans la relation (4-6), le paramètre critique à déterminer est l'émissivité relative ε_{ep} , de l'environnement et la paroi de l'éprouvette. Le coefficient d'échange par convection (h) a moins d'importance, car vu les températures atteintes lors de l'exposition au feu, l'échange radiatif devient rapidement prépondérant. Ces paramètres varient suivant le type de four considéré. Dans les grands fours d'essais d'éléments de structures, la source de chaleur est constituée par des brûleurs au gaz ou au fuel. Il existe des essais à plus petites dimensions, par exemple sur éprouvettes de béton, effectués dans des fours de dimension réduites, où la source de chaleur est généralement constituée par des résistances électriques.

L'environnement créé dans ces deux types de fours n'est pas le même. Dans le premier cas (grands fours), l'environnement est relativement turbulent ; le coefficient d'échange par convection doit tenir compte de ces mouvements de fluide et on prendra :

$h = 20$ à $25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Dans le deuxième cas au contraire (petits fours à résistances), l'environnement est relativement calme et on prendra en conséquence :

$$h = 5 \text{ à } 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}.$$

L'Eurocode 1 suggère de prendre les valeurs suivantes quelque soit la nature du matériau :

$$h = 25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}, \text{ à l'intérieur des fours d'essais et des compartiments incendiés}$$

Et $h = 9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, pour les faces en contact avec une zone non incendiée. En ce qui concerne les échanges par rayonnement, on exprime parfois l'émissivité relative ε_{ep} par un produit de deux facteurs $\varepsilon_e, \varepsilon_p$ en dissociant ainsi la part prise par l'environnement et la paroi

de l'éprouvette. Cette procédure n'est guère correcte, car dans ce cas, le terme ε_e n'est pas très significatif.

Dans le cas du béton ou de l'acier, l'émissivité des parois vaut $\varepsilon_p = 0.8$ ou 0.9 . L'émissivité globale de l'environnement, par contre, est beaucoup plus incertaine : elle dépend de l'émissivité de la source rayonnante et est influencée par les autres surfaces d'échange. Le domaine des valeurs admissibles s'étend de 0.3 à 0.9 , mais les comparaisons que nous avons effectuées montrent que l'on obtient des résultats satisfaisants dans tous les cas en se limitant aux valeurs 0.5 à 0.7 . On considère souvent un coefficient d'échange global par convection et rayonnement. Ce coefficient peut être obtenu à partir de la relation (4-18), en faisant dépendre l'échange calorifique total d'un coefficient qui a la même forme que le coefficient de convection. On peut écrire :

$$\begin{aligned} q &= h(T_e - T_p) + \sigma_0 \varepsilon_{ep} (T_e^4 - T_p^4) \\ &= h(T_e - T_p) + \sigma_0 \varepsilon_{ep} (T_e^3 + T_e^2 T_p + T_e T_p^2 + T_p^3)(T_e - T_p) \\ &= \alpha (T_e - T_p) \end{aligned} \quad (4-19)$$

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

$$\alpha = h + \sigma_0 \varepsilon_{ep} (T_e^3 + T_e^2 T_p + T_e T_p^2 + T_p^3) \quad (4-20)$$

L'Eurocode 1 fixe la valeur de $\varepsilon_p = 0.8$ et $\varepsilon_e = 0.625$ ce qui conduit pour l'acier à la valeur $\varepsilon_{ep} = 0.5$. C'est la valeur réglementaire qui sera adoptée dans les calculs.

IV - 6 Phénomène Linéaire De Conduction Thermique :

IV - 6-1 Problème d'un mur simple en béton :

Exemple d'application :

Soit un mur de bâtiment dont les dimensions latérales sont très supérieures à son épaisseur e (effets de bord négligeables). Les deux faces planes sont maintenues aux températures constantes T_1 et T_2 , de l'intérieur vers l'extérieur, et soumis sur ses faces à des conditions aux limites uniformes.

L'objectif poursuivi est double : déterminer le champ de température dans le mur, ainsi que le flux de chaleur qui le traverse. Soit \vec{x} la direction orthogonale au mur (*Figure 4-6*). Avec les hypothèses énoncées ci-dessus, la température ne dépend que de l'abscisse x . On dit que le problème est monodimensionnel (ou 1D). Cette configuration se rencontre dans un très grand nombre d'applications : murs d'une habitation, parois d'un four, etc.

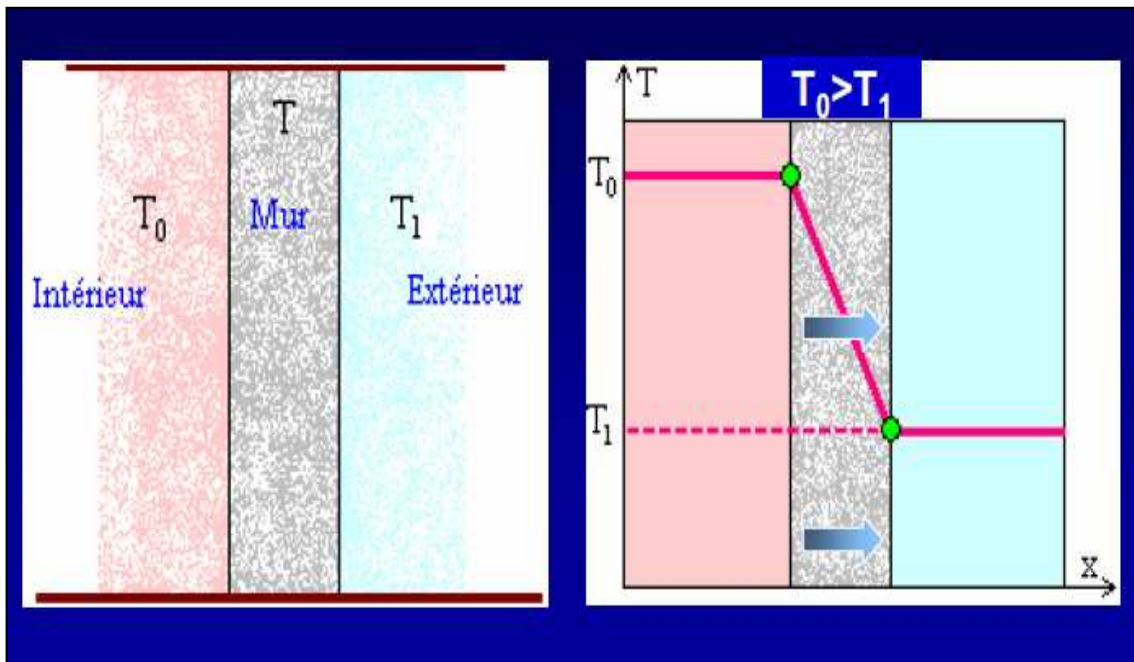


Figure 4-5 : Profil de température d'un mur de bâtiment [48]

On Considère un matériau homogène isotrope limité par deux surfaces planes parallèles de dimensions infinies. La géométrie du mur est supposée définie par ces deux faces planes. Nous prendrons pour l'axe des (X) la direction perpendiculaire à ces faces planes. Nous supposons que les propriétés physiques du mur ne dépendent que de (X). Considérons une paroi dont les faces sont planes et suffisamment étendues dans les directions Y et Z.

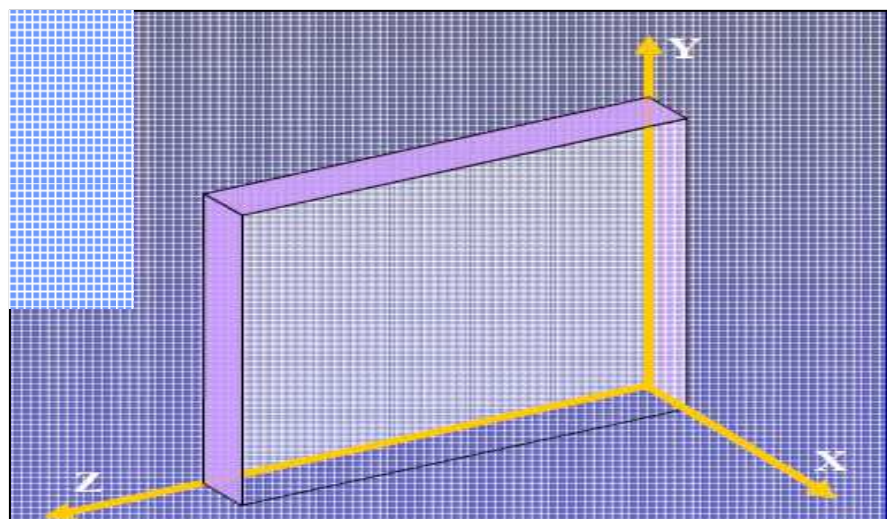


Figure 4-6 : Mur plan

L'équation fondamentale de transfert de chaleur par conduction est sous la forme suivante

$$\nabla^2 T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{4-21}$$

Avec $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ (4-22)

Pour notre cas il s'agit d'un mur à une seule dimension (1D) et la température est uniquement fonction de la variable x.

Le laplacien $\nabla^2 T$ devient : $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ (4-23)

L'équation devient : $\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{d\lambda}{dt} \frac{dT}{dx} = 0$ (4-24)

C'est-à-dire : $\frac{d}{dx} (\lambda \frac{dT}{dx}) = 0$ (4-25)

On prend $\lambda = cte$. C'est le cas pratique le plus courant et cette approximation est valable lorsque la température T_1 et T_2 sont voisines

L'équation se réduit à : $\frac{dT}{dx} = cte$

D'où la solution est de forme $T(x) = Ax + B$ (4-26)

Avec : A et B sont des constantes que l'on calcule en fonction des conditions aux limites

Condition aux limites du problème :

Admettons que les deux faces du mur sont maintenues à des températures fixes dans le temps

$X = 0 \longrightarrow T = T_1$

$X = L \longrightarrow T = T_2$

• **La loi de répartition de la température**

S'écrit :

$T(x) = \frac{T_2 - T_1}{e} x + T_1 = 0$ (4-27)

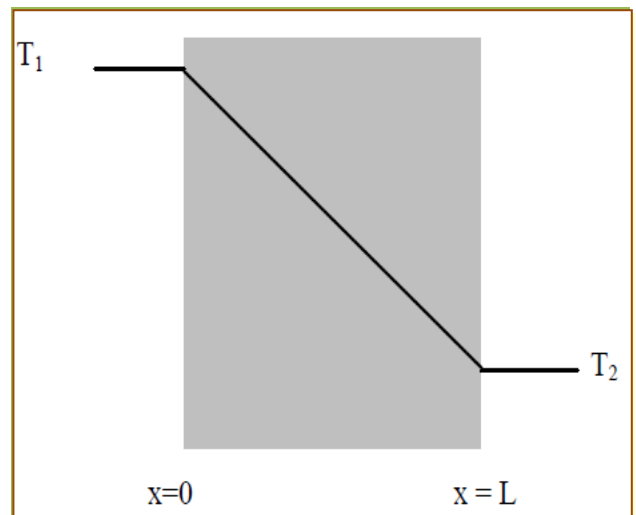


Figure 4-7 : Bilan thermique élémentaire sur un mur simple [51]

On obtient une répartition linéaire des températures Les isothermes sont des plans parallèles aux faces du mur.

La température dans le mur varie linéairement avec x . Cherchons à présent le flux thermique qui traverse le mur. La densité de flux en un point du mur est donnée par la loi de Fourier, en tenant compte du fait que seule la composante sur \vec{x} du gradient de température est non nulle

• **La densité du flux de chaleur** s'écrit :

$\varphi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{e} = cte$ (4-28)

Cette formule montre que ϕ est indépendant de x . cette propriété est la caractéristique d'un système à densité de flux conservative.

Remarque :

- On voit que la répartition de température est indépendante de la valeur du coefficient de conductivité λ , donc indépendante de la nature du matériau qu'il soit conducteur ou isolant.
- La densité de flux qui traverse le plan isotherme correspond à une valeur donnée de x est constante dans toute la traversé du mur

- **Le flux de chaleur qui traverse le mur :** est sous la forme suivante

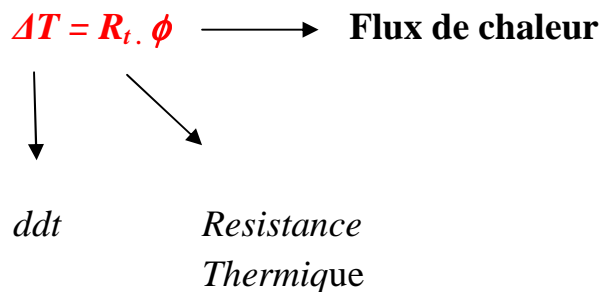
$$\phi = \varphi \times S = -\lambda.S. \frac{T_2 - T_1}{e} \tag{4-29}$$

- **Résistance thermique du mur :**

R_t est appelée **résistance thermique** du système (unité : $K.W^{-1}$). Elle quantifie la « résistance » que le système oppose au passage de la chaleur. Son expression est la suivante :

$$R_t = R_t = \frac{e}{\lambda.S} \tag{4-30}$$

$$\phi = \frac{\lambda.S}{e} \Delta T \text{ ou: } \Delta T = T_1 - T_2 = \frac{e.\phi}{\lambda.S} \Rightarrow \Delta T = R_t.\phi \Rightarrow R_t = \frac{e}{\lambda.S}$$



IV - 6 -2 Problème d'un mur multicouche en béton :

On considère un mur composite (figure 4-8) constitué de n murs simples de conductivités λ_i ($i=1, n$) et d'épaisseur e_i ($i=1, n$) accolés les uns aux autres, et de résistances thermiques R_{t1} ; R_{t2} ; R_{t3} ... R_{tn} Placé en série. .

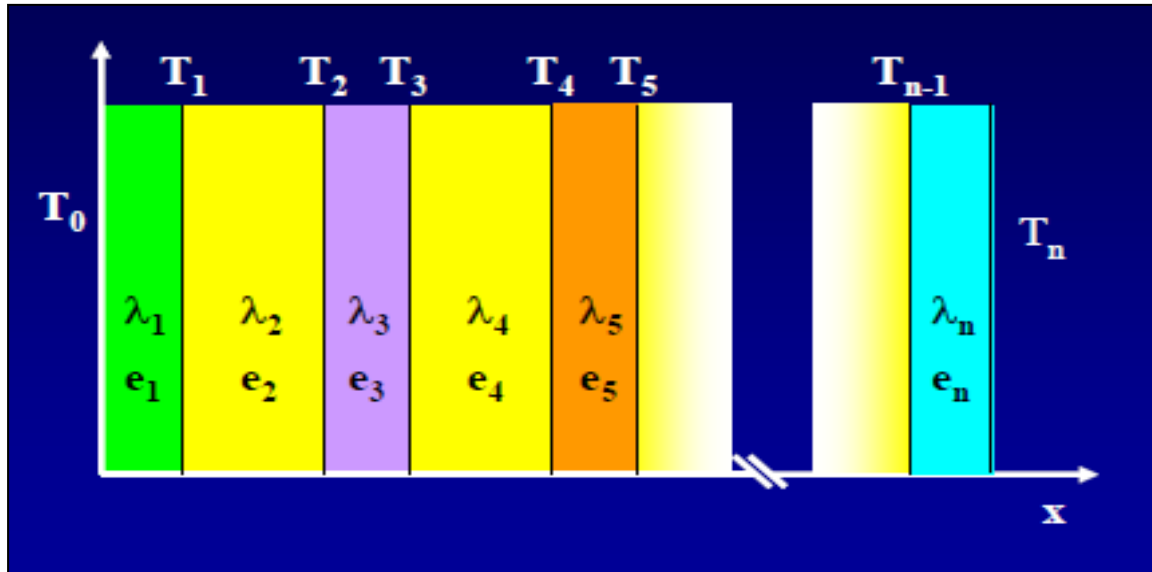


Figure 4-8: Schématisation des flux et des températures dans un mur multicouches [48]

La densité de flux de chaleur pour chacun des murs s'écrit :

$$q_i = -\frac{\lambda_i}{e_i} (T_{i-1} - T_i) \dots i = 1, n \tag{4-32}$$

$$(T_{i-1} - T_i) = q_i \frac{e_i}{\lambda_i} \dots i = 1, n$$

En régime stationnaire, la densité de flux de chaleur est la même dans tout le mur :

$$\phi_1 = \phi_2 = \dots = \phi_n = \phi$$

S'il existe un gradient de température suivant une normale aux surfaces de séparation, celles-ci coïncideront avec les isothermes $T_1; T_2; \dots; T_n$. En écrivant le flux de chaleur qui est conservatif :

$$\begin{cases} (T_0 - T_1) = \phi_1 \frac{e_1}{\lambda_1} \\ (T_1 - T_2) = \phi_2 \frac{e_2}{\lambda_2} \\ (T_1 - T_2) = \phi_2 \frac{e_2}{\lambda_2} \end{cases} \quad \longrightarrow \quad q = \frac{T_0 - T_1}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n}} \quad \text{Et } \phi = S \cdot q$$

Le flux de chaleur qui traverse ce mur est de manière générale :

$$\phi = \frac{S \cdot (T_0 - T_n)}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n}} = \frac{T_0 - T_n}{R_\lambda} \tag{4-33}$$

R_λ : est la résistance thermique du mur composite donnée par :

$$R_\lambda = \frac{1}{S} \left[\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n} \right] \quad (4-3)$$

$$\text{Soit : } R_\lambda = R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2} + R_{\lambda 3} + \dots + R_{\lambda n}$$

Ces problèmes de multiples applications techniques sont des parois multicouches qu'on trouve dans des bâtiments, revêtements et isolation de wagons.

Remarque :

En effet l'expérience montre que lorsque deux matériaux sont en contact les températures des deux faces sont en général différentes. Cela provient soit d'un mauvais contact physique avec interposition d'une couche d'air, soit de la présence d'une pellicule d'oxyde etc.....

Cette différence de température $T-T'$ peut s'exprimer sous forme d'une résistance thermique de contact ($R_{TC} = \frac{T-T'}{\phi}$).

Toutefois, en ce qui concerne les matériaux isolants, les corps poreux ou pulvérulents, ces résistances de contact peuvent souvent être négligées. C'est le cas pour la plupart des applications thermiques du bâtiment.

IV -7 CONCLUSION :

Ce chapitre a permis de fournir au lecteur un panorama général des concepts et notions propres au traitement des problèmes thermiques.

Toutes d'abord, nous avons rappelé certaines définitions concernant le champ de température, le gradient de température et le flux de chaleur,

Ensuite, on a présenté les différents mécanismes de transfert de chaleur (convection, rayonnement, et conduction) qui conduisent à l'équation d'équilibre du champ thermique cette dernière est basée sur la loi du J. Fourier

La résolution de cette équation est très complexe avec la méthode analytique, pour cela une analyse numérique sera préférable pour estimer la répartition de la température d'une structure. Il existe de nombreuses méthodes numériques, parmi elles on cite la méthode des différences finies ou la méthode des éléments finis ou conjointement.

Dans la méthode des différences finies, on remplace l'équation différentielle gouvernant le phénomène par une équation aux différences finies. Dans la méthode des éléments finis, on divise le volume en éléments finis connectés en des points appelés nœuds. Dans chacun de ces éléments, une hypothèse est faite sur le champ de températures. En utilisant des considérations théoriques parallèles à celles utilisées en calcul des structures, on aboutit à un système d'équations différentielles non linéaire, dans lequel les températures aux nœuds entre éléments finis sont les inconnues.

CHAPITRE V:

COMPORTEMENT D'UN MUR EN BETON-ARME AU FEU.



V-1 INTRODUCTION :

L'utilisation des murs en béton armé, s'est aujourd'hui généralisée dans les constructions industrielles ou de stockage. L'objectif est d'obtenir des volumes plus importants, plus libres d'aménagement et facilitant la circulation des engins, comme dans le cas des bâtiments de logistique. Réalisés par coulage in situ ou par assemblage de panneaux préfabriqués, ces composants de la construction doivent obéir aux exigences de la réglementation incendie qui leur impose une tenue dont la durée varie en fonction de la nature et de l'utilisation des locaux. Il s'agit essentiellement d'empêcher la ruine de l'édifice avant que l'intervention des pompiers ait permis d'évacuer tous les occupants.

Le présent chapitre vise donc à enrichir les connaissances sur le comportement au feu de ce type de structure et à montrer la diminution de la résistance en fonction de l'évolution de l'intensité de l'incendie.

V-2 COMPORTEMENT AU FEU DES MURS EN BETON ARME [52] :**V-2 - 1 Stabilité au feu :**

La stabilité au feu implique de vérifier que pour une durée spécifiée et une action thermique donnée (par exemple 1 h sous action thermique conventionnelle), la structure porteuse est capable de reprendre les charges auxquelles elle est soumise. La combinaison des charges (charges gravitaires, climatiques et exploitation) est spécifique à l'état limite ultime accidentel de type incendie.

On s'intéresse :

- soit à chaque élément séparément (poutre, poteau, mur) ;
- soit à une structure partielle ou complète (portique).

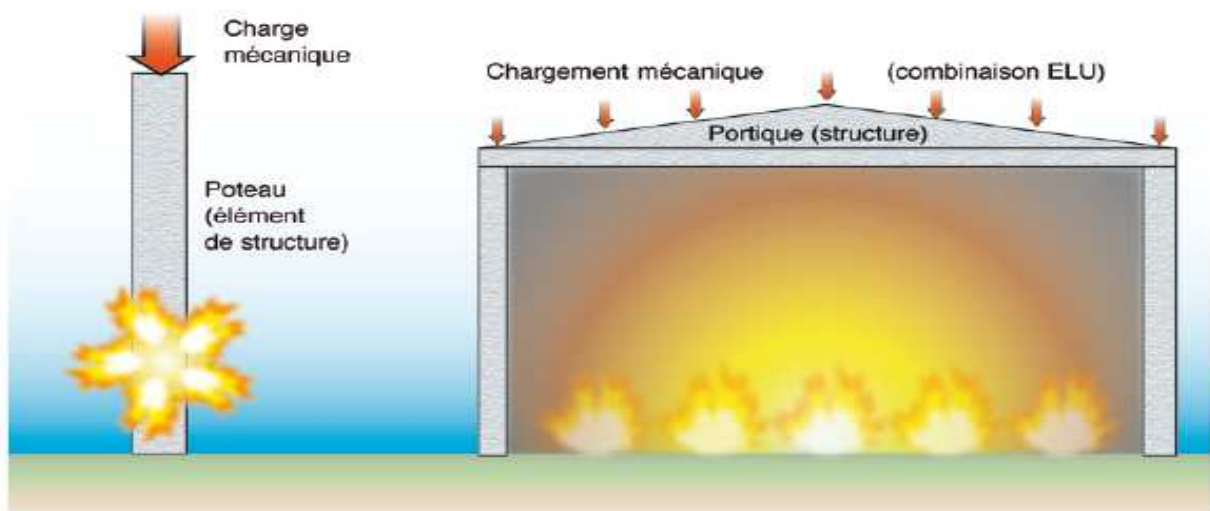


Figure 5-1 : stabilité au feu d'un élément isolé et d'une structure [52]

Généralement, les panneaux de couverture reposent directement sur les pannes. Les pannes sont posées de façon isostatique sur les poutres principales. Les pannes qui ne participent pas directement à la stabilité de la structure ne sont pas concernées par les vérifications de stabilité au feu. En effet, il est admis que lorsqu'elles sont exposées à des températures très élevées, les zones situées en dessous présentent des conditions de tenabilité (fumée, températures) excluant la présence des occupants. En revanche, les pannes qui appartiennent au système de contreventement font partie des éléments de structure. Dans ce cas, leur stabilité est indispensable à la stabilité au feu de l'ensemble de l'ouvrage, elle doit donc être vérifiée.

Dans le cas de la sollicitation conventionnelle, la durée de stabilité au feu est fixée réglementairement. Tous les éléments de la structure sont exposés à la même action thermique. Elle représente une enveloppe des actions pouvant solliciter la structure. Elle est généralement appliquée de façon uniforme à l'ensemble des éléments de la structure situés à l'intérieur d'un compartiment fermé par des parois coupe-feu. En particulier, les entrepôts sont généralement constitués de cellules séparées par des murs coupe-feu. On applique alors l'action thermique conventionnelle à tous les éléments de la cellule. Les éléments mitoyens (mur coupe-feu) sont sollicités d'un seul côté.

Dans le cas d'une sollicitation de type feu naturel, la sollicitation peut ne pas être uniforme (feu localisé par exemple). La durée de stabilité au feu de la structure doit être compatible avec d'autres objectifs de sécurité, c'est-à-dire :

- être supérieure à la durée d'évacuation des occupants ;
- être supérieure au délai d'intervention des secours ;
- être compatible avec les critères liés au compartimentage (stabilité des murs coupe-feu ou des planchers, en cloisonnement des escaliers).

V-2 - 2 Absence de ruine en chaîne :

Dans le cas de l'action thermique conventionnelle, la durée de stabilité de la structure est imposée. L'ensemble de la structure devant être stable au feu, le critère d'absence de ruine en chaîne n'est pas considéré. Lorsqu'on considère des actions thermiques de type feu naturel, le critère d'absence de ruine en chaîne doit être vérifié.

Un incendie se déclarant à l'intérieur d'une cellule ne doit pas provoquer la ruine de la structure porteuse dans un autre endroit de l'entrepôt. Cet objectif vise à préserver la sécurité des équipes d'interventions qui pourraient entrer dans l'entrepôt et des occupants n'ayant pas pu évacuer rapidement dans les zones éloignées du foyer. Ainsi une ruine locale éventuelle de la structure au droit de l'incendie ne doit pas conduire à mettre en danger les autres parties de l'entrepôt, non soumises à l'incendie. Les critères associés à l'absence de ruine en chaîne se vérifient pour chaque cellule pour toute la durée de l'incendie et impliquent le non-effondrement des murs séparatifs. Pour simplifier, on peut dire que la ruine de la structure

d'une cellule ne doit pas entraîner la ruine des cellules adjacentes.

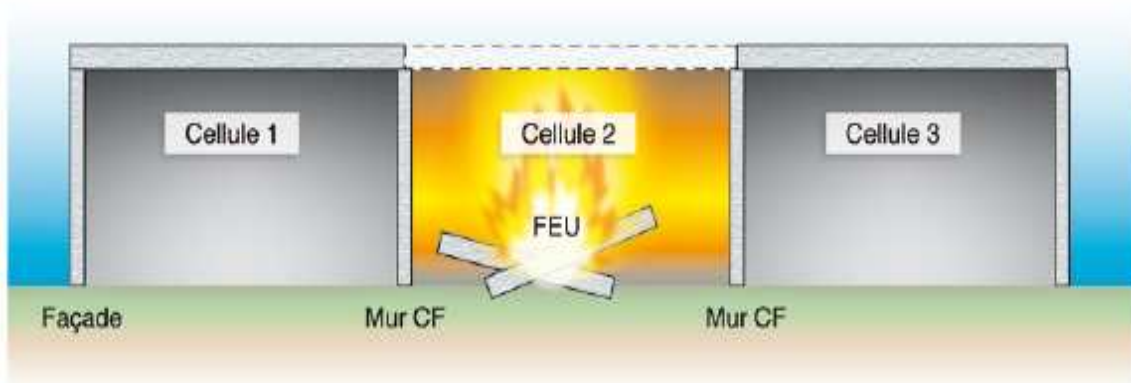


Figure 5-2 : schéma de principe illustrant l'absence de ruine en chaîne d'une structure Portique comprenant trois cellules [52]

V-2 - 3 Non Effondrements vers l'extérieur :

Dans le cas de l'action thermique conventionnelle et d'une durée de stabilité imposée, l'ensemble de la structure doit être stable au feu, le critère de ruine vers l'extérieur des éléments de structure pendant cette durée n'est donc pas considéré. Lorsqu'on prend en compte des actions thermiques de type feu naturel, le critère de non-effondrement vers l'extérieur doit être vérifié. Un incendie se déclarant à l'intérieur d'une cellule ne doit pas provoquer l'effondrement des façades vers l'extérieur de l'entrepôt. Cet objectif vise à préserver la sécurité des équipes de secours situées à l'extérieur du bâtiment.

Une ruine locale d'éléments de structure, par exemple la structure de la façade au droit de l'incendie, ne doit pas conduire à mettre en danger les personnes éventuellement présentes à l'extérieur de l'entrepôt (service de secours par exemple). Il est alors nécessaire d'évaluer la cinématique de ruine, c'est-à-dire la direction vers laquelle l'élément de structure vertical va s'effondrer. Les critères associés au non-effondrement vers l'extérieur se vérifient pour chaque façade et pour toute la durée de l'incendie.

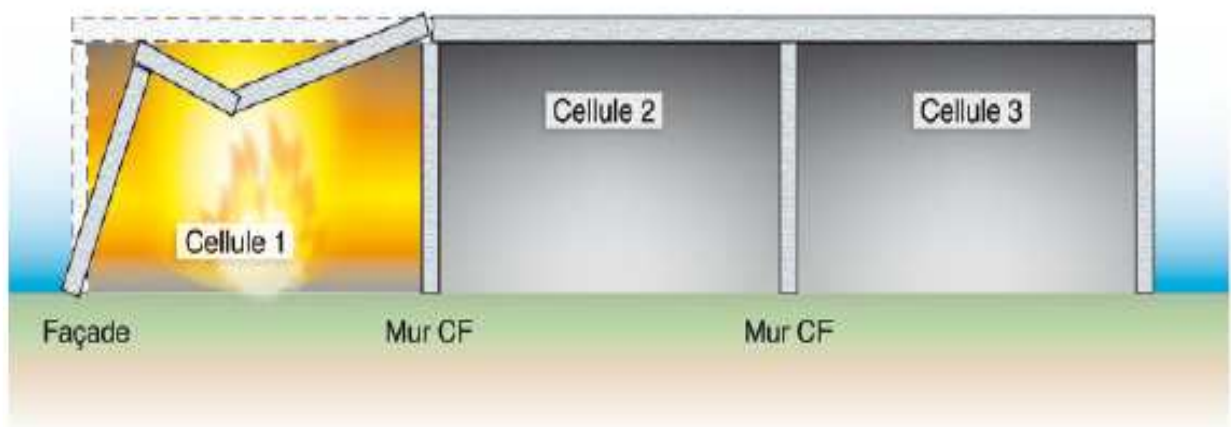


Figure 5-3 : schéma de principe illustrant le non-effondrement vers l'extérieur de la façade [52]

Parmi les facteurs intervenant dans la satisfaction de ce critère, on compte les charges appliquées à la structure, en particulier les charges qui provoquent des moments de flexion dans les poteaux (poids des auvents, charges excentrées), l'effet des gradients thermiques (exposition au feu non uniforme de la section), les déplacements du reste de la structure ainsi que l'efficacité des liaisons entre éléments. En particulier dans le cas courant des poteaux, on étudiera avec attention la liaison en tête entre le poteau et le reste de la structure. En effet, le comportement de cette liaison dans le temps influence beaucoup le sens de ruine de la façade. Par exemple, si les poutres s'effondrent avant les poteaux et si la liaison poteau poutre reste maintenue durant l'incendie, il est possible de démontrer que la poutre va entraîner le poteau dans son effondrement vers l'intérieur du bâtiment. En l'absence de liaison (poteau libre en tête), l'effet du gradient thermique dans la section du poteau est à étudier en détail car il peut entraîner la déformation du poteau vers l'extérieur (côté opposé au feu) et provoquer sa ruine par perte de stabilité (effet de l'excentricité des charges).

V-2 - 4 Compartimentage :

Le compartimentage [53] a pour but d'éviter l'extension et la propagation des flammes, fumées et gaz tant à l'intérieure qu'à l'extérieure de l'entrepôt. Pour ce faire on va créer des obstacles qui vont s'opposer à la propagation des flammes et fractionner les bâtiments en unité distincte avec des murs coupe-feu, des portes et des rideaux coupe-feu.

Les principales actions du compartimentage sont :

- La préservation des personnes (permettre la circulation des occupants malgré les flammes et fumées).
- La préservation des marchandises et produits (éviter le développement de l'incendie à tous le stockage en limitant le volume des zones),
- La préservation du voisinage (éviter la propagation de l'incendie aux locaux ou bâtiments contigus).

L'extension d'un début d'incendie sera limitée en compartimentant chaque bâtiment ou secteur :

- Horizontalement par des auvents extérieurs en saillie, par des planchers de résistance au feu appropriée...
- Verticalement par des murs, des cloisons et des portes résistantes au feu.

Afin de limiter les risques de propagation d'incendie dans un même établissement, les assureurs ont établi des règles techniques privées et contractuelles portant notamment sur la construction des bâtiments. Parmi elles les règles [55] d'APSAD (R15 qui concerne les ouvrages séparatifs coupe-feu et leurs règles de constructions, et R16 qui concerne les portes coupe-feu et leurs règles d'installations).

Les éléments de compartimentage sont :

V-2 - 4 -1 Murs séparatifs coupe-feu (MSCF):

Les murs séparatifs coupe-feu (MSCF) [54] dans les bâtiments industriels et entrepôts sont des systèmes constructifs destinés à séparer les locaux d'un bâtiment et à limiter la

propagation du feu en cas d'incendie. La mise en œuvre d'un mur séparatif coupe-feu doit répondre à des exigences réglementaires qui consistent à préserver les vies humaines dans les meilleures conditions en facilitant l'évacuation des personnes ainsi que l'intervention des pompiers. Ces exigences font appel à trois critères de base (EN1992-1-2, 2004) :

La résistance mécanique, symbolisée par « **R** », l'isolation thermique par le critère « **I** » et l'étanchéité aux flammes par le critère « **E** ». Les règles R15 et R16 font référence aux notions suivantes :

- **M** : Action mécanique = aptitude de l'élément à résister à un impact.
- **C** : Fermeture automatique = aptitude d'une porte ou d'une fermeture à se fermer automatiquement en obturant une fermeture.

Ce mur est défini par l'article 2.1et classé REI 240 et éventuellement REI 240 -M (action mécanique) s'il doit résister à la chute d'objets (par exemple des racks dans un entrepôt). Il est réalisé en matériaux classés A_1 ou A_2 (classement européen) ; M_0 (classement français).

Un mur séparatif coupe-feu en éléments préfabriqués en béton est constitué en général de panneaux préfabriqués en béton, associés ou non à d'autres éléments de structure tels que des poteaux (encastrés dans des fondations) et des poutres. Il doit être vertical de la base au faite, sans décrochement dans le plan vertical. Il ne comporte pas de décrochements dans le plan horizontal à moins que les angles soient renforcés. Il est autostable et non porteur (sauf si les charges supportées le sont par des corbeaux ou consoles par l'intermédiaire d'appuis glissants n'entraînant pas l'effondrement du MSCF en cas de chute).

MSCF : DÉPASSEMENTS

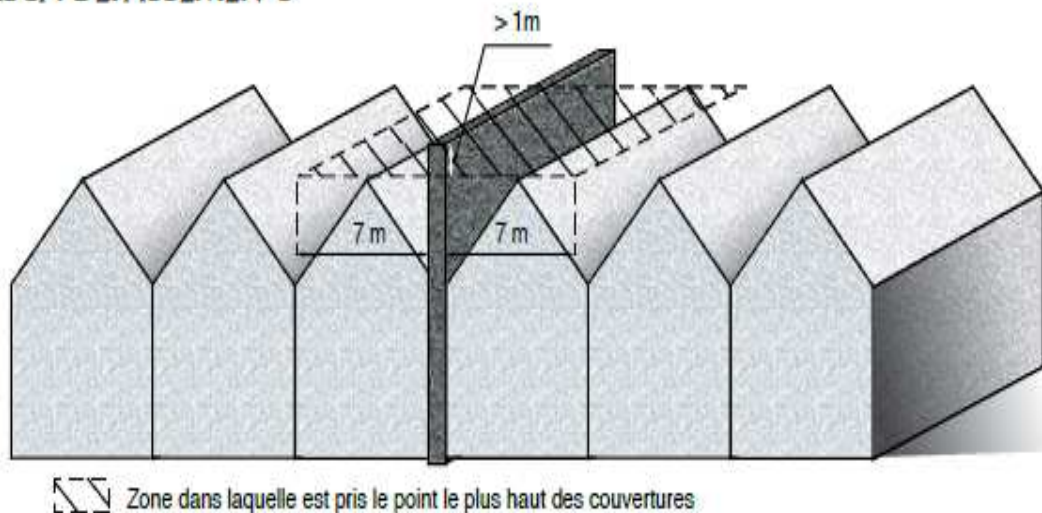
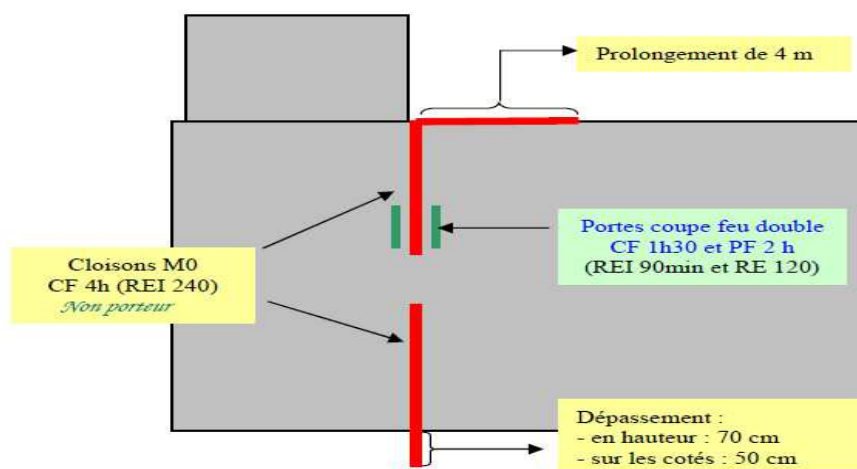


Figure 5-4 : schéma du principe dépassement en toiture [54]

Plusieurs modalités de dépassement sont exigées :

- dépassement en toiture : 1,00 m (par rapport au point le plus haut des couvertures situées dans une zone de 7,00 m de part et d'autre du MSCF, sauf cas particulier) ;
- dépassement latéral : 0,50 m par rapport au nu extérieur de la façade ;
- dépassement latéral : 4,00 m en cas d'angle à 90° entre bâtiments.

Ces caractéristiques rendent très difficile la réalisation d'un MSCF dans un bâtiment existant.



V-2 - 4 -2 Murs coupe-feu (M.C.F) :

Ce mur [54] est défini par l'article 3.1 et s'inspire plus particulièrement de l'arrêté du 5 août 2002 relatif à la prévention des sinistres dans les entrepôts couverts. Il a pour objet de « séparer deux bâtiments ou deux parties d'une même construction de façon à prévenir la propagation incendie d'une cellule de stockage à l'autre. »

Il est classé REI 120 et réalisé en matériaux classés M₀. La ruine d'un élément suite à un sinistre ne doit pas entraîner la ruine en chaîne de la structure du bâtiment.

Plusieurs modalités de dépassement sont exigées :

- dépassement en toiture : 1,00 m (par rapport au point le plus haut des couvertures situées dans une zone de 7,00 m de part et d'autre du M.S.C.F, sauf cas particulier) ;
- dépassement latéral : 0,50 m par rapport au nu extérieur de la façade si celles-ci n'ont pas de degré 1 heure (REI 60).

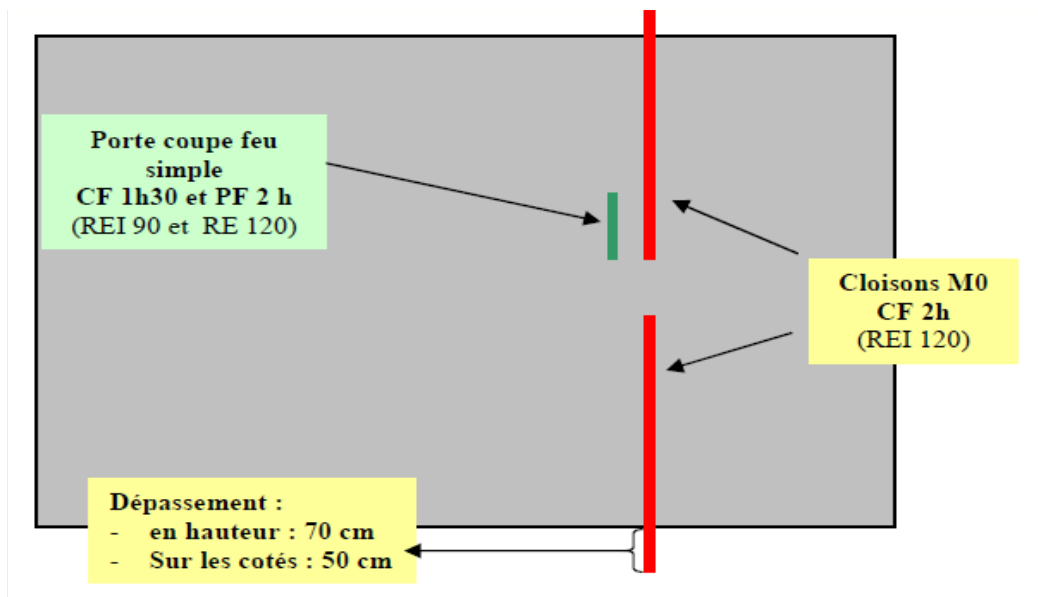
V-2 - 4 -3 Murs séparatif ordinaire (M.S.O) :

Ce mur est défini par l'article 4.1 et a pour objet de « constituer une ligne naturelle de défense contre l'incendie, sur laquelle les services de secours peuvent s'appuyer pour limiter la propagation du feu. »

Ce mur est classé REI 120 et éventuellement REI 120-M (action mécanique). Il doit être vertical de la base au faite, sans décrochement dans le plan vertical. Il ne comporte pas de décrochements dans le plan horizontal à moins que les angles soient renforcés. Il peut être porteur et doit conserver sa stabilité en cas de chute des charges supportées (charges supportées par des corbeaux ou consoles par l'intermédiaire d'appuis glissants n'entraînant pas l'effondrement du M.S.O en cas de chute ou si l'encastrement de la charge supportée permet la conservation du degré de résistance au feu du mur).

Plusieurs modalités de dépassement sont exigées.

- Dépassement en toiture : 1,00 m ou néant si le mur vient en sous-face d'une dalle béton en couverture (type toiture-terrasse) ou si la toiture est en matériaux de classe M_0 sur une zone de 5,00 m de part et d'autre du M.S.O Plusieurs configurations sont traitées dans la règle R15.
- Dépassement latéral : 0,50 m par rapport au nu extérieur de la façade ou néant si le mur est constitué de matériaux de classe (A_1 ou A_2) ou bien M_0 sur une zone de 2,50 m de part et d'autre du M.S.O.
- Dépassement latéral : 4,00 m en cas d'angle à 90° entre bâtiments. Ne devant pas nécessairement dépasser en toiture, le M.S.O peut aisément être réalisé dans un bâtiment existant.



V-2- 4 -4 Le Compartiment à l'épreuve du Feu (C.E.F) :

Cet ouvrage est défini par l'article 5.1 et a pour objet « d'isoler, à l'intérieur d'un bâtiment, une activité ou un stockage aggravant. »

Les parois doivent être EI 90 ou REI 90 et réalisées en matériaux de classes M_0 . Le local doit présenter la configuration suivante : surface $\leq 250 \text{ m}^2$;

- Profondeur maximale (par rapport à la façade) : 15 m ;
- Implantation au rez-de-chaussée (sous-sol accepté si accès des secours possible) ;
- Une façade donnant sur l'extérieur (accès direct) ;
- Plancher bas en béton armé ou matériaux incombustibles, étanche (liquides inflammables) ;
- Structures et éléments de construction traversant le C.E.F acceptés si E 90 ou REI 90 ;
- Hauteur « h » au-dessus du linteau $\geq 2,00 \text{ m}$ ou distance $h + h' \geq 2,00 \text{ m}$ (h' : distance horizontale par rapport au plan de la façade du C.E.F) ;
- Pas de dépassement en toiture si plancher haut en dalle béton (type toiture-terrasse) ou matériaux de classes M_0 ;
- Dépassement latéral : 0,50 m ou néant si mur EI 60 en matériaux sur une zone de 2,00 m sans ouverture.

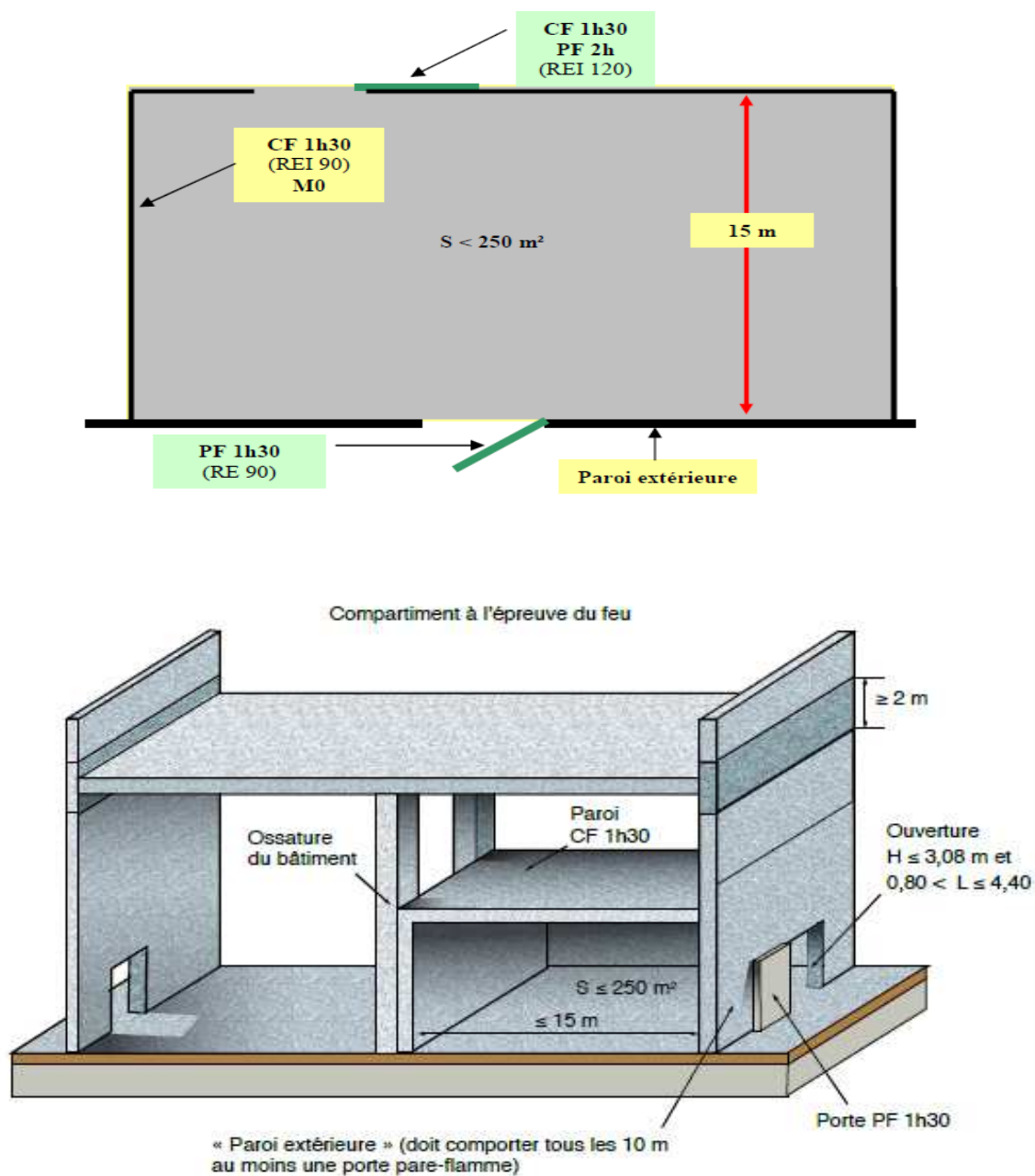


Figure 5-5 : Schéma d'un système constructif de compartiment à l'épreuve du feu. [54]

V-2 - 4- 5 Les Portes coupe-feu :

Les portes devront être Par Flamme 2 h (E 120) et Coupe-feu 1 h 30 (EI 90). [12] Dans les locaux industriels, les portes coupe-feu (simples ou doubles) doivent présenter les caractéristiques dimensionnelles maximales suivantes :

- Porte à un seul vantail : largeur $\leq 1,00$ m ;
- Porte à deux vantaux : $1,00$ m < largeur $\leq 2,00$ m ;
- Porte pivotante à un vantail : largeur $> 2,00$ m ;
- Portes coulissantes : $3,80$ m x $4,40$ m hauteur. Les précautions suivantes devront être prises :

CHAPITRE V : Comportement au feu d'un mur (refend) en béton armé

- Prévoir un dispositif de protection physique de la P.C.F et de sa zone de fermeture et, le cas échéant, de débatement (poteaux métalliques pleins, armature grillagée, contre-mur en maçonnerie, etc.) ;
- Réserver un espace libre périphérique de 1,00 m. La conception et la pose de ces portes doivent répondre aux prescriptions définies dans le document APSAD (R 16)

Lorsqu'une pollution des matériels, matériaux, marchandises, est jugée possible par les fumées dégagées lors d'un incendie, il est recommandé d'asservir la fermeture des portes à une installation de détection ou à des détecteurs autonomes.

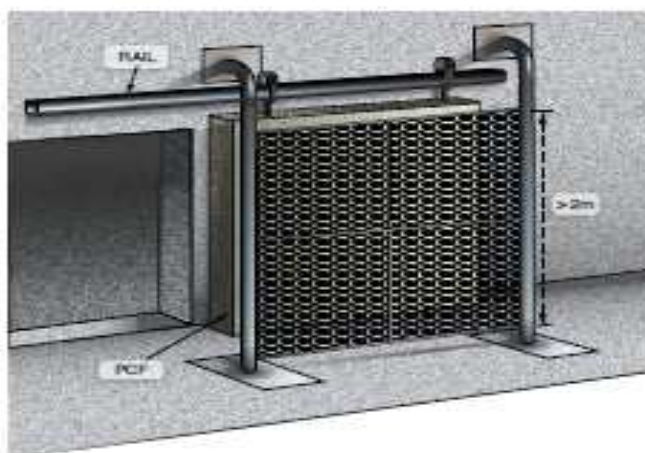


Figure 5-6 : Exemple de protection mécanique d'une porte coulissante. [54]



Figure 5-7 : Porte coupe feu dans hangar industrielle. [12]

V-3 Exemple d'application de résistance d'un refend en béton armé:

L'objectif de cet exemple est de considérer un état de déformation dans la section transversale d'un refend passant particulièrement par les pivots A et B, qui correspond à une exploitation maximale de résistance des matériaux (Béton – Acier dans la section du voile).

Le principe est que ; on suppose un voile en béton armé de dimensions et de ferrailages donnés, pour un état de déformation, on calcul les sollicitations reprises.

Le calcul des sollicitations (N ; M_G) qui peuvent être repris par le voile se fait d'abord à 20°C (température ambiante). Puis, on suppose, le même état de déformation cité précédemment et faire le calcul des sollicitations reprise par le voile dans un milieu d'incendie soumis à un feu normalisé ou non de telle sorte que la face exposée au feu est à une température de 600°C (Voir l'exemple cité dans le chapitre III figure 3-31) et que la face non exposée au feu est considérée dans le premier cas à une température ambiante (20°C) pour satisfaire l'hypothèse du principe du compartiment et dans le deuxième cas, la face non exposée au feu est à une température de 140°C relativement à la condition d'isolation thermique.

Pour le calcul de (N ; M_G), pour les conditions normal de température en utilise les caractéristiques des matériaux suivants les règlements B.A.E.L et dans un milieu d'incendie, on introduit les caractéristiques des matériaux présentés dans le chapitre III conformément au règlement en vigueur Eurocode 2 et 4 partie (1-2).

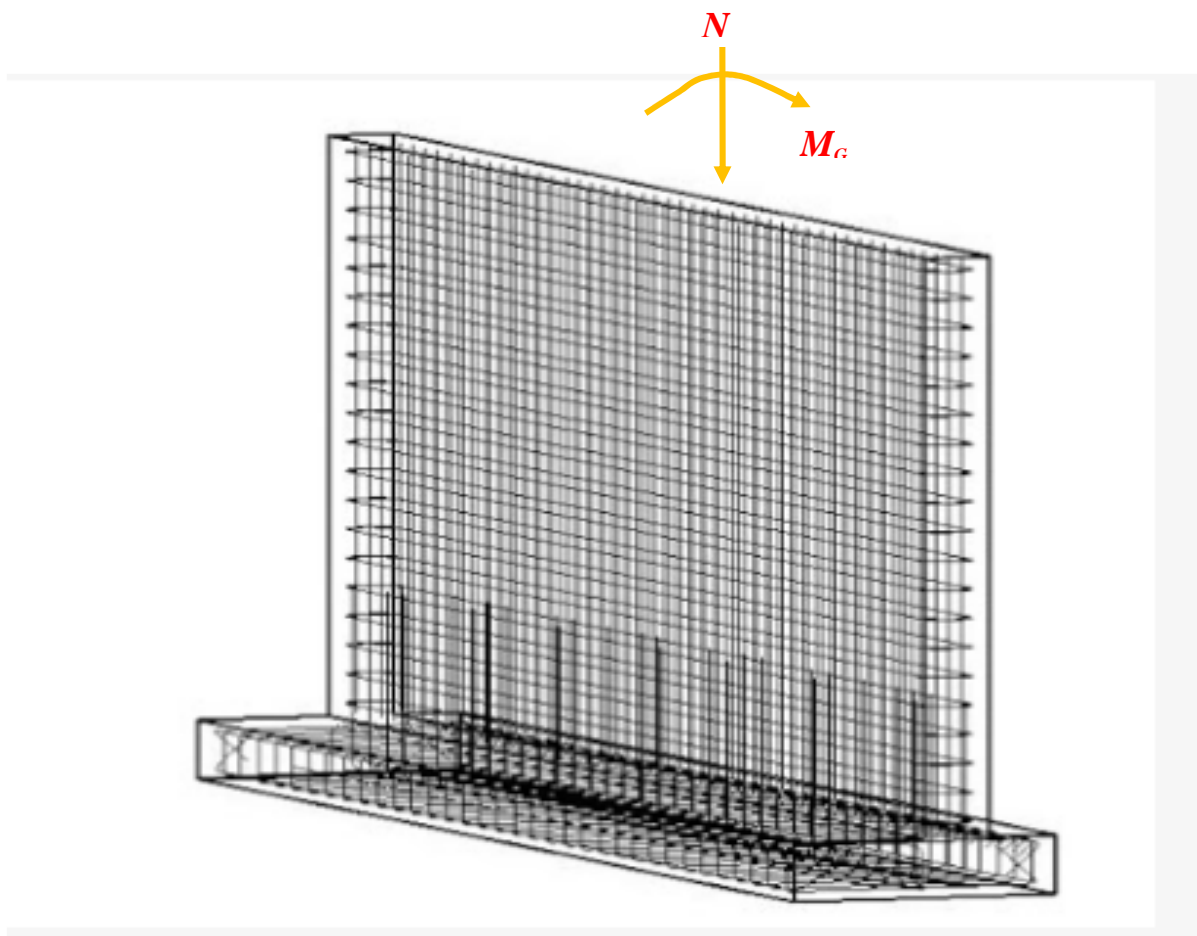


Figure 5-8 : Refend sous l'action des sollicitations /C.D.G (N ; M_G).

V-3 - 1 Caractéristiques géométriques :

Considérons un mur (refend) de compartimentage dans un hangar de stockage de longueur $L_{\text{voile}} = 4.92$ m et d'épaisseur $a = 0.2$ m, $B = L \times a = 0.984$ m², sollicité en flexion composée (section partiellement comprimée).

On se propose de déterminer l'effort Normale (N) et le moment de flexion (M_G) par rapport au centre de gravité, résultant à partir d'un diagramme de déformations.

Les sollicitations sont déterminées en supposant, le voile dans un milieu à température normale, puis refaire les calculs à températures élevées, en considérant une différence de température entre la face exposée au feu et la face non exposée, en tenant compte de quatre couches de variation de température à travers l'épaisseur du voile,

Matériaux utilisés (B.A.E.L) :

- Béton :

$f_{c28} = 25$ MPa valeur caractéristique de la résistance à la compression du béton

$E_b = 32164$ MPa module de Young instantané à 28 jours

$\nu = 0.2$ coefficient de poisson

$\rho = 2500$ kg/ m³

- Acier :

$F_e E 400 = 400$ MPa valeur caractéristique de la limite d'élasticité des aciers.

$E_s = 200\ 000$ MPa module de Young instantané à 28 jours

$\nu = 0.0$ coefficient de poisson

$\rho = 7850$ kg/ m³ masse volumique.

HA12 $\rightarrow A_s = 1.13$ cm² (Les armatures utilisées)

V- 3- 2 Hypothèses de calculs:

Pour un diagramme de déformation linéaire, on a les hypothèses suivantes :

- ♦ Les sections droites restent planes après déformation
- ♦ Pas de glissement relatif entre armatures et béton $\rightarrow \varepsilon_s = \varepsilon_b$
- ♦ Le béton tendu est négligé
- ♦ Le béton et acier ont un comportement élasto-plastique.
- ♦ l'aire des aciers est concentrée en son centre de gravité,
- ♦ le comportement de l'acier est défini par le diagramme contrainte-déformation bilinéaire et l'allongement relatif des armatures les plus tendues, supposées concentrées en leur centre de gravité, est limité à 10 %.
- ♦ Le comportement de béton est défini par le diagramme parabole-rectangle et les déformations limitées du béton est de 3.5% en flexion simple (ou composée), tant que la section n'est pas entièrement comprimée et de 2% en compression simple,
- ♦ La droite de déformation de la section doit obligatoirement passer par un des pivots A, B ou C (règle 3 pivots),

V- 3- 3 Principe de la règle des trois pivots :

La règle des trois pivots résume les trois états possibles des contraintes dans une section en béton armé.

- L'état des contraintes dans une section dont toutes les fibres sont entièrement tendues, la droite de déformations passe par le pivot A.
- L'état des contraintes dans une section dont une partie des fibres sont entièrement tendues et l'autre partie restante de la section est comprimée, les deux zones sont séparées par l'axe neutre, la droite de déformations passe par le pivot A d'un côté puis passe au pivot B.
- L'état des contraintes dans une section dont toutes les fibres sont entièrement comprimées, la droite de déformations passe par le pivot C.

Les diagrammes possibles résultent des déformations limites fixées pour les matériaux, d'où les trois domaines de la figure ci- dessous définis à partir des pivots A, B et C.

- Dans le domaine 1 : le diagramme passe par le point A qui correspond à un allongement de 10 ‰ de l'armature la plus tendue supposée concentrée en son centre de gravité.
- Dans le domaine 2 : le diagramme passe par le point B qui correspond à un raccourcissement de 3.5‰ de la fibre la plus comprimée.
- Dans le domaine 3 : le diagramme passe par le point C à un raccourcissement de 2‰ du béton à une distance de la fibre la plus comprimée égale à $\frac{3}{7}$ de la hauteur totale h de la section. Le bon fonctionnement de la section de Béton Armé se situe aux alentours de la droite passant par A et B, car les deux matériaux - acier et béton - travaillent *au mieux*.

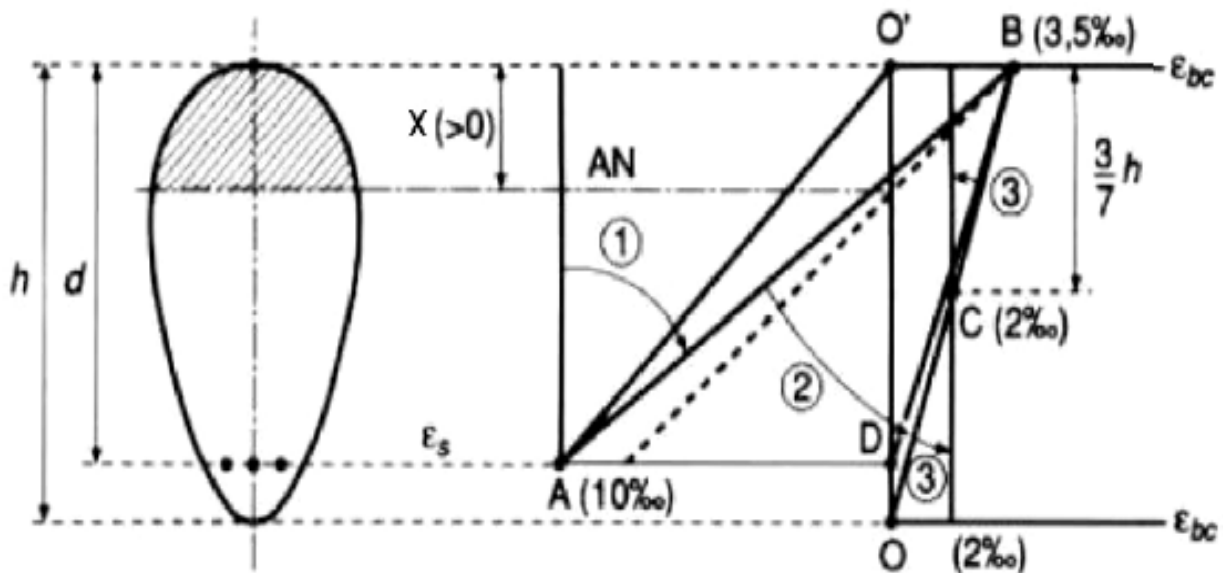


Figure 5-9 :- Définitions des différentes droites de déformations possibles à (ELU).

Pour le calcul à l'ELU, on suppose un état de déformation dans la section. Cette droite de déformation particulière passe par le pivot A et B. elle correspond à un allongement ultime de la fibre de l'acier tendue la plus éloignée de l'axe neutre dans la zone tendue et le raccourcissement ultime de la fibre la plus éloignée de l'axe neutre dans la zone comprimée

V- 3- 4 Méthodologie de calcul pour le dimensionnement du voile :

La méthode consiste à déterminer la position de l'axe neutre, pour la simplification de calcul avec comme supposition que ce dernier passe par le milieu de deux barres consécutifs. Puis trouver la longueur du voile équivalente à ce jorne de supposition, ainsi que le nombre de barre d'armatures.

Pour des raisons d'application numérique on opte pour :

- un espacement minimal moyen de ($e = 16\text{cm}$),
- un nombre d'espacements des barres constant $\{\forall e ; n_t \text{ et } n_c \in \mathbb{N}\}$.

L'hypothèse d'une exploitation optimale de la section efficace nous donne

$$L_{\text{voile}} = L_c + L_t + c \tag{5 -1}$$

ou :

c : l'enrobage

L_c : longueur de la zone comprimée par rapport à l'axe neutre

L_t : longueur de la zone tendue par rapport à l'axe neutre

L_{voile} : longueur Totale du voile

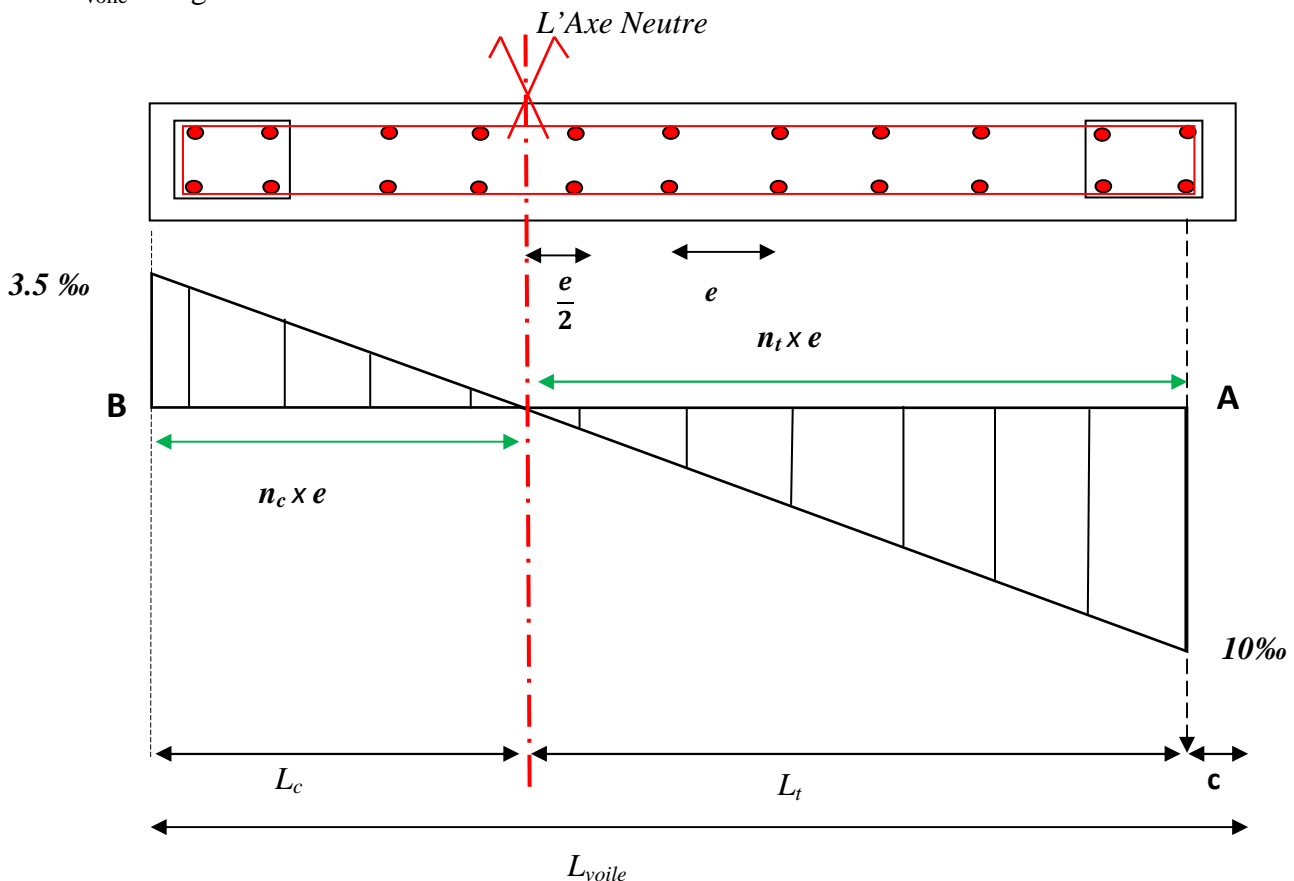


Figure 5 - 10 : Optimisation de la section du refend passant par les pivots (A et B) de la droite de déformation.

D'après le théorème de TALES, qu'on a appliqué sur le diagramme de (la figure 5-2) on a trouvé que :

$$\frac{L_c}{L_t} = \frac{3.5}{10} = 0.35 \quad \Leftrightarrow \quad L_c = 0.35 L_t \quad (5-2)$$

De la figure ci-dessus on a :

$$\begin{array}{l} L_c = n_c \times e + \frac{e}{2} + c \\ L_t = n_t \times e + \frac{e}{2} \end{array} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} L_c = (n_c + 0.5) e + c \\ L_t = (n_t + 0.5) e \end{array} \quad (5-3)$$

En remplaçant L_c et L_t par leurs valeurs dans l'équation (5-2) on trouve :

$$(n_c + 0.5) e + c = 0.35 [(n_t + 0.5) e] \quad (5-4)$$

Puisque nous avons $L_c = 0.35 L_t$

En multipliant l'équation (5-4) par 20, pour faire disparaître le 0.35 et trouver un nombre entier d'espacement des barres

$$\begin{aligned} &= 20[(n_c + 0.5) e + c] = 7 [(n_t + 0.5) e] \\ &= (20 n_c + 10) e + 20c = (7 n_t + 3.5) e \\ &= 20 n_c + 10 - 3.5 + 20 \frac{c}{e} = 7 n_t \quad \Leftrightarrow \quad n_t = \frac{1}{7} [20 n_c + 6.5 + 20 \frac{c}{e}] \end{aligned} \quad (5-5)$$

Après quelques vérification, on a déduit que si on fixe l'espacement entre les barres à 16 cm pour l'acier de (HA 12) , et un enrobage maximale de 6 cm, et le nombre d'espacement dans la partie comprimé du béton à 7 c.-à-d $n_c = 7$. Et on remplaçant dont (5-5) on trouve que le nombre d'espacement dans la partie tendu de l'Acier est de 22 c'est-à-dire : $n_t = 22$

En remplaçant n_c , n_t , e et c par leurs valeurs numérique dans l'équation (5-2)

$$\begin{aligned} L_c &= (7+0.5) 16 + 6 = 126 \text{ cm} \rightarrow 1.26 \text{ m} \\ L_t &= (22+0.5) 16 = 360 \text{ cm} \rightarrow 3.60 \text{ m} \end{aligned}$$

Donc :

$$L_{\text{voile}} = L_c + L_t + c \quad \Leftrightarrow \quad L_{\text{voile}} = 1.26 + 3.60 + 0.6 = 4.92 \text{ m} \quad (5-6)$$

Ou :

n_c : nombre de barre dans la zone comprimée.

n_t : nombre de barre dans la zone tendue.

e : espacement constant des barres

1^{ère} partie : CALCUL A TEMPERATURE AMBIANTE :

A- 1 Introduction :

Dans ce travail on présente une méthode indirecte de calcul aux états limites de déformation particulière passant par les pivots A et B qui correspond à une exploitation maximale des matériaux (Béton – Acier) dans la section du voile.

Pour la position de l'axe neutre choisit, On se propose de déterminer l'effort Normale (N) et le moment de flexion (M_G) par rapport au centre de gravité, résultant a partir du diagramme de déformations. Les sollicitations sont déterminées en supposant, le voile dans un milieu à température normale.

A- 2 Calcul des sollicitations pour les barres d'acier :

La section d'armature dans le béton est prise comme un pourcentage par rapport à la section du béton. A partir du pourcentage choisit la section d'armature est évaluée ainsi que le nombre des barres d'armature, ces barres sont supposées uniformément distribuées sur la longueur du voile.

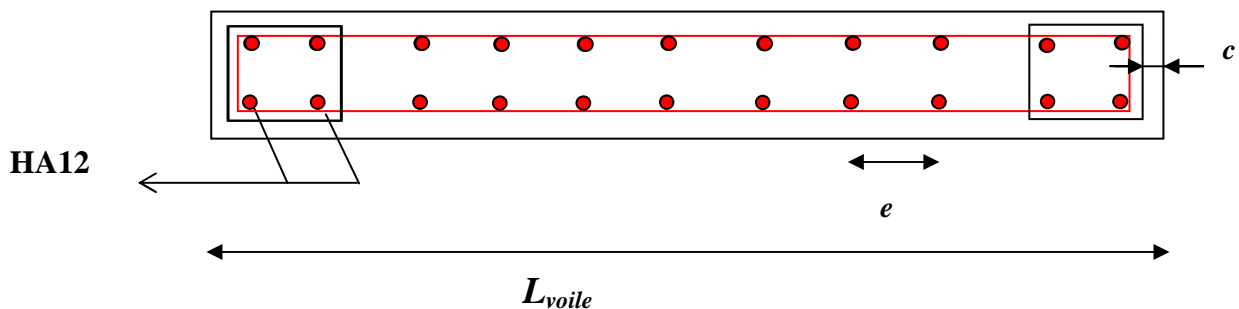


Figure 5 - 11 : Répartition des armatures dans le voile

2- 1 Calcul des distances « d_{si} » du centre du Centre de gravité des barres / Axe Neutre du voile, les valeurs sont récapitulées dans les tableaux (5-1) et (5-2)

2- 2 Evaluation des déformations relatives à chaque barre :

Le comportement de l'acier est défini par le diagramme contrainte-déformation conventionnel élasto-plastique considéré dans les vérifications des sections, qui est représenté précédemment à (la figure 3-5) du chapitre III.

$$\begin{cases} \varepsilon_i \leq \varepsilon_{se} \rightarrow \text{phase élastique} \\ \varepsilon_i \geq \varepsilon_{se} \rightarrow \text{phase plastique} \end{cases} \quad (5 - 7)$$

Avec :

$$\varepsilon_{se} = \frac{f_e}{E_s \gamma_s} \quad (5 - 8)$$

Ou :

ε_{se} : déformation correspondant à la limite élastique de l'acier

ε_{si} : déformation relative à la section de chacun des barres « i »

γ_s : est le coefficient de sécurité :

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_s = 1.15 \text{ (cas courants)} ; \\ \gamma_s = 1.00 \text{ (combinaisons accidentelles).} \end{array} \right.$$

Pour ce ces de température ambiante on prend ($f_e = 400 \text{ MPa}$; $E_s = 2.10^5 \text{ MPa}$; et $\gamma_s = 1.15$)

2-3 Principe de Calcul des contraintes relatives à chaque barre :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_i \leq \varepsilon_{se} \rightarrow \sigma_{es} = E_s \times \varepsilon_{si} / \gamma_s \quad (\text{phase élastique}) \\ \varepsilon_i \geq \varepsilon_{se} \rightarrow \sigma_{us} = f_e / \gamma_s = \text{cst} \quad (\text{phase plastique}) \end{array} \right. \quad (5-9)$$

AN:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_i \leq \varepsilon_{se} \rightarrow \sigma_{es} = E_s \times \varepsilon_{si} / \gamma_s = 2.10^5 \times \varepsilon_{si} / 1.15 \\ \varepsilon_i \geq \varepsilon_{se} \rightarrow \sigma_{us} = 400 / 1.15 = 348 \text{ MPa} = 34.8 \text{ KN/cm}^2 \end{array} \right.$$

Ou :

σ_{es} : est la contrainte limite élastique de l'acier.

σ_{us} : est la contrainte ultime de l'acier.

2-4 Calcul de la force reprise par chaque barre dans la zone comprimée et la zone tendue :

$$F_{si} = \sigma_{si} \times 2 A_s \quad (5-10)$$

Avec des barres de diamètre constant ($\phi = 12 \text{ mm}$) fixée au départ (ferraillage normal).

Avec : $A_s = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} = 1.13 \text{ cm}^2$ et comme dans notre cas on prend un lit de deux barres

$$A'_s = 2 A_s = 2 \times 1.13 = 2.26 \text{ cm}^2 \text{ Donc : } F_{si} = \sigma_{si} \times 2.26 \text{ cm}^2$$

2-5 Evaluation du Moment repris par chaque barre dans la zone comprimée et dans la zone tendue :

$$M_{si/AN} = F_{si} \times d_{si} \quad (5-11)$$

Ou :

F_{si} : force résultante interne dans chaque barre « i »

d_{si} : bras de levier par rapport à l'axe neutre de chaque barre « i »

Exemple d'application numérique :

❖ Phase élastique :

- Dans la zone tendue prenons la troisième barre qui se situe à une distance de 40 cm par rapport à l'axe neutre

$$d_{st3} = 0.40 \text{ m} = 40 \text{ cm}$$

- La déformation relative de cette barre est donnée par la formule suivante :

$$\varepsilon_{st3} = \frac{d_{st3}}{L_t} 10 \cdot 10^{-3} = \frac{0,4}{3,60} \times 10 \cdot 10^{-3} = 1,11 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{st3} = 1,11 \cdot 10^{-3} \text{ (voire la figure ci-dessous fig 5-12)}$$

- La contrainte relative de cette barre est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{st3} = E_s \times \varepsilon_{st3} / \gamma_s = 2 \cdot 10^5 \times 1,11 \cdot 10^{-3} / 1,15 = 193,04 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{st3} = 19,304 \text{ KN/cm}^2$$

- La force reprise par cette barre est donnée par la formule suivante :

$$F_{st3} = \sigma_{st3} \times 2,26 \text{ cm}^2 = 19,304 \times 2(1,13) = 19,304 \times 2,26 = 43,62 \text{ KN}$$

$$F_{st3} = 43,62 \text{ KN}$$

- Le moment fléchissant de la troisième barre N°3 par rapport à l'axe neutre est donnée par la formule suivante :

$$M_{st3} = F_{st3} \times d_{st3} = 43,62 \times 0,4 = 17,45 \text{ KN.m}$$

$$M_{st3} = 17,45 \text{ KN.m}$$

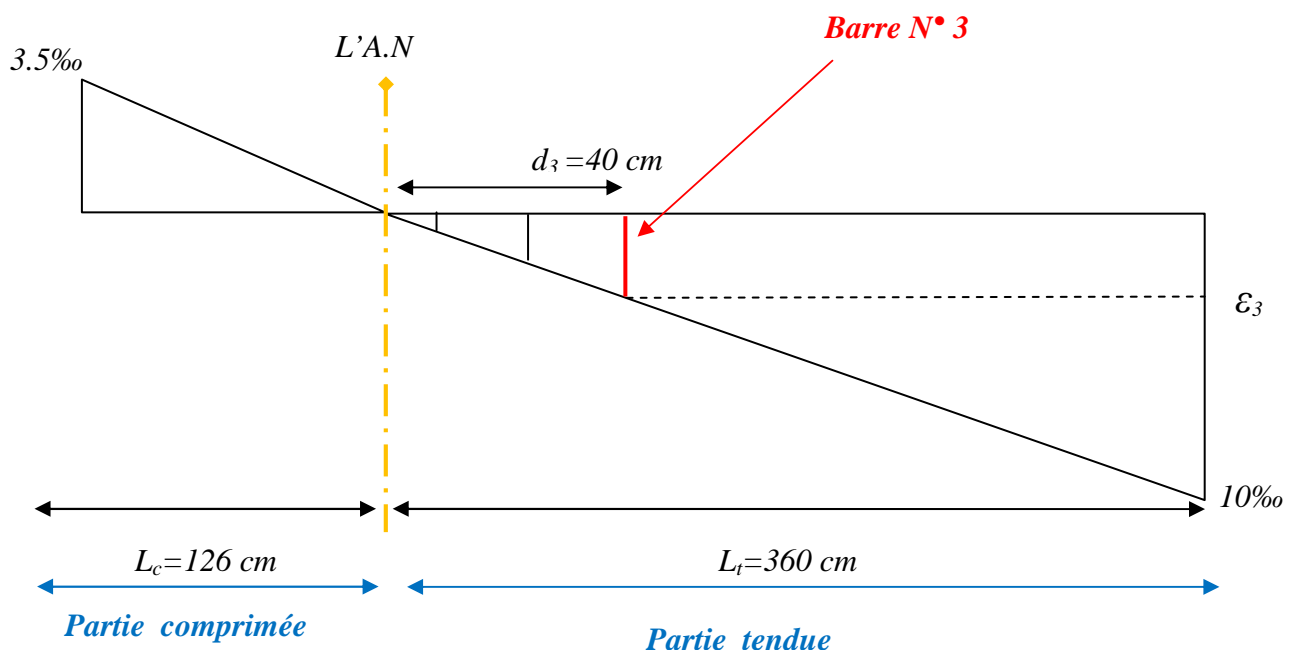


Figure 5 - 12 : détails de calcul de la déformation ε_3 pour la barre N°3 à partir du diagramme de déformations relatifs

❖ Phase plastique :

- Dans la zone tendue toujours prenons la sixième barre N°6 qui se situe à une distance de 88 cm par rapport à l'axe neutre.

$$d_{st6} = 0,88 \text{ m} = 88 \text{ cm}$$

- La déformation relative à cette barre est donnée par la formule suivante :

$$\varepsilon_{st6} = \frac{f_e}{E_s \gamma_s} = \frac{400}{2 \times 10^{-3} \times 1.15} = 1,74 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{st6} = 1,74 \cdot 10^{-3} \text{ (Voire la figure ci-dessous)}$$

- La contrainte relative à cette barre est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{st6} = f_e / \gamma_s = 400 / 1,15 = 348 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{st6} = 34,8 \text{ KN/cm}^2$$

- La force reprise par cette barre est donnée par la formule suivante :

$$F_{st6} = \sigma_{st6} \times 2,26 \text{ cm}^2 = 34,8 \times 2,26 = 78,65 \text{ KN}$$

$$F_{st6} = 78,65 \text{ KN}$$

- Le moment fléchissant de la barre N°6 par rapport à l'axe neutre est donnée par la formule suivante :

$$M_{st6} = F_{st6} \times d_{st6} = 78,65 \times 0,88 = 69,21 \text{ KN.m}$$

$$M_{st6} = 69,21 \text{ KN.m}$$

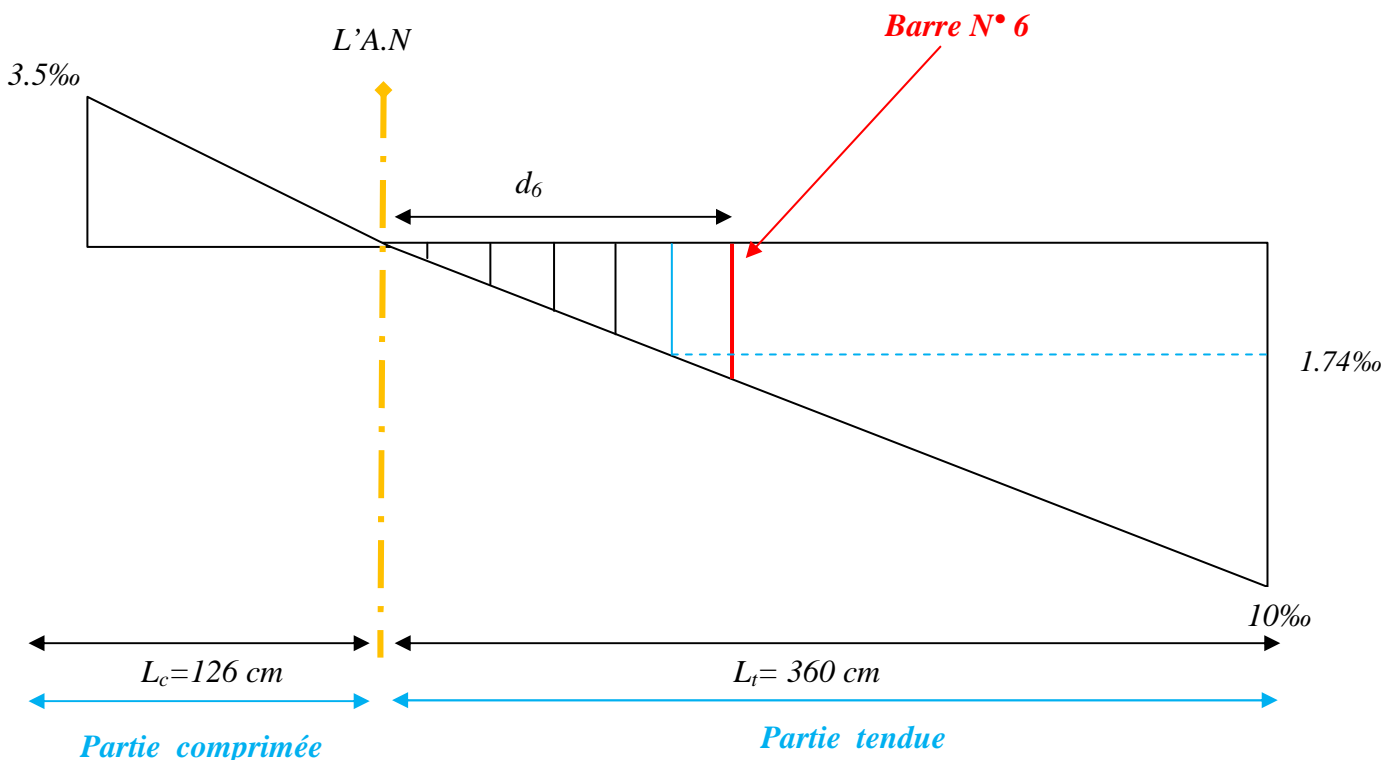


Figure 5 -13 : détails de calcul de la déformation ε_6 de la barre N°6 à partir du diagramme des déformations limite.

Remarque :

Même raisonnement pour les barres d'acier dans la zone comprimée.

2- 6 Evaluation des sollicitations résultantes ($M_{/AN}$; F) dans la zone comprimée du béton et la zone tendue de l'acier :

Dans les tableaux (5-1 et 5-2) qui suivent on a résumé tous les détails de calculs pour chaque barre et on a déduit les sollicitations résultantes internes dans chaque zone.

☛ Telle que dans la zone comprimée on a :

- $F_{sc} = \sum F_{sci}$ avec $F_{sci} = \sigma_{sci} \times A_s$ (5-12)

- $M_{sc/AN} = \sum M_{sci/AN} \rightarrow M_{sc/AN} = F_{sci} \times d_{sci} = \sigma_{sci} \times d_{sci} \times A_s$

		d_i [m]	$\epsilon_i \times 10^{-3}$ [-]	$\sigma_i (20^\circ C)$ [KN/cm ²]	F_{sci} [KN]	$M_{sci/AN},$ $\times (-1)$ [KN.m]
Les Aciers dans la Zone Comprimée.	Phase élastique	0,08	0,22	3,83	8,65	0,69
		0,24	0,67	11,65	26,33	6,32
		0,4	1,11	19,30	43,63	17,45
		0,56	1,56	27,13	61,31	34,34
	Phase plastique.	0,72	1,74	34,8	78,65	56,63
		0,88	1,74	34,8	78,65	69,21
		1,04	1,74	34,8	78,65	81,79
		1,2	1,74	34,8	78,65	94,38
		1,26	1,74	34,8	78,65	99,10
					$d_{sc} = M_{sc} / F_{sc} = 459.90 / 533.16 = 0.86 \text{ m}$	

Tableau 5- 1 : différentes valeurs de forces et moments des aciers dans la zone comprimée.

☛ Et dans la zone tendue de l'acier on a :

- $F_{st} = \sum F_{sti}$ avec $F_{sti} = \sigma_{sti} \times A_s$ (5-13)

$$- M_{st/AN} = \sum M_{sti/AN} \quad \rightarrow \quad M_{st/AN} = F_{sti} \times d_{sti} = \sigma_{sti} \times d_{sti} \times A_s$$

		d_i [m]	$\varepsilon_i \times 10^{-3}$ [-]	$\sigma_i (20^\circ C)$ [KN/cm ²]	F_{sti} [KN]	$M_{sti} \times (-1)$ [KN.m]
Les Aciers dans la zone Tendue.	Phase élastique.	0,08	0,22	3,83	8,65	0,69
		0,24	0,67	11,65	26,33	6,32
		0,4	1,11	19,30	43,63	17,45
		0,56	1,56	27,13	61,31	34,34
	Phase plastique	0,72	1,74	34,80	78,65	56,63
		0,88	1,74	34,8	78,65	69,21
		1,04	1,74	34,8	78,65	81,79
		1,2	1,74	34,8	78,65	94,38
		1,36	1,74	34,8	78,65	106,96
		1,52	1,74	34,8	78,65	119,54
		1,68	1,74	34,8	78,65	132,13
		1,84	1,74	34,8	78,65	144,71
		2,00	1,74	34,8	78,65	157,30
		2,16	1,74	34,8	78,65	169,88
		2,32	1,74	34,8	78,65	182,46
		2,48	1,74	34,8	78,65	195,05
		2,64	1,74	34,8	78,65	207,63
		2,8	1,74	34,8	78,65	220,21
		2,96	1,74	34,8	78,65	232,80
		3,12	1,74	34,8	78,65	245,38
3,28	1,74	34,8	78,65	257,97		
3,44	1,74	34,8	78,65	270,55		
3,6	1,74	34,8	78,65	283,13		
					$\sum F_{st} =$ 1634.24KN	$\sum M_{st} =$ 3286.51KN.m
					$d_{st} = M_{st}/F_{st} = 3286.51/1634.24$ = 2.01 m	

Tableau 5- 2 : différentes valeurs de forces et moments dans la zone tendu de l'acier.

Ou :

F_{sc} : force résultante interne dans la zone comprimée [KN]

F_{st} : force résultante interne dans la zone tendue [KN]

$M_{sc/AN}$: Moment fléchissant résultant dans la zone comprimée [KN.m]

$M_{st/AN}$: Moment fléchissant résultant dans la zone tendue [KN.m]

d_{sc} : bras de levier de la force résultante interne dans la zone comprimée par rapport à L'axe Neutre du voile [m].

d_{st} : bras de levier de la force résultante interne dans la zone tendue par rapport à L'axe Neutre du voile [m].

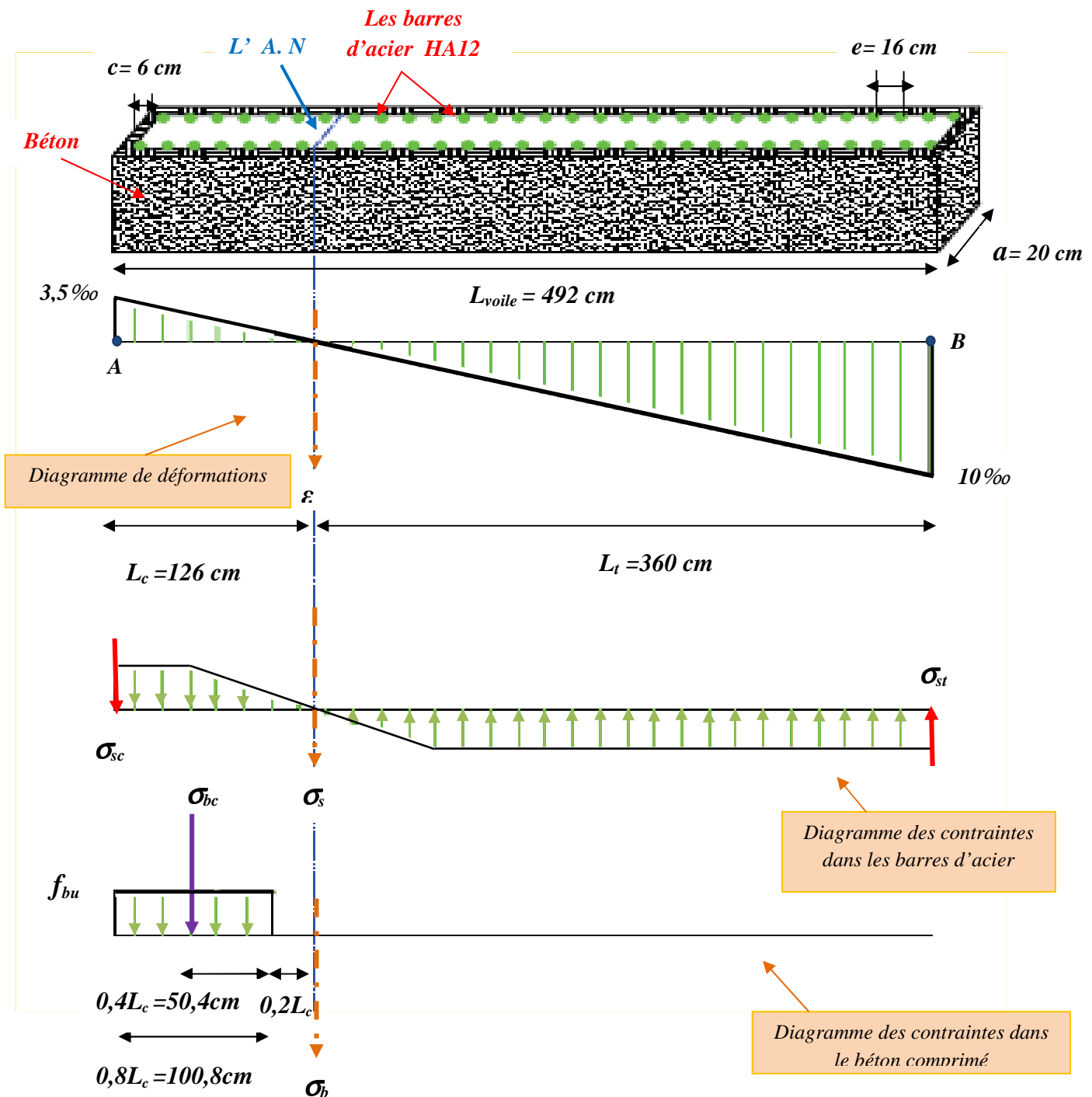
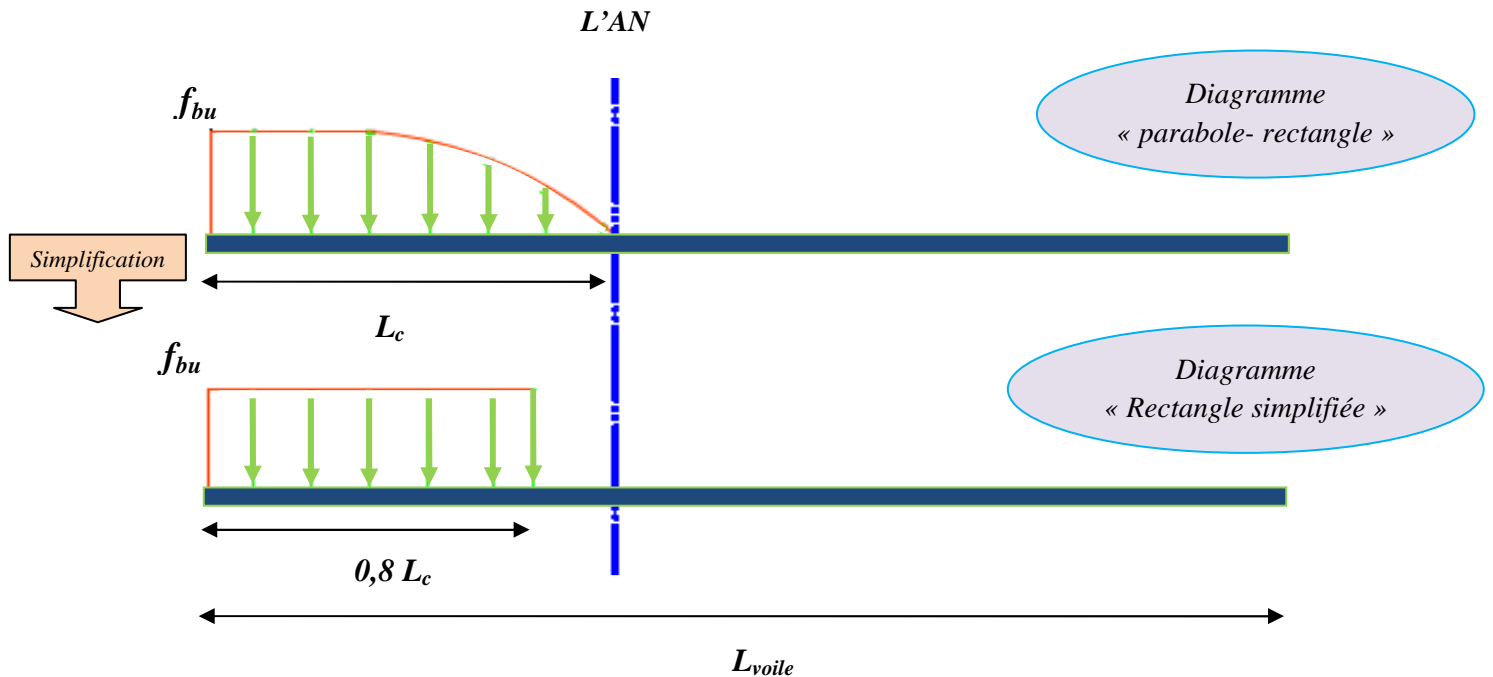


Figure 5 -14 : Diagrammes des contraintes dans chaque matériau

A- 3 Calcul des sollicitations pour la couche du béton :

Pour un état de déformation passant par les pivots A et B, Le diagramme contrainte-déformation utilisé est le diagramme parabole-rectangle qui définit la loi de comportement de béton représenté précédemment à la figure (3-3) du chapitre III.



3. 1- La déformation limite du béton qui correspond à l'état limite ultime de compression et la suivante

$$\epsilon_{bu} = 3.5 \times 10^{-3}$$

3. 2- La contrainte caractéristique du béton est donnée par la formule suivante :

$$f_{bu} = \frac{0.85 \times f_{c28}}{\theta \times \gamma_b} \quad (5-14)$$

Ou :

f_{c28} : Résistance caractéristique à la compression du béton.

f_{bu} : est la valeur de calcul de la contrainte du béton.

θ : coefficient qui dépend de la durée d'application des charges :

- $\theta=1$ si durée >24 h
- $\theta=0.9$ si 1 h < durée <24 h.

γ_b : est le coefficient de sécurité :

- $$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_b=1.5 \text{ (cas courants)} ; \\ \gamma_b=1.15 \text{ (combinaisons accidentelles).} \end{array} \right.$$
- ♦ Pour le cas courant du voile à température ambiante (20°C) on prend :

$$\{\theta=1 ; \gamma_b=1.5 ; f_{c28}= 25\text{MPa}\}$$

Application numérique :

$$f_{bu} = \frac{0.85 \times f_{c28}}{\theta \times \gamma_b} = \frac{0.85 \times 25.10^{-1}}{1 \times 1.5} = 1.41667 \text{ KN/cm}^2 \approx 1.42 \text{ KN/cm}^2 \quad (5-14a)$$

$$f_{bu} = 1.42 \text{ KN/cm}^2$$

- ♦ Pour le cas accidentel du voile à température ambiante (20°C) on prend :

$$\{\theta=1 ; \gamma_b=1.15 ; f_{c28}= 25\text{MPa}\}$$

Application numérique :

$$f'_{bu} = \frac{0.85 \times f_{c28}}{\theta \times \gamma_b} = \frac{0.85 \times 25.10^{-1}}{1 \times 1.15} = 1.847826 \text{ KN/cm}^2 \approx 1.85 \text{ KN/cm}^2 \quad (5-14b)$$

$$f'_{bu} = 1.85 \text{ KN/cm}^2$$

3. 3- Calcul de la force reprise par le béton comprimé :

$$F_{bc} = 0.8 L_c \times a \times f_{bu}$$

$$= 0.8 \times 126 \times 20 \times 1.42 = 2863 \text{ KN} \quad (5-15)$$

$$F_{bc} = 2863 \text{ KN}$$

Ou:

F_{bc} : la force résultante dans le béton comprimé.

a : l'épaisseur du voile qui est égale à 20cm.

3. 4- Calcul du moment fléchissant du béton comprimé par rapport à l'axe neutre :

$$M_{bc/AN} = F_{bc} \times d_{bc} \quad (5-16)$$

Avec:

$$d_{bc} = 0.8 \frac{L_c}{2} + 0.2 L_c$$

$$= (0.4+0.2)L_c = 0.6 L_c = 0.6 \times 126 = 75.6 \text{ cm}$$

$$d_{bc} = 75.6 \text{ cm}$$

donc :

$$M_{bc/AN} = 2863 \times (-0.756) = - 2164.43 \text{ KN.m}$$

$$M_{bc/AN} = - 2164.43 \text{ KN.m}$$

Ou:

$M_{bc/AN}$: est le moment du béton comprimé par rapport à l'axe neutre.

A- 4 Calcul des sollicitations résultantes reprise à (20°C) par rapport à L'axe neutre :

4- 1 L'effort Normale/ Axe-Neutre :

$$N = \sum F_i = F_{bc} + F_{sc} - F_{st} \quad (5-17)$$

$$= 2863 + 533.16 - 1634.24 = 1761.92 \approx 1762 \text{ KN}$$

Donc : $N_{\text{Axe Neutre}} = 1762 \text{ KN}$ (Effort de compression)

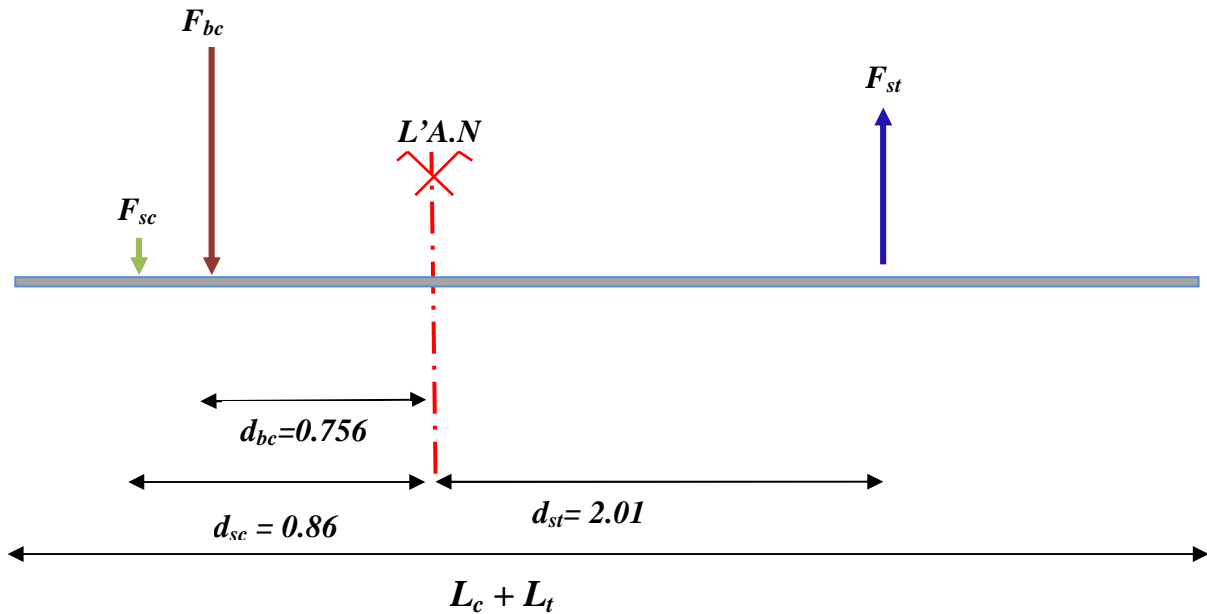


Figure 5 - 15 :- Diagrammes des forces à 20°C

4- 2 Moment fléchissant / Axe-Neutre :

$$M_{\text{Axe Neutre}} = \sum M_i = - M_{bc} - M_{sc} - M_{st} \quad (5 - 18)$$

$$= - 2164.43 - 459.90 - 3286.51$$

$$= - 5910.94 \approx - 5911 \text{ KN.m}$$

Donc : $M_{\text{Axe Neutre}} = - 5911 \text{ KN.m}$

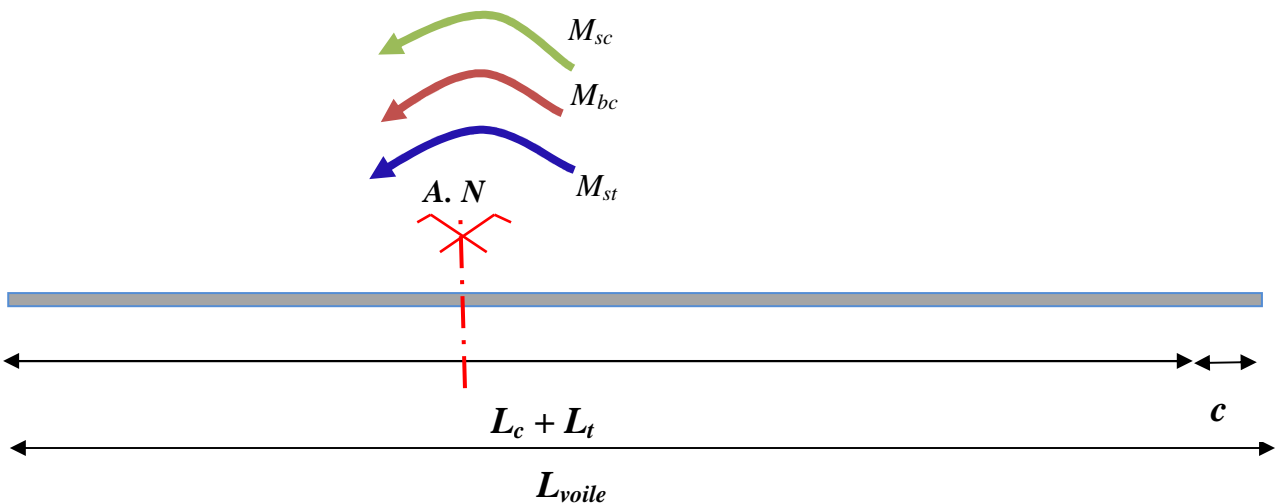


Figure 5 - 16 :- Diagrammes des Moments à 20°C

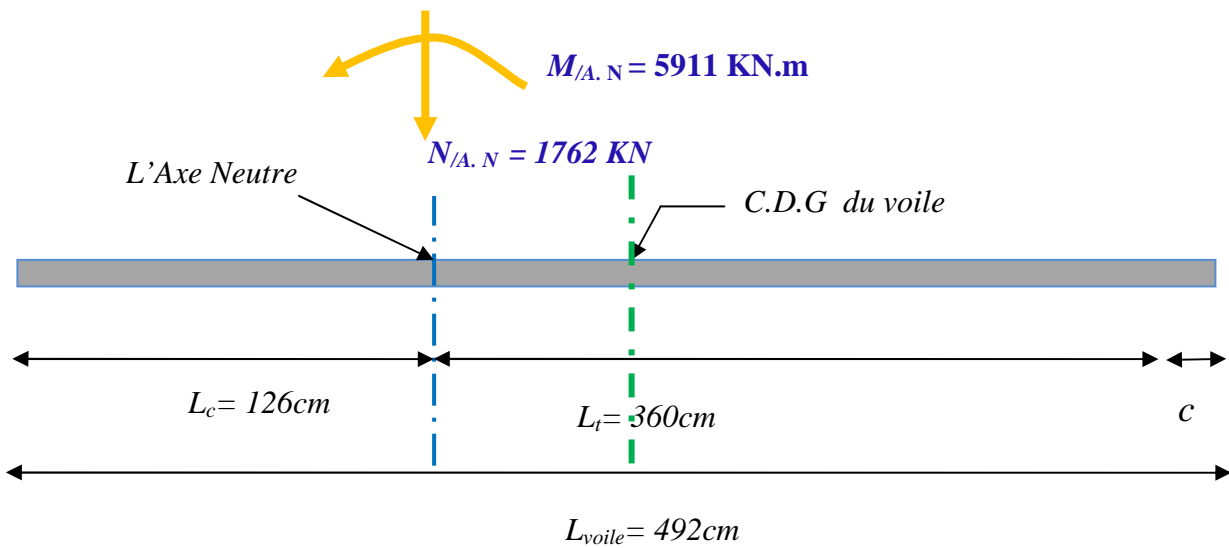


Figure 5 -17 : Diagramme résultant des sollicitations (Met N)
par rapport à l'Axe Neutre à 20C.

A- 5 Calcul de sollicitation résultante reprise à (20°C) par rapport au (C.D.G) du voile :

5- 1 L'effort Normale de compression / C.D.G :

$$N_{/C.D.G} = N_{/Axe\ Neutre} = 1762\ KN \quad (5-19)$$

5- 2 Moment fléchissant / C.D.G:

$$M_{/C.D.G} = N_{/Axe\ Neutre} \times \delta + M_{/Axe\ Neutre} \quad (5-20)$$

Avec :

$$\delta = (360+6) - 246 = 120\text{cm}$$

Donc :

$$M_{/C.D.G} = (-1762) \times 1.20 + (-5911)$$

$$= -2114.4 - 5911 = -8025.4\ KN.m$$

$$M_{/C.D.G} = -8025.4\ KN.m$$

$$N_{/C.D.G} = 1762\ KN$$

$$M_{/C.D.G} = -8025.4\ KN.m \quad (20^\circ C)$$

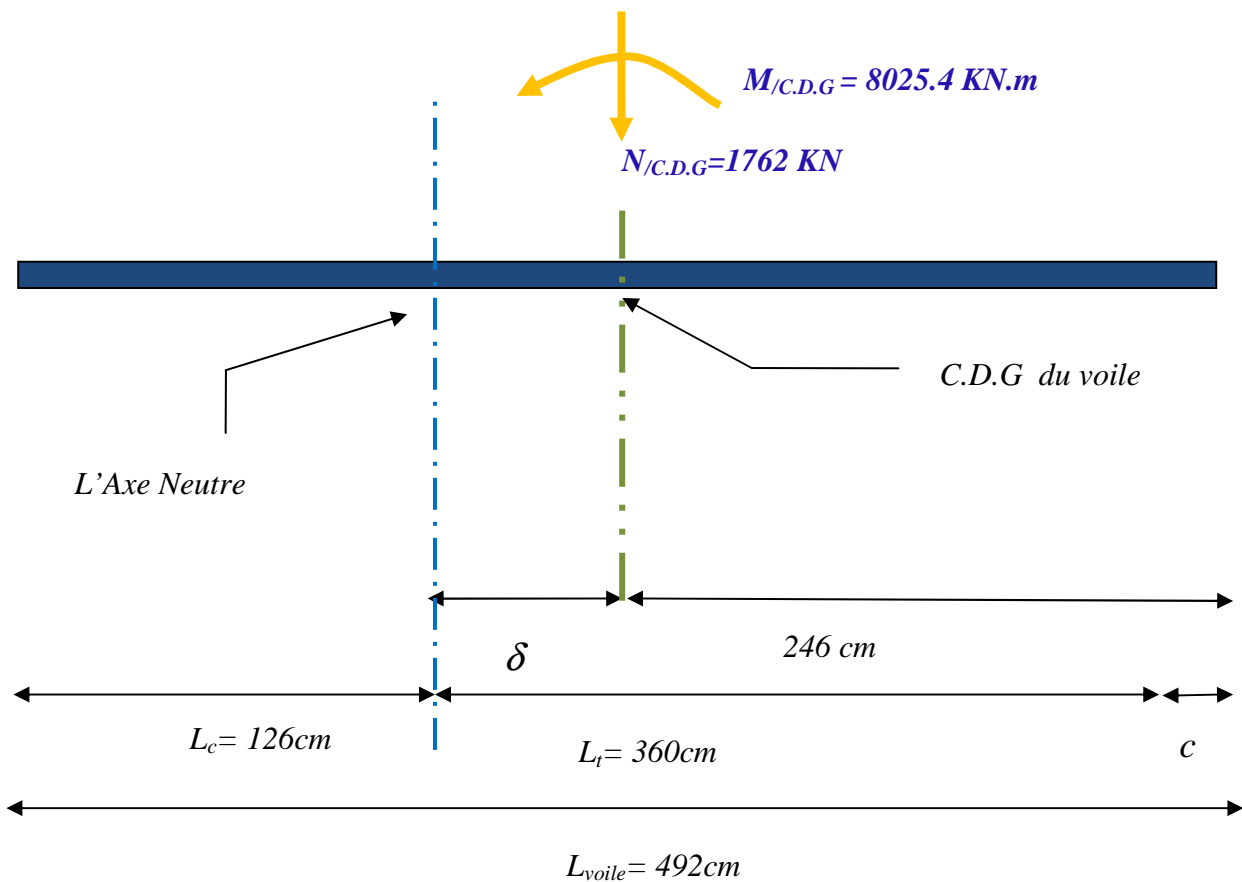


Figure 5 - 18 : Diagramme résultant des sollicitations (M_G et N) par rapport au C.D.G du voile.

2^{ème} Partie : CALCUL AU FEU :

Le but principal de cette partie est de déterminer la capacité résistante ultime de la section droite en béton armé dans un milieu à température élevée.

La procédure de calcul consiste d'abord à déterminer la distribution des températures dans la section droite, ensuite déterminer les sollicitations (effort Normal et moment de flexion) repris par le voile exposé au feu sur une seule face. Ce dernier se compose de deux cas, le premier consiste à faire les calculs dans le cas où le mur est soumis à une température de 600°C d'une seule face, et l'autre face non exposée la température reste à 20°C . Le second cas où on garde la même température pour la face exposée à l'incendie, et l'autre face non exposée la température est élevée à 140°C .

1^{er} Cas: On prend toujours le même voile de 4,90m de longueur et 20cm d'épaisseur on le soumet à un feu de 600°C sur une seule face et l'autre face reste à 20°C (température ambiante) puis on calcul des sollicitations (M_G ; N) à cette température.

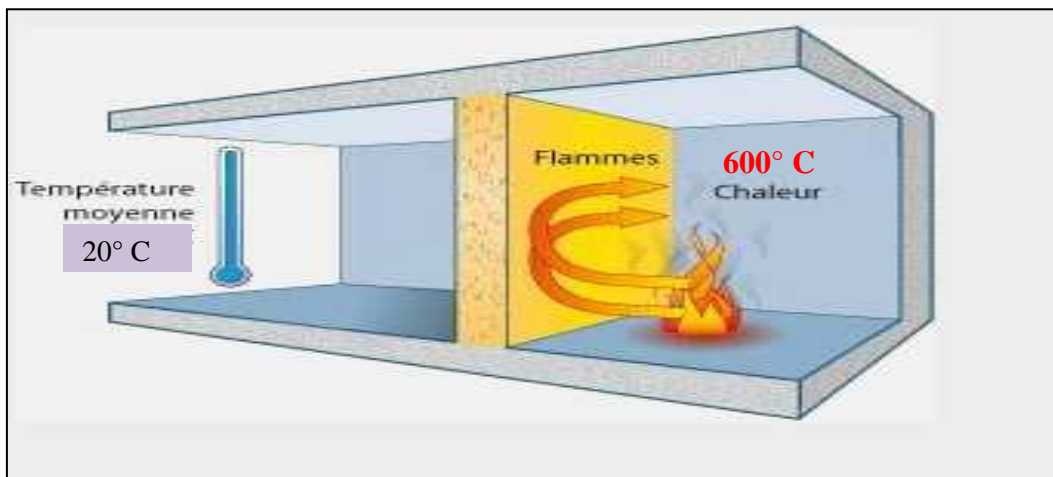


Figure 5- 19: Exemple d'un voile de compartimentage exposée au feu sur une seule face

L'endommagement de la section par le feu est pris en compte en utilisant une section droite (A-A), comme indiqué à la Figure (5-20). Avec les caractéristiques mécaniques des matériaux (acier-béton) dans un milieu d'incendie.

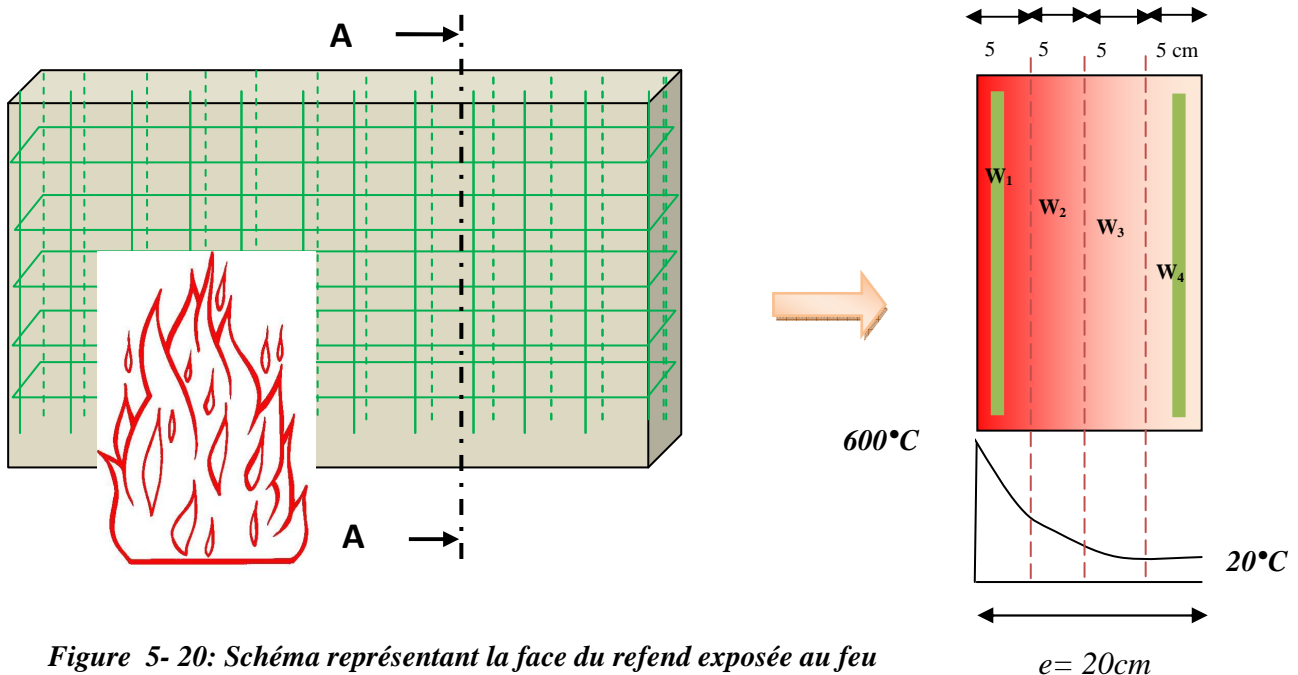


Figure 5- 20: Schéma représentant la face du refend exposée au feu

Pour une durée de temps choisie d'exposition au feu (2h par exemple), il convient de déterminer le développement de température de surface sur la face exposée, et la répartition de température dans la section droite en béton- Armé

La répartition des températures peuvent être déterminé en devisant la section droite en quatre couches identiques (w_i) selon son épaisseur (trois couches au minimum d'après la réglementation de Eurocode). Telle que ($w_i=5\text{ cm}$) comme schématisé sur la (figure 5-20) ci-dessus. Puis on calcul la température moyenne de chacune d'elles.

B- 1 Etapes de calcul de la température moyenne dans chaque couche :

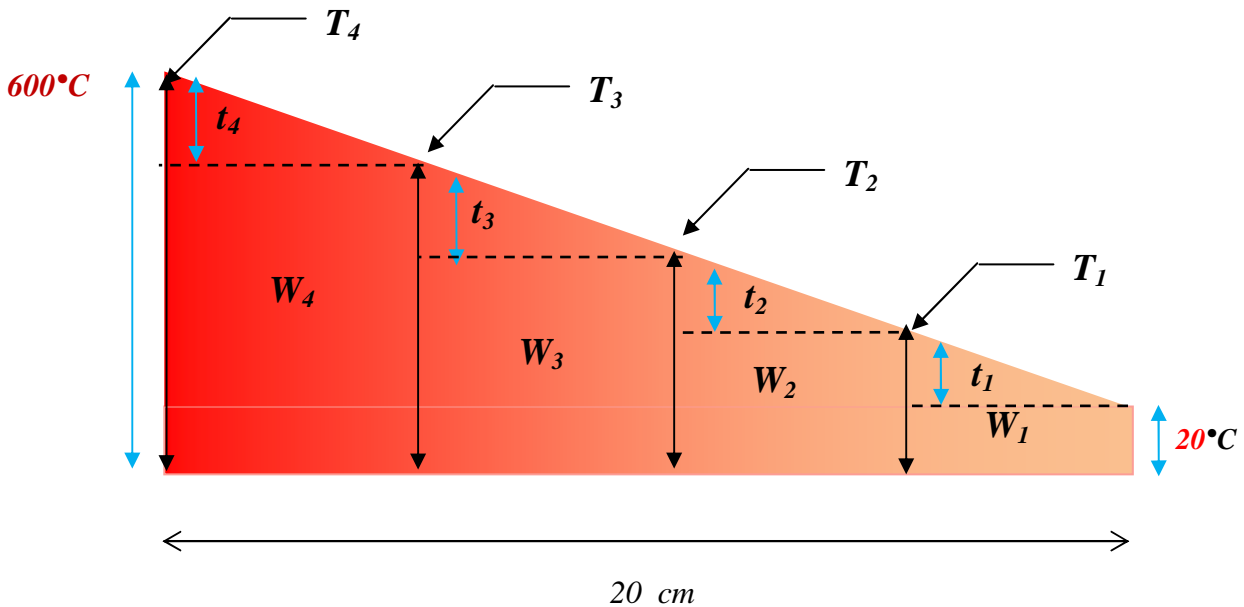


Figure 5- 21 : variation de la température dans la section droite du mur en béton-armé.

- Pour la première couche W_1 avec une épaisseur $e_1 = 5\text{ cm}$, on calcule la température Maximale T_1 .

D'après la méthode des triangles semblable on a : $\frac{580^\circ}{20} = \frac{t_1}{5} = \frac{t_2}{10} = \frac{t_3}{15} = \frac{t_4}{20}$ (5-21)

$$\frac{600^\circ - 20^\circ}{20} = \frac{t_1}{5} \Leftrightarrow \frac{580^\circ}{20} = \frac{t_1}{5} \quad (5-22)$$

$$\Rightarrow t_1 = \frac{580^\circ}{20} \times 5 = 145^\circ$$

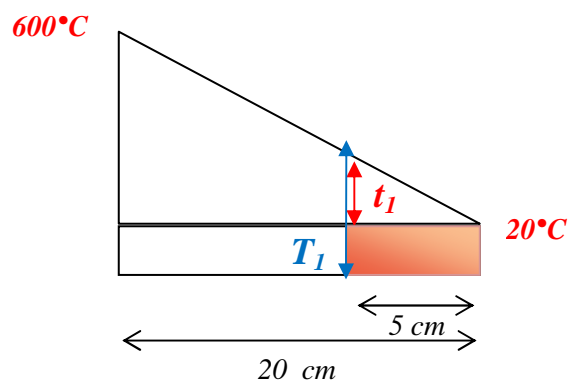
Donc : $t_1 = 145^\circ\text{C}$

$$T_1 = t_1 + 20^\circ\text{C} = 145^\circ + 20^\circ = 165^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 165^\circ\text{C}$$

$$\text{Avec : } \theta_1 = \frac{T_1 + 20^\circ}{2} = \frac{165^\circ + 20^\circ}{2} \approx 93^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow \theta_1 = 93^\circ\text{C}$$



Ou :

T_1 : est la température maximale de la couche W_1 à une profondeur de 5 cm

θ_1 : est la température moyenne de la couche W_1

- Pour la deuxième couche W_2 avec une épaisseur $e_2 = 10$ cm, on calcule la température Maximale T_2 .

$$\frac{580^\circ}{20} = \frac{t_2}{10} \leftrightarrow t_2 = \frac{580^\circ}{20} \times 10 = 290^\circ$$

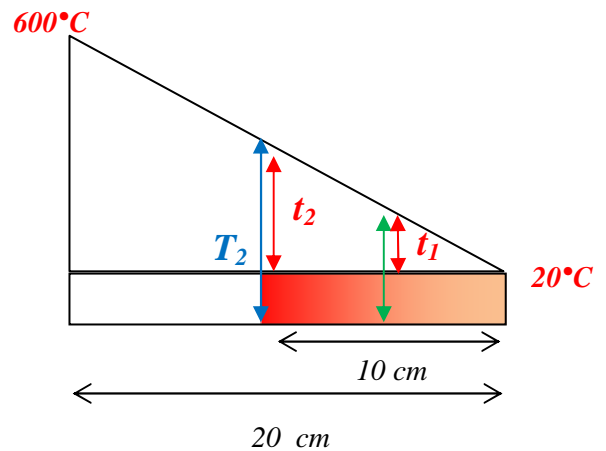
Donc : $t_2 = 290^\circ C$

$$T_2 = t_2 + 20^\circ C = 290 + 20^\circ = 310^\circ C$$

$$T_2 = 310^\circ C$$

$$\text{Avec : } \theta_2 = \frac{310^\circ + 165^\circ}{2} = 238^\circ C$$

$$\rightarrow \theta_2 = 238^\circ C$$



Ou :

T_2 : est la température maximale de la couche W_2 à une profondeur de 10 cm

θ_2 : est la température moyenne de la couche W_2

- Pour la troisième couche W_3 avec une épaisseur $e_3 = 15$ cm, on calcule la température Maximale T_3 :

$$\frac{580}{20} = \frac{t_3}{15} \leftrightarrow t_3 = \frac{580}{20} \times 15 = 435^\circ$$

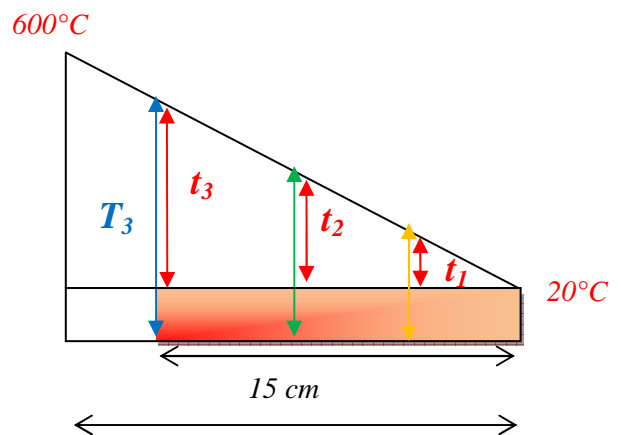
Donc : $t_3 = 435^\circ C$

$$T_3 = t_3 + 20^\circ C = 435^\circ + 20^\circ = 455^\circ C$$

$$T_3 = 455^\circ C$$

$$\text{Avec : } \theta_3 = \frac{455^\circ + 310^\circ}{2} \approx 383^\circ C$$

$$\rightarrow \theta_3 = 383^\circ C$$



Ou :

T_3 : est la température maximale de la couche W_3 à une profondeur de 15 cm

θ_3 : est la température moyenne de la couche W_3

- Pour la quatrième couche W_4 avec une épaisseur $e_4 = 20$ cm, on calcule la température Maximale T_4 :

$$\frac{580^\circ}{20} = \frac{t_4}{20} \leftrightarrow t_4 = \frac{580^\circ}{20} \times 20 = 580^\circ$$

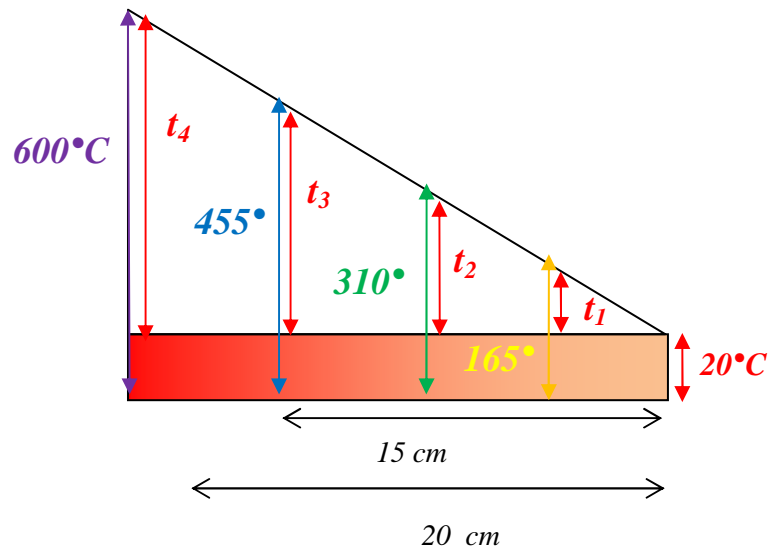
Donc : $t_4 = 580^\circ C$

$$T_4 = t_4 + 20^\circ\text{C} = 580^\circ + 20^\circ = 600^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 600^\circ\text{C}$$

$$\text{Avec : } \theta_4 = \frac{600^\circ + 455^\circ}{2} = 528^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow \theta_4 = 528^\circ\text{C}$$



Ou :

T_4 : est la température maximale de la couche W_4 à une profondeur de 20 cm

θ_4 : est la température moyenne de la couche W_4

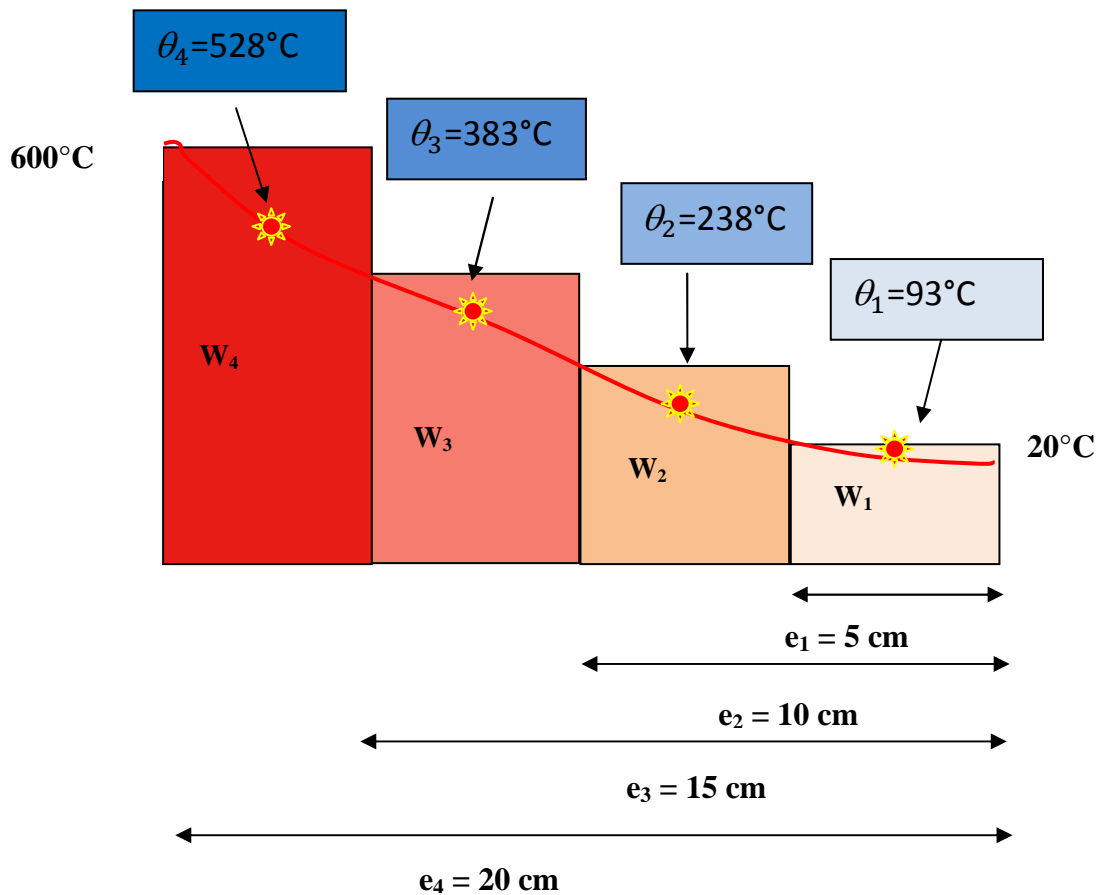


Figure 5- 22 : Température moyenne de calcul au niveau de chaque couche.

B- 2 Calcul du facteur de réduction :

La résistance à la compression et le module d'élasticité de la section droite en béton dans un élément exposée au feu sur une seule face, sont donner par les formules suivantes :

$$f_c(\theta) = K_c(\theta) \cdot f_c(20^\circ\text{C}) \quad (5-23)$$

$$E_c(\theta) = K_c(\theta) \cdot E_c(20^\circ\text{C})$$

Ou :

$K_c(\theta)$: facteur de réduction de la résistance à la compression du béton correspond à la température θ .

Le ferrailage est pris en compte avec une résistance et un module d'élasticité en fonction de la température dans chacune des barres. Qui sont donné par les formules suivantes :

$$\sigma_s(\theta) = K_s(\theta) \cdot \sigma_s(20^\circ\text{C}) \quad (5-24)$$

$$E_s(\theta) = K_s(\theta) \cdot E_s(20^\circ\text{C})$$

Ou:

$K_s(\theta)$: facteur de réduction de la résistance caractéristique de l'acier correspond à la température θ .

Les facteurs de réductions $K_c(\theta)$ et $K_s(\theta)$ pour les matériaux béton et acier dans les différents couches w_i sont déterminer en fonction de la température moyen de chacune de ces couches par les formules suivantes :

- Dans la première couche W_1 nous avons deux matériaux qui sont présent une nappe de barre d'acier et une couche de béton avec la température moyenne $\theta_1 = 93^\circ\text{C}$

Donc d'après les tableaux ([3-6] pour l'acier et [3-3] pour le béton) qu'on a vue précédemment au chapitre III, selon la réglementation de l'Eurocode 2 et 3 partie du feu (1-2), on peut tirer pour une température $\theta_1 = 93^\circ\text{C}$ les valeurs des facteurs de réductions $K_s(\theta)$ et $K_c(\theta)$

$\theta [^\circ\text{C}]$	<i>Béton</i>		<i>Acier</i>	
	20°	100°	20°	100°
$K_c ; K_s$	1,00	1,00	1,00	1,00

Comme : $20^\circ\text{C} < \theta_1 = 93^\circ\text{C} < 100^\circ\text{C}$

$K_c(\theta_1) = 1,00$ Et $K_s(\theta_1) = 1,00$

- Dans la deuxième tranche W_2 nous avons un seul matériau qui se présente c'est la couche de béton avec la température moyenne $\theta_2 = 238^\circ\text{C}$. D'après le tableau (3 -3

pour le béton du chapitre III), on peut tirer pour une température $\theta_2 = 238^\circ\text{C}$ la valeur de facteur de réduction $K_c(\theta)$.

	Béton	
$\theta [^\circ\text{C}]$	200°	300°
$K_c(\theta)$	0,95	0,85

Interpolation :

$$\begin{cases} \Delta\theta_2 = 300^\circ - 200^\circ = 100^\circ \\ \Delta K_{c,\theta_2} = 0.85 - 0.95 = -0.1 \end{cases} \quad \text{Pour} \quad \begin{cases} \Delta\theta_2 = 238^\circ - 200^\circ = 38^\circ \\ \Delta K_{c,\theta_2} = \frac{38^\circ \times (-0.1)}{100} = -0,038 \end{cases}$$

Donc $\theta_2 = 238^\circ\text{C}$ on aura $K_{c,\theta_2} = 0.95 + (-0.038) = 0.912$

Pour $\theta_2 = 238^\circ \rightarrow K_c(\theta_2) = 0,912$

- Dans la troisième tranche W_3 nous avons un seul matériau qui se présente c'est la couche du béton avec une température moyenne de $\theta_3 = 383^\circ\text{C}$. D'après le tableau (3 -3 pour le béton du chapitre III), on peut tirer pour une température $\theta_3 = 383^\circ\text{C}$ la valeur de facteur de réduction $K_c(\theta)$.

	Béton	
$\theta [^\circ\text{C}]$	300°	400°
$K_c(\theta)$	0,85	0,75

Interpolation :

$$\begin{cases} \Delta\theta_3 = 400^\circ - 300^\circ = 100^\circ \\ \Delta K_{c,\theta_3} = 0.75 - 0.85 = -0.1 \end{cases} \quad \text{Pour} \quad \begin{cases} \Delta\theta_3 = 383^\circ - 300^\circ = 83^\circ \\ \Delta K_{c,\theta_3} = \frac{83^\circ \times (-0.10)}{100} = -0,083 \end{cases} \quad (5-25)$$

Donc $\theta_3 = 383^\circ\text{C}$ on aura $K_{c,\theta_3} = 0.85 + (-0.083) = 0.767 \approx 0.770$

Pour $\theta_3 = 383^\circ \rightarrow K_c(\theta_3) = 0,770$

- Dans la dernière tranche W_4 nous avons deux matériaux qui sont présent une barre d'acier et une couche de béton avec une température moyenne de $\theta_4 = 528^\circ\text{C}$

D'après les tableaux ([3-6] pour l'acier et [3-3] pour le béton du chapitre III), on peut tirer pour une température $\theta_4 = 528^\circ\text{C}$ les valeurs des facteurs de réductions $K_s(\theta_4)$ et $K_c(\theta_4)$

	Béton		Acier	
$\theta [^\circ\text{C}]$	500°	600°	500°	600°
$K_c ; K_s$	0,60	0,45	0,78	0,47

Ici on va faire une double Interpolation une pour la couche du béton, et l'autre pour la barre d'acier.

Interpolation 1 : (Béton)

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\theta_4 = 600^\circ - 500^\circ = 100^\circ \\ \Delta K_{c,\theta_4} = 0.45 - 0.60 = -0.15 \end{array} \right. \text{ Pour } \left\{ \begin{array}{l} \Delta\theta_4 = 528^\circ - 500^\circ = 28^\circ \\ \Delta K_{c,\theta_4} = \frac{28^\circ \times (-0.15)}{100} = -0,042 \end{array} \right.$$

Donc $\theta_4 = 528^\circ\text{C}$ on aura $K_{c,\theta_4} = 0.60 + (-0.042) = 0.558 = 0.560$

Pour $\theta_4 = 528^\circ \rightarrow K_c(\theta_4) = 0,560$

Interpolation 2 : (Acier)

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\theta_4 = 600^\circ - 500^\circ = 100^\circ \\ \Delta K_{s,\theta_4} = 0.47 - 0.78 = -0.31 \end{array} \right. \text{ Pour } \left\{ \begin{array}{l} \Delta\theta_4 = 528^\circ - 500^\circ = 28^\circ \\ \Delta K_{s,\theta_4} = \frac{28^\circ \times (-0.31)}{100} = -0,0868 \end{array} \right.$$

Donc $\theta_4 = 528^\circ\text{C}$ on aura $K_{s,\theta_4} = 0.78 + (-0.0868) = 0,693$

Pour $\theta_4 = 528^\circ \rightarrow K_s(\theta_4) = 0,693$

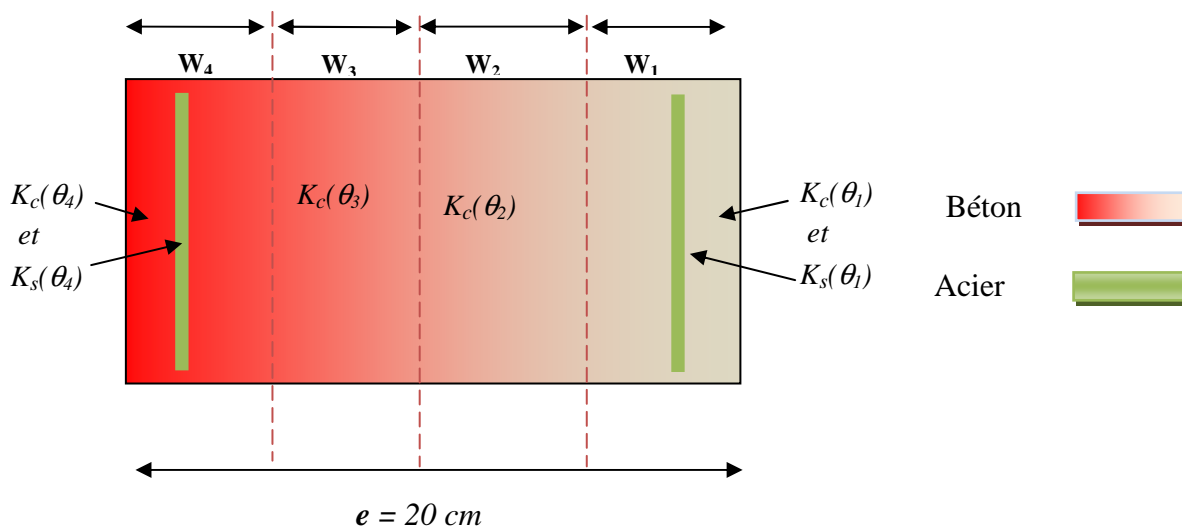


Figure 5-23 : Les différentes valeurs des coefficients de réduction des deux matériaux (béton-acier).

B- 3 Calcul des sollicitations reprise par chaque couche :

On reprend le même raisonnement de calcul effectué pour le refend à température ambiante, mais cette fois il y a le facteur de réduction de la résistance caractéristique des matériaux (Acier-Béton) pour un élément exposé au feu qui entre en jeu.

★ **Calcul des sollicitations pour l'Acier :**

- ♦ Evaluation des déformations relatives à chaque barre :

$$\begin{cases} \varepsilon_i \leq \varepsilon_{se} \rightarrow \text{phase élastique} \\ \varepsilon_i \geq \varepsilon_{se} \rightarrow \text{phase plastique} \end{cases}$$

Avec :

$$\varepsilon_{se} = \frac{f_e}{E_s \gamma_s}$$

Ou :

ε_{se} : déformation correspondant à la limite élastique de l'acier

ε_{si} : déformation relative à la section de chacun des barres « i »

γ_s : est le coefficient de sécurité est pris égale à 1.00 dans ce cas

- ♦ Les contraintes relatives pour chaque barre sont :

$$\begin{aligned} \text{à } 20^\circ\text{C on a : } & \begin{cases} \sigma_{es} = E_s \times \varepsilon_{si} / \gamma_s & (\text{ phase élastique}) \\ \sigma_{us} = f_e / \gamma_s = \text{cst} & (\text{ phase plastique}) \end{cases} \\ \text{et à } \theta_i \text{ on a : } & \begin{cases} \sigma_{es} = (E_s \times \varepsilon_{si} / \gamma_s) \times K_{s;\theta_i} & (\text{ phase élastique}) \\ \sigma_{us} = (f_e / \gamma_s) \times K_{s;\theta_i} = \text{cst} & (\text{ phase plastique}) \end{cases} \end{aligned}$$

Donc : $\sigma_{es(\theta_i)} = \sigma_{es(\theta=20^\circ)} \times K_{s;\theta_i}$

Ou :

γ_s : Coefficient de sécurité est pris égal à 1.00 dans le cas accidentel.

σ_{es} : est la contrainte limite élastique de l'acier.

σ_{us} : est la contrainte limite plastique de l'acier.

$K_{s;\theta_i}$: est le facteur de réduction de la résistance caractéristique de l'acier à une température moyen de θ_i pour chaque couche « i ».

- ♦ La force reprises par chacune des barres dans la zone comprimée et la zone tendue est donné par la formule suivante:

$$F_{si(\theta_i)} = \sigma_{si(\theta_i)} \times A_s$$

Avec : $A_s = 1.13 \text{ cm}^2$ fixé au départ pour des barres de diamètre $\phi = 12 \text{ mm}$

Donc : $F_{si(\theta_i)} = \sigma_{si(\theta_i)} \times 1.13 \text{ cm}^2$

Ou :

$F_{si(\theta_i)}$: force résultante interne reprise par chaque barre « i » dans la zone comprimée et dans la zone tendue de la couche w_i avec une température moyenne de θ

σ_{es} : est la contrainte limite de l'acier correspondant à chaque barre « i »

- ♦ le Moment repris par chacune des barres dans la zone comprimée et la zone tendue est donnée par la formule suivante :

$$M_{si(\theta)} = F_{si(\theta)} \times d_i$$

d_{si} : bras de levier par rapport à L'Axe Neutre du voile exprimée en [m] pour chaque barre d'acier « i »

$M_{si(\theta)}$: Moment fléchissant résultante reprise par chaque barre « i » dans la zone comprimée et dans la zone tendue de la couche w_i à une température moyenne de θ

★ Calcul des sollicitations pour le Béton :

- ♦ La contrainte limite du béton est donnée par la formule suivante :

$$f'_{bu} = \frac{0.85 \times f_{c28}}{\theta \times \gamma_b} = \frac{0.85 \times 25 \times 0.1}{1 \times 1.15} = 1.85 \text{ KN/cm}^2$$

$$f_{bu(\theta_i)} = f'_{bu(\theta=20^\circ)} \times K_{c;\theta_i}$$

Ou :

f'_{bu} : est la contrainte limite dans le cas accidentelle du béton (béton dans le cas d'incendie)

$K_{c;\theta_i}$: est le facteur de réduction de la résistance caractéristique à la compression du béton à une température moyenne θ_i pour chaque couche « i ».

3-1 La tranche W_1 à température moyen $\theta_1 = 93^\circ \text{ C}$

Comme on la déjà cité précédemment dans la 1^{ère} tranche on trouve deux matériaux qui sont sollicitées au feu (une couche de béton, et une nappe de barre d'acier). Avec un facteur de réduction de caractéristiques de résistance des aciers est $K_{s,93^\circ} = 1,00$; et un facteur de réduction de la résistance caractéristique à la compression du béton égal $K_{c,93^\circ} = 1,00$.

3-1-1 Les sollicitations reprise par les barres d'acier sont les suivantes :

- a-** Les contraintes relatives pour chaque barre d'acier dans la couche w_1 sont données par la formule suivante :

$$\sigma_{es(\theta=93^\circ)} = \sigma_{es(\theta=20^\circ)} \times K_{s,93^\circ}$$

- b-** Les efforts normaux et les moments fléchissant repris par chaque barre d'acier « i » se trouvant dans la 1^{ère} couche à température 93°C , sont résumer dans les deux tableaux (5-3 et 5-4) qui suit, et on a déduit les sollicitations résultantes internes dans chaque zone.

b- 1 Le tableau (5-3) est le résumé du détail de calcul des barres se trouvant dans la zone comprimée avec :

- $F_{sc(93^\circ)} = \sum F_{sci(93^\circ)}$ avec $F_{si(\theta=93^\circ)} = \sigma_{si(\theta=93^\circ)} \times 1.13 \text{ cm}^2$
- $M_{sc(93^\circ)/AN} = \sum M_{sci(93^\circ)/AN} \rightarrow M_{sc(93^\circ)/AN} = F_{sc(93^\circ)} \times d_{sc}$

	d_i [m]	$\varepsilon_i \times 10^{-3}$ [-]	$\sigma_{\theta i}(20^\circ\text{C})$ [KN/cm ²]	$\sigma_{\theta i}(93^\circ\text{C})$ [KN/cm ²]	$F_i(93^\circ\text{C})$ [KN]	$M_i(93^\circ\text{C})$ $\times (-1)$ [KN.m]
Les barres d'acier dans la zone Comprimée.	0,08	0,22	4,40	4,40	4,97	0,40
	0,24	0,67	13,40	13,40	15,14	3,63
	0,4	1,11	22,20	22,20	25,09	10,03
	0,56	1,56	31,20	31,20	35,26	19,74
	0,72	1,74	40,00	40,00	45,20	32,54
	0,88	1,74	40,00	40,00	45,20	39,78
	1,04	1,74	40,00	40,00	45,20	47,01
	1,2	1,74	40,00	40,00	45,20	54,24
	1,26	1,74	40,00	40,00	45,20	56,95
					$\sum F_{sc(93^\circ)} =$ 306,46 KN	$\sum M_{sc(93^\circ)} =$ 246,33KN.m
					$d_{sc} = \frac{M_{sc(93^\circ)}}{F_{sc(93^\circ)}} = \frac{246,33}{306,46}$ = 0.86 m	

Tableau 5- 3: différentes valeurs des forces et moments repris par les barres comprimées de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 93^\circ$ Pour la 1^{ème} tranche W_1 .

b- 2 Le tableau (5-4) est le résumé du détail de calcul des barres se trouvant dans la zone tendue avec :

- $F_{st(\theta=93^\circ)} = \sum F_{i(\theta=93^\circ)}$ avec $F_{si(\theta=93^\circ)} = \sigma_{si(\theta=93^\circ)} \times 1.13 \text{ cm}^2$
- $M_{st(\theta=93^\circ)} = \sum M_{i(\theta=93^\circ)} \rightarrow M_{st(\theta=93^\circ)} = F_{st(\theta=93^\circ)} \times d_{st}$

	d_i [m]	ε_i [-]	$\sigma_{\theta i}(20^\circ C)$ [KN/cm ²]	$\sigma_{\theta}(93^\circ C)$ [KN/cm ²]	$F_{i(93^\circ C)}$ [KN]	$M_i(93^\circ C)$ $\times (-1)$ [KN.m]
Les barres d'acier dans la zone Tendue.	0,08	0,22	4,40	4,40	4,97	0,40
	0,24	0,67	13,40	13,40	15,14	3,63
	0,4	1,11	22,20	22,20	25,09	10,03
	0,56	1,56	31,20	31,20	35,26	19,74
	0,72	1,74	40,00	40,00	45,20	32,54
	0,88	1,74	40,00	40,00	45,20	39,78
	1,04	1,74	40,00	40,00	45,20	47,01
	1,2	1,74	40,00	40,00	45,20	54,24
	1,36	1,74	40,00	40,00	45,20	61,47
	1,52	1,74	40,00	40,00	45,20	68,70
	1,68	1,74	40,00	40,00	45,20	75,94
	1,84	1,74	40,00	40,00	45,20	83,17
	2	1,74	40,00	40,00	45,20	90,40
	2,16	1,74	40,00	40,00	45,20	97,63
	2,32	1,74	40,00	40,00	45,20	104,86
	2,48	1,74	40,00	40,00	45,20	112,10
	2,64	1,74	40,00	40,00	45,20	119,33
	2,8	1,74	40,00	40,00	45,20	126,56
	2,96	1,74	40,00	40,00	45,20	133,79
	3,12	1,74	40,00	40,00	45,20	141,02
3,28	1,74	40,00	40,00	45,20	148,26	
3,44	1,74	40,00	40,00	45,20	155,49	
3,6	1,74	40,00	40,00	45,20	162,72	
					$\sum F_{st(93^\circ)} =$ 939,26 KN	$\sum M_{st(93^\circ)} =$ 1888,82KN.m
					$d = \frac{M_{st(93^\circ)}}{F_{st(93^\circ)}} = \frac{1888,82}{939,26}$ = 2,01 m	

Tableau 5-4: différentes valeurs des forces et moments repris par les barres tendues de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 93^\circ$ Pour la 1^{ème} tranche W_1 .

3-1-2 Les sollicitations reprise par la couche du béton est les suivantes :

- a- La contrainte limite reprise par le béton comprimée dans la 1^{er} tranche à température moyenne de 93°C est la suivante

$$f_{bu(\theta=93^\circ)} = f'_{bu(\theta=20^\circ)} \times K_{c,93^\circ}$$

$$f_{bu(\theta=93^\circ)} = 1.85 \times 1.00 = 1.85 \text{ KN/cm}^2$$

- b- Calcul de la force reprise par le béton comprimé :

$$\begin{aligned} F_{bc(93^\circ)} &= 0.8 L_c \times e_1 \times f_{bu(93^\circ)} \\ &= 0.8 \times 126 \times 5 \times 1.85 = 932.4 \text{ KN} \\ F_{bc(93^\circ)} &= 932.4 \text{ KN} \end{aligned}$$

- c- Calcul du moment fléchissant du béton comprimé par rapport à l'axe neutre:

$$\begin{aligned} M_{bc(\theta=93^\circ)} &= - F_{bc(93^\circ)} \times d_{bc} \\ &= - 932.4 \times 0.756 = - 704.90 \text{ KN.m} \\ M_{bc(\theta=93^\circ)} &= - 704.90 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

3-1-3 Calcul des sollicitations résultantes reprise par rapport à L'axe neutre dans la 1^{er} tranche à température moyenne de 93°C :

- Effort normale / Axe-Neutre :

$$\begin{aligned} N_{(\theta=93^\circ)} &= \sum F_{i(\theta=93^\circ)} = F_{bc(\theta=93^\circ)} + F_{sc(\theta=93^\circ)} - F_{st(\theta=93^\circ)} \\ &= 932.4 + 306.46 - 939.26 = 299.6 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$\text{Donc } N_{\text{Axe Neutre}(\theta=93^\circ)} = \mathbf{299.6 \text{ KN}}$$

- Moment fléchissant / Axe-Neutre :

$$\begin{aligned} M_{\text{Axe Neutre}(\theta=93^\circ)} &= \sum M_{i(\theta=93^\circ)} = - M_{bc(\theta=93^\circ)} - M_{sc(\theta=93^\circ)} - M_{st(\theta=93^\circ)} \\ &= - 704.90 - 246.33 - 1888.82 = - 2840.05 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

$$\text{Donc : } M_{\text{Axe Neutre}(\theta=93^\circ)} = \mathbf{- 2840.04 \text{ KN.m}}$$

3-1-4 Calcul des sollicitations résultantes reprise par rapport au (C.D.G) de la 1^{er} tranche à température moyenne de 93°C :

- L'effort Normale/ C.D.G :

$$N_{\text{C.D.G}(\theta=93^\circ)} = N_{\text{Axe Neutre}(\theta=93^\circ)} = \mathbf{299.6 \text{ KN}}$$

- Moment fléchissant / C.D.G:

$$M_{\text{C.D.G}(\theta=93^\circ)} = M_{\text{Axe Neutre}(\theta=93^\circ)} - N_{\text{Axe Neutre}(\theta=93^\circ)} \times \delta$$

Avec : $\delta_{(\theta=93^\circ)} = 120 \text{ cm} = 1,20 \text{ m}$

Donc : $M_{/C.D.G(\theta=93^\circ)} = (-2840.05) - 299.6 \times 1.20 = - 3199.60 \text{ KN.m}$

$M_{/C.D.G(\theta=93^\circ)} = - 3199.60 \text{ KN.m}$

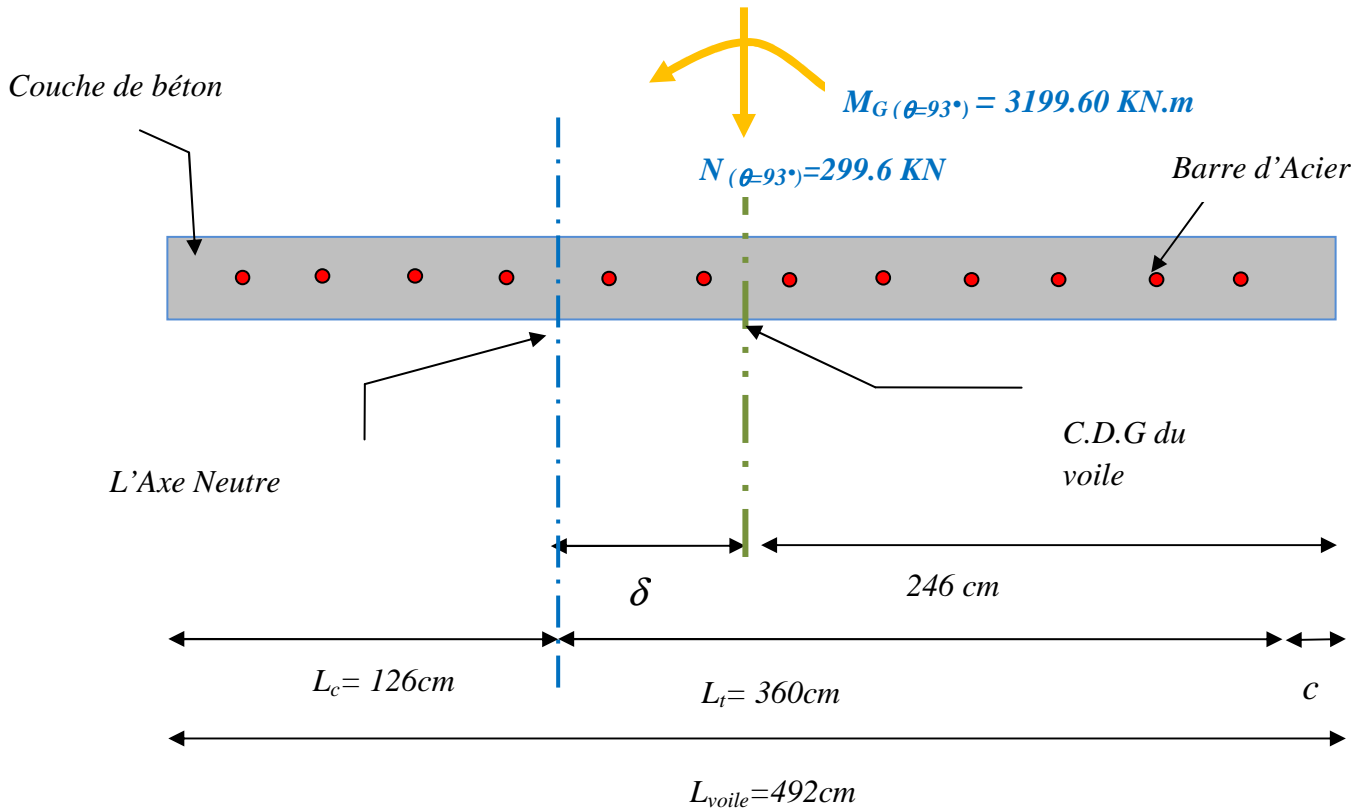


Figure 5-24: Diagramme résultant des sollicitations (Met N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 93°C

3-2 La tranche W_2 à température moyen $\theta_2 = 238^\circ \text{ C}$

Dans cette 2^{ème} tranche on trouve un seul matériau qui est sollicité au feu (une couche de béton de 0.5 m d'épaisseur).

3-2-1 La contrainte limite du béton est donnée par la formule suivante :

$$f_{bu(\theta=238^\circ)} = f'_{bu(\theta=20^\circ)} \times K_{c;238^\circ}$$

Avec :

$$K_{c;238^\circ} = 0.912 \quad \text{et} \quad f'_{bu} = 1.85 \text{ KN/cm}^2$$

$$f_{bu(\theta=238^\circ)} = 1.85 \times 0.912 = 1.687 \text{ KN/cm}^2$$

$$f_{bu(\theta=238^\circ)} = 1.687 \text{ KN/cm}^2$$

3-2-2 Calcul de la force reprise par le béton comprimé :

$$F_{bc(238^\circ)} = 0.8 \times L_c \times e_2 \times f_{bu(238^\circ)}$$

$$= 0.8 \times 126 \times 5 \times 1.687 = 850.25 \text{ KN}$$

$$F_{bc(238^\circ)} = 850.25 \text{ KN}$$

3-2-3 Calcul du moment fléchissant du béton comprimé par rapport à l'axe neutre:

$$M_{bc/AN(\theta=238^\circ)} = - F_{bc(238^\circ)} \times d_{bc}$$

$$= - 850.25 \times 0.756 = - 642.8 \text{ KN.m}$$

$$M_{bc/AN(\theta=238^\circ)} = - 642.8 \text{ KN.m}$$

3-2-4 Calcul du moment fléchissant du béton comprimé par rapport au (C.D.G) du voile :

- L'effort Normale/ C.D.G :
 $N_{/C.D.G(\theta=238^\circ C)} = F_{bc(\theta=238^\circ)} = 850.25 \text{ KN}$
- Moment fléchissant / C.D.G:

$$M_{/C.D.G(\theta=238^\circ)} = M_{AN(\theta=238^\circ)} - N_{AN(\theta=238^\circ)} \times \delta$$

Avec : $\delta = 120 \text{ cm} = 1,20 \text{ m}$

$$\text{Donc : } M_{/C.D.G(\theta=238^\circ)} = (- 642.8) - 850.25 \times 1.20 = - 1663 \text{ KN}$$

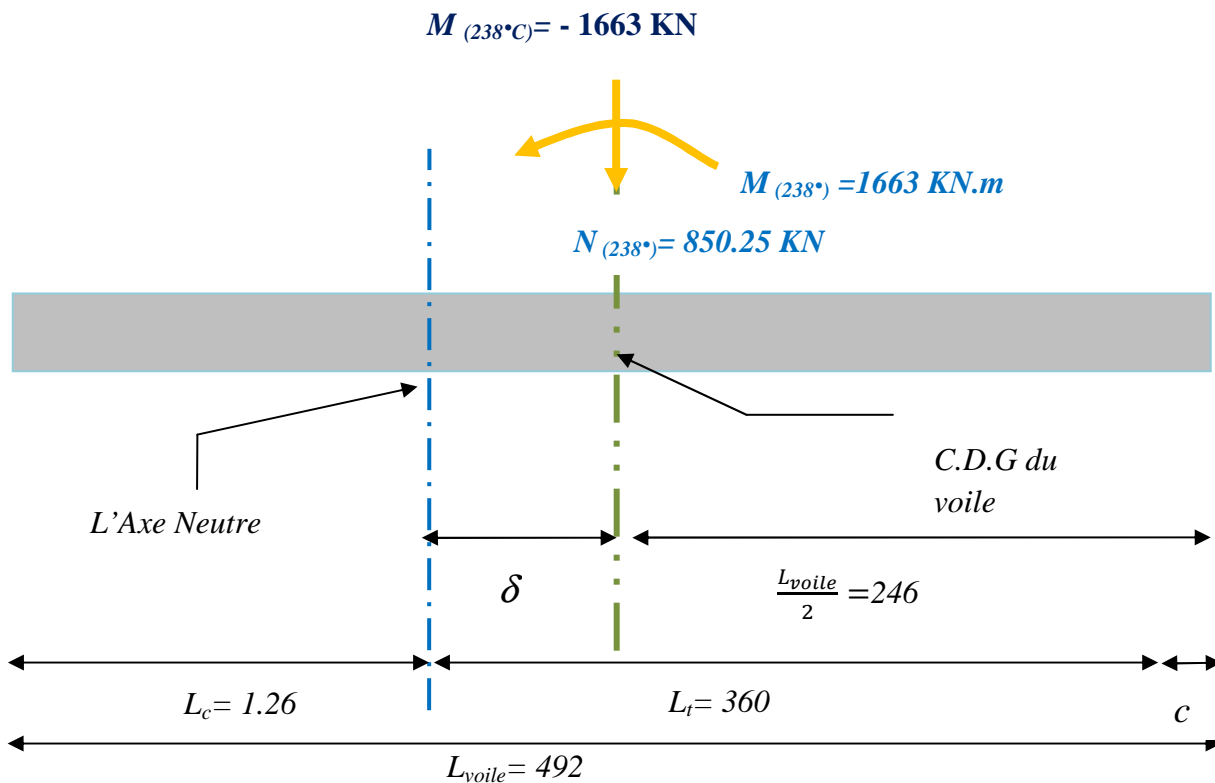


Figure 5-25: Diagramme résultant des sollicitations (Met N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 238°C

3-3 La tranche W_3 à température moyen $\theta_3 = 383^\circ \text{C}$

Dans cette 3^{ème} tranche on trouve un seul matériau qui est sollicité au feu (une couche de béton de 5cm d'épaisseur).

3-3-1 La contrainte limite du béton est donnée par la formule suivante :

$$f_{bu(\theta=383^\circ)} = f'_{bu(\theta=20^\circ)} \times K_{c;383^\circ}$$

Avec :

$$K_{c;383^\circ} = 0.770 ; \text{ et } f'_{bu} = 1.85 \text{ KN/cm}^2$$

$$f_{bu(\theta=383^\circ)} = 1.85 \times 0.770 = 1.424 \text{ KN/cm}^2$$

$$f_{bu(\theta=383^\circ)} = 1.424 \text{ KN/cm}^2$$

3-3-2 Calcule de la force reprise par le béton comprimé :

$$\begin{aligned} F_{bc(383^\circ)} &= 0.8 L_c \times e_3 \times f_{bu(383^\circ)} \\ &= 0.8 \times 126 \times 5 \times 1.424 = 717.70 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$F_{bc(383^\circ)} = 717.70 \text{ KN}$$

3-3-3 Calcule du moment fléchissant reprise par le béton comprimé par rapport à l'axe neutre :

$$\begin{aligned} M_{bc/AN(\theta=383^\circ)} &= - F_{bc(383^\circ)} \times d_{bc} \\ &= - 717.70 \times 0.756 = - 542.60 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

$$M_{bc/AN(\theta=383^\circ)} = - 542.60 \text{ KN.m}$$

3-3-4 Calcule des sollicitations résultantes reprise par la couche du béton par rapport au (C.D.G) du voile :

- L'effort Normale/ C.D.G :

$$N_{/C.D.G(\theta=383^\circ \text{C})} = F_{bc(\theta=383^\circ)} = \mathbf{717.70 \text{ KN}}$$

- Moment fléchissant / C.D.G:

$$M_{/C.D.G(\theta=383^\circ)} = M_{/AN(\theta=383^\circ)} - N_{/Axe\ Neutre(\theta=383^\circ)} \times \delta$$

$$\text{Avec : } \delta = 120 \text{ cm} = 1,20 \text{ m}$$

$$\text{Donc : } M_{/C.D.G(\theta=383^\circ)} = (- 542.60) - 717.70 \times 1.20 = -1403.84 \text{ KN.m}$$

$$\mathbf{M_{(383^\circ \text{C})} = 1403.84 \text{ KN.m}}$$

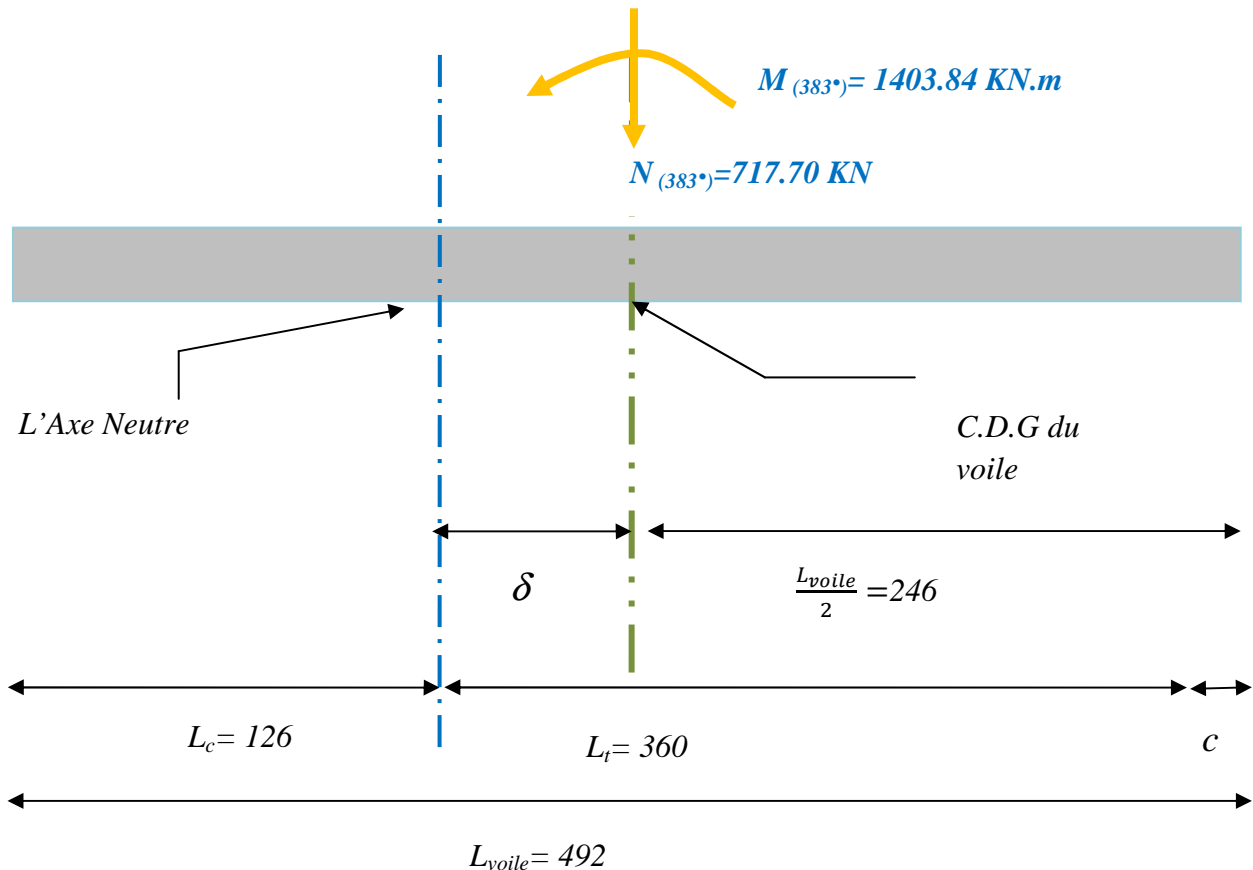


Figure 5- 26: Diagramme résultant des sollicitations (Met N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 383°C

3-4 La tranche W_4 à température moyen $\theta_4 = 528^\circ \text{C}$

Dans cette dernière tranche on trouve deux matériaux qui sont sollicités au feu (une couche de béton, et une nappe de barre d'acier). Avec un facteur de réduction de caractéristiques de résistance des aciers est $K_{s;528^\circ} = 0,693$; et un facteur de réduction de la résistance caractéristique à la compression du béton égal $K_{c;528^\circ} = 0,560$

3-4-1 Les sollicitations reprise par les barres d'acier sont les suivantes :

- a- Les contraintes relatives pour chaque barre d'acier dans la couche w_4 sont données par la formule suivante :

$$\sigma_{es(\theta=528^\circ)} = \sigma_{es(\theta=20^\circ)} \times K_{s;528^\circ}$$

Donc : $\sigma_{es(\theta=528^\circ)} = \sigma_{es(\theta=20^\circ)} \times 0.693$

- b- Les efforts normaux et les moments fléchissant repris par chaque barre d'acier « i » se trouvant dans la 4^{ème} couche à température moyenne de 528°C , sont résumer

dans les deux tableaux (5-5 et 5-6) qui suit, et on a déduit les sollicitations résultantes internes dans chaque zone.

b- 1 Le tableau (5-5) est le résumé du détail de calcul des barres se trouvant dans la zone comprimée avec :

- $F_{sc(\theta=528^\circ)} = \sum F_{i(\theta=528^\circ)}$ avec $F_{si(\theta=528^\circ)} = \sigma_{si(\theta=528^\circ)} \times 1.13 \text{ cm}^2$
- $M_{sc(\theta=528^\circ)} = \sum M_{i(\theta=528^\circ)} \rightarrow M_{sc(\theta=528^\circ)} = F_{sc(\theta=528^\circ)} \times d_{sc}$

	d_i [m]	ε_i [-]	$\sigma_{\theta_i}(20^\circ)$ [KN/cm ²]	$\sigma_{\theta}(528^\circ)$ [KN/cm ²]	$F_{sci}(528^\circ\text{C})$ [KN]	$M_{sci}(528^\circ\text{C})$ x (-1) [KN.m]
Les barres d'acier dans la zone Comprimée.	0,08	0,22	4,40	3,05	3,45	0,28
	0,24	0,67	13,40	9,29	10,49	2,52
	0,4	1,11	22,20	15,38	17,38	6,95
	0,56	1,56	31,20	21,62	24,43	13,68
	0,72	1,74	40,00	27,72	31,32	22,55
	0,88	1,74	40,00	27,72	31,32	27,56
	1,04	1,74	40,00	27,72	31,32	32,58
	1,2	1,74	40,00	27,72	31,32	37,59
	1,26	1,74	40,00	27,72	31,32	39,47
					$\sum F_{sc(528^\circ)} =$ 212,37 KN	$\sum M_{sc(528^\circ)} =$ 183,18KN.m
					$d = \frac{M_{sc(528^\circ)}}{F_{sc(528^\circ)}} = \frac{183,18}{212,37}$ = 0,86 m	

Tableau 5- 5 : différentes valeurs des forces et moments dans la zone comprimée de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 528^\circ$ Pour la 4^{ème} tranche W_4 .

b- 2 Le tableau (5-6) est le résumé du détail de calcul des barres se trouvant dans la zone comprimée avec :

- $F_{st(\theta=528^\circ)} = \sum F_{i(\theta=528^\circ)}$ avec $F_{si(\theta=528^\circ)} = \sigma_{si(\theta=528^\circ)} \times 1.13 \text{ cm}^2$

$$- M_{st(\theta=528^\circ)} = \sum M_{i(\theta=528^\circ)} \rightarrow M_{st(\theta=528^\circ)} = F_{st(\theta=528^\circ)} \times d_{st}$$

	d_i [m]	ε_i [-]	$\sigma_{\theta_i}(20^\circ)$ [KN/cm ²]	$\sigma_{\theta}(528^\circ)$ [KN/cm ²]	$F_{sti}(528^\circ C)$ [KN]	$M_{sti}(528^\circ C)$ $\times (-1)$ [KN.m]
Les barres d'acier dans la zone Tendue.	0,08	0,22	4,40	3,05	3,45	0,28
	0,24	0,67	13,40	9,29	10,49	2,52
	0,4	1,11	22,20	15,38	17,38	6,95
	0,56	1,56	31,20	21,62	24,43	13,68
	0,72	1,74	40,00	27,72	31,32	22,55
	0,88	1,74	40,00	27,72	31,32	27,56
	1,04	1,74	40,00	27,72	31,32	32,58
	1,2	1,74	40,00	27,72	31,32	37,59
	1,36	1,74	40,00	27,72	31,32	42,60
	1,52	1,74	40,00	27,72	31,32	47,61
	1,68	1,74	40,00	27,72	31,32	52,62
	1,84	1,74	40,00	27,72	31,32	57,64
	2,00	1,74	40,00	27,72	31,32	62,65
	2,16	1,74	40,00	27,72	31,32	67,66
	2,32	1,74	40,00	27,72	31,32	72,67
	2,48	1,74	40,00	27,72	31,32	77,68
	2,64	1,74	40,00	27,72	31,32	82,69
	2,8	1,74	40,00	27,72	31,32	87,71
	2,96	1,74	40,00	27,72	31,32	92,72
	3,12	1,74	40,00	27,72	31,32	97,73
3,28	1,74	40,00	27,72	31,32	102,74	
3,44	1,74	40,00	27,72	31,32	107,75	
3,6	1,74	40,00	27,72	31,32	112,76	
					$\sum F_{st(528^\circ)} =$ 650,90 KN	$\sum M_{st(528^\circ)} =$ 1308,95KN.m
					$d = \frac{M_{st(528^\circ)}}{F_{st(528^\circ)}} = \frac{1308,95}{650,90}$ = 2,01 m	

Tableau 5-6 : différentes valeurs des forces et moments dans la zone tendue de l'acier de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 528^\circ$ Pour la 4^{ème} tranche W_4

3-4-2 Les sollicitations reprise par la couche du béton est les suivantes :

a- La contrainte limite reprise par le béton comprimée dans la 4^{ème} tranche à température moyenne de 528°C est la suivante

$$f_{bu(\theta=528^\circ)} = f'_{bu(\theta=20^\circ)} \times K_{c,528^\circ}$$

$$f_{bu(\theta=528^\circ)} = 1.85 \times 0.560 = 1.036 \text{ KN/cm}^2$$

b- Calcule de la force reprise par le béton comprimé :

$$\begin{aligned} F_{bc(528^\circ)} &= 0.8 L_c \times e_4 \times f_{bu(528^\circ)} \\ &= 0.8 \times 126 \times 5 \times 1.036 = 522.14 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$F_{bc(528^\circ)} = 522.14 \text{ KN}$$

c- Calcule du moment fléchissant reprise par le béton comprimé par rapport à l'axe neutre :

$$\begin{aligned} M_{bc/AN(\theta=528^\circ)} &= - F_{bc(528^\circ)} \times d_{bc} \\ &= 522.14 \times 0.756 = - 394.73 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

$$M_{bc/AN(\theta=528^\circ)} = - 394.73 \text{ KN.m}$$

3-4-3 Calcule des sollicitations résultantes reprise par rapport à L'axe neutre dans la 4^{ème} tranche à température moyenne de 528°C :

- L'effort Normale/Axe-Neutre :

$$\begin{aligned} N_{(\theta=528^\circ)} &= \sum F_{i(\theta=528^\circ)} = F_{bc(\theta=528^\circ)} + F_{sc(\theta=528^\circ)} - F_{st(\theta=528^\circ)} \\ &= 522.14 + 212.37 - 650.90 = 83.61 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$\text{Donc } N_{/Axe\ Neutre(\theta=528^\circ)} = \mathbf{83.61 \text{ KN}}$$

- Moment fléchissant /Axe-Neutre :

$$\begin{aligned} M_{/Axe\ Neutre(\theta=528^\circ)} &= \sum M_{i(\theta=528^\circ)} = M_{bc(\theta=528^\circ)} + M_{sc(\theta=528^\circ)} + M_{st(\theta=528^\circ)} \\ &= - 394.73 - 183.18 - 1308.95 = -1886.86 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

$$\text{Donc : } M_{/Axe\ Neutre(\theta=528^\circ)} = \mathbf{- 1886.86 \text{ KN.m}}$$

3-4-4 Calcule des sollicitations résultantes reprise par rapport au (C.D.G) de la 4^{ème} tranche à température moyenne de 528°C :

- L'effort Normale/C.D.G :

$$N_{/C.D.G(\theta=528^\circ)} = N_{/Axe\ Neutre(\theta=528^\circ)} = \mathbf{83.61 \text{ KN}}$$

- Moment fléchissant /C.D.G:

$$M_{/C.D.G(\theta=528^\circ)} = M_{/Axe\ Neutre(\theta=528^\circ)} - N_{/AN(\theta=528^\circ)} \times \delta$$

$$\text{Avec : } \delta_{(\theta=528^\circ)} = 120 \text{ cm} = 1.20 \text{ m}$$

$$\text{Donc : } M_{/C.D.G(\theta=528^\circ)} = (-1886.86) - 83.61 \times 1.20 = - 1987.20 \text{ KN.m}$$

$$M_{/C.D.G(\theta=528^\circ)} = \mathbf{- 1987.20 \text{ KN.m}}$$

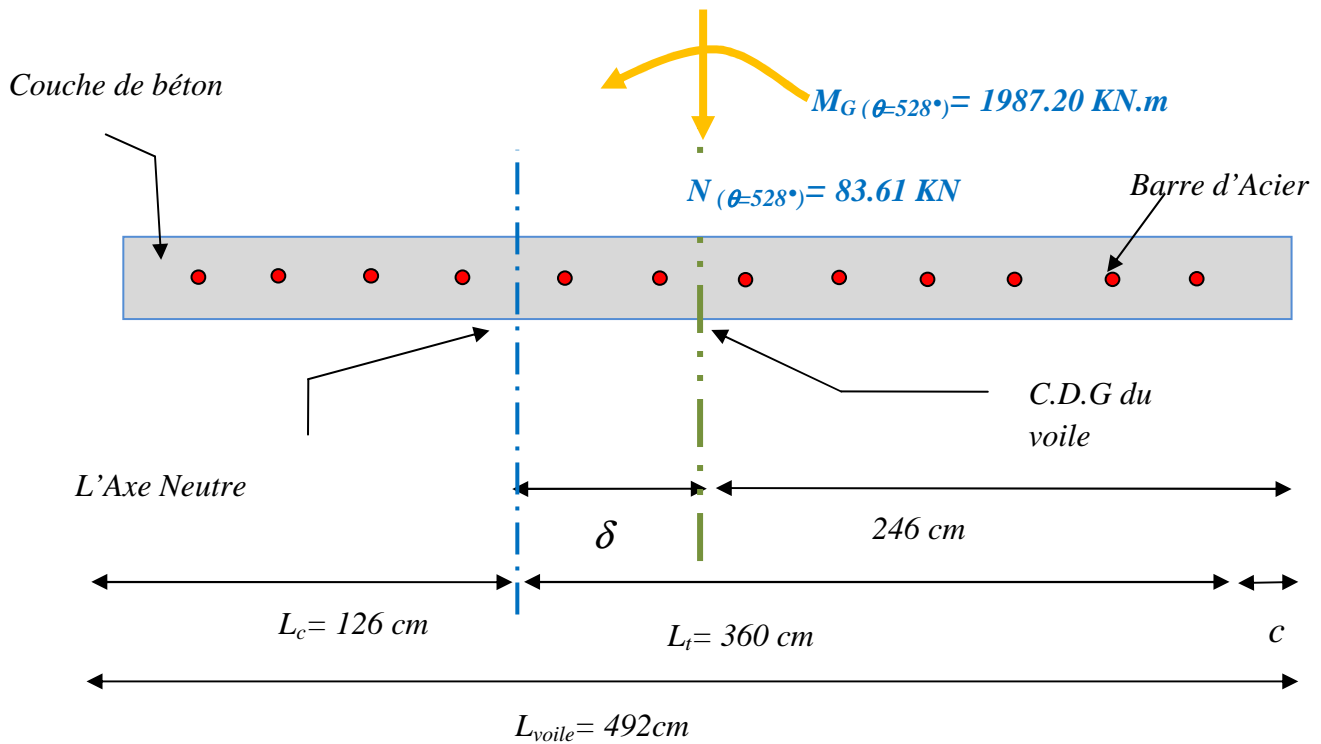


Figure 5-27: Diagramme résultant des sollicitations (M_G et N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 528°C

B- 4 Calcule des sollicitations résultantes reprise par le voile exposé au feu :

• **L'effort Normale/C.D.G :**

$$\begin{aligned} N_{/C.D.G} &= N_{\theta=93^\circ} + N_{\theta=238^\circ} + N_{\theta=383^\circ} + N_{\theta=528^\circ} \\ &= 299.6 + 850.25 + 717.70 + 83.61 \\ &= 1951.16 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$N_{/C.D.G} = 1951.16 \text{ KN}$$

• **Moment fléchissant /C.D.G:**

$$\begin{aligned} M_{/C.D.G} &= M_{\theta=93^\circ} + M_{\theta=238^\circ} + M_{\theta=383^\circ} + M_{\theta=528^\circ} \\ &= (-3199.60) + (-1663) + (-1403.84) + (-1987.2) \\ &= (- 8253.64) \end{aligned}$$

$$M_{/C.D.G} = - 8253.64 \text{ KN.m}$$

$$\begin{aligned} N_{/C.D.G} &= 1951.16 \text{ KN} \\ M_{/C.D.G} &= - 8253.64 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

2^{ème} Cas : On prend toujours le même voile de 4.90 m de longueur et 20 cm d'épaisseur, on le soumet à un feu de température 600°C sur une seule face, et l'autre face non exposée sa température vaut 140°C. Le but principal de cet essai est de déterminer la capacité résistante ultime de la section droite en béton armé à chaud.

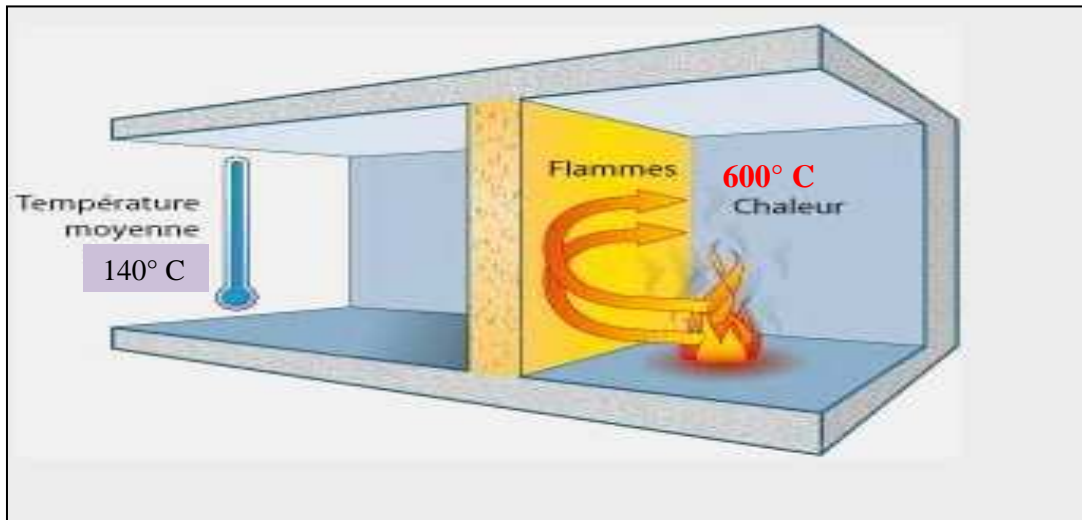


Figure 5- 28: Exemple d'un voile de compartimentage exposée au feu par une seule face

C- 1 Etapes de calcul de la température moyenne dans chaque couche :

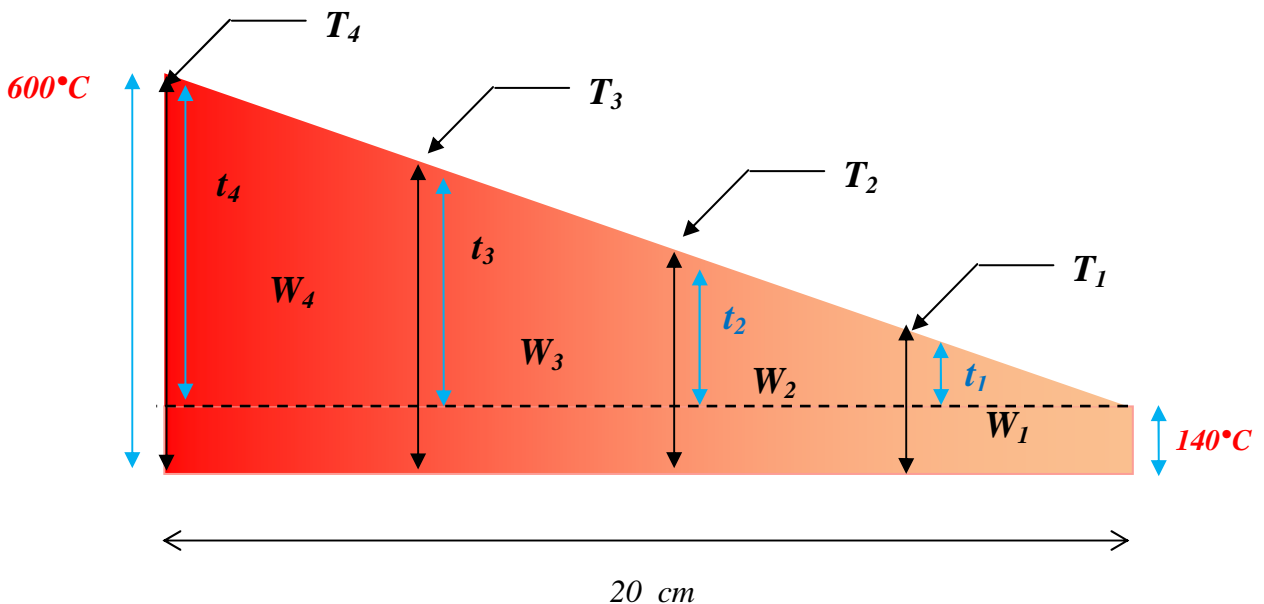


Figure 5- 29: variation de la température dans la section droite du mur en béton-armé.

On reprend le même raisonnement pour le calcul des températures moyennes pour chaque couche fait précédemment (dans le 1^{er} cas), mais cette fois la face non exposé au feu est à une température de 140°C.

D'après la méthode des triangles semblable on a :

$$\frac{600^\circ - 140^\circ}{20} = \frac{460^\circ}{20} = \frac{t_1}{5} = \frac{t_2}{10} = \frac{t_3}{15} = \frac{t_4}{20}$$

On a trouvée :

- Dans la 1^{er} couche W_1 à une épaisseur de 5 cm → $\theta_1 = 198^\circ\text{C}$
- Dans la 2^{ème} couche W_2 à une épaisseur de 5 cm → $\theta_2 = 313^\circ\text{C}$
- Dans la 3^{ème} couche W_3 à une épaisseur de 5 cm → $\theta_3 = 428^\circ\text{C}$
- Dans la 4^{ème} couche W_4 à une épaisseur de 5 cm → $\theta_4 = 543^\circ\text{C}$

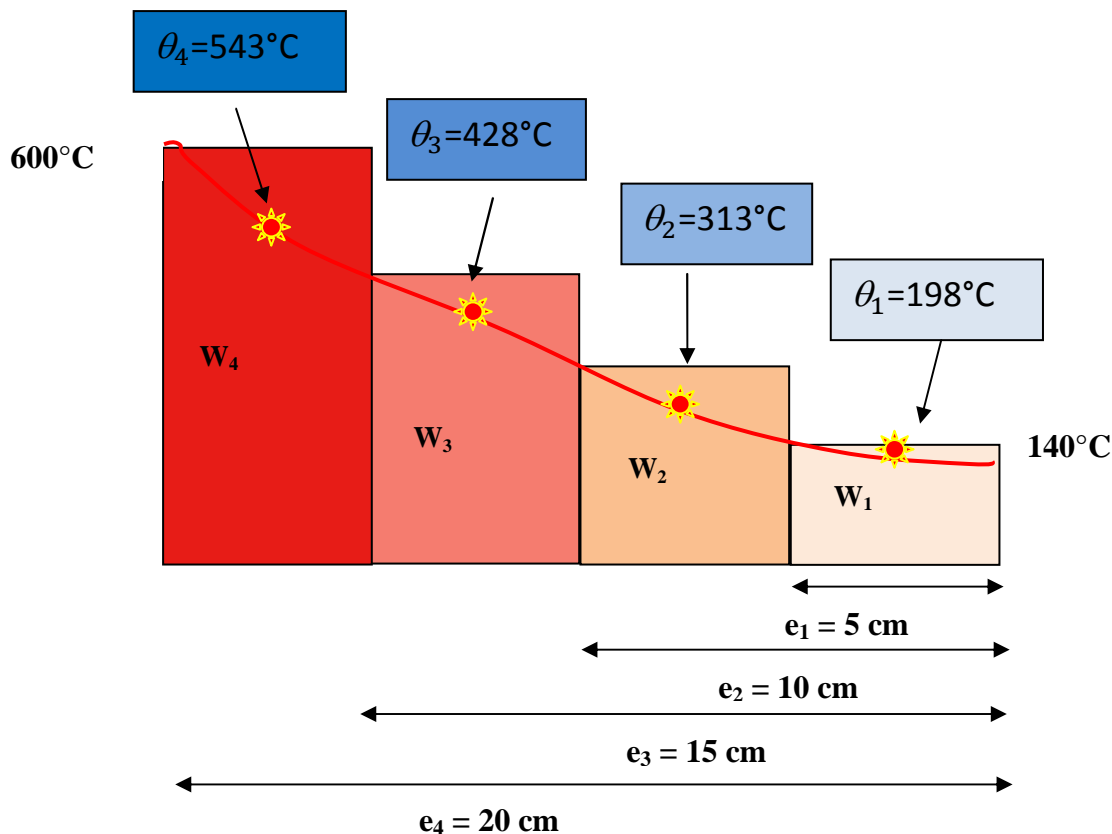


Figure 5- 30 : Température moyenne de calcul au niveau de chaque couche.

C- 2 Calcul du facteur de réduction :

Les facteurs de réductions $K_c(\theta)$ et $K_s(\theta)$ pour les matériaux béton et acier dans les différents couches w_i sont déterminés en fonction de la température moyen de chacune de ces couches par les formules suivantes :

- Dans la première couche W_1 nous avons deux matériaux qui sont présent, une nappe de barre d'acier et une couche de béton avec la température moyenne $\theta_1 = 198^\circ\text{C}$

Donc d'après les tableaux ([3-6] pour l'acier selon l'Eurocode 3, et [3-3] pour le béton selon l'Eurocode 2) qu'on a vue précédemment au chapitre III on peut tirer pour une température $\theta_1 = 198^\circ\text{C}$ les valeurs des facteurs de réductions $K_s(\theta)$ et $K_c(\theta)$

		100°C	200°C
Béton	$K_c(\theta_1)$	1,00	0,95
Acier	$K_s(\theta_1)$	1,00	1,00

Comme : $100^\circ\text{C} < \theta_1 = 198^\circ\text{C} < 200^\circ\text{C}$

Donc on a pour l'acier $K_s(\theta_1) = 1,00$ mais pour le béton une interpolation s'impose.

Interpolation :

$$\begin{cases} \Delta\theta_1 = 200^\circ - 100^\circ = 100^\circ \\ \Delta K_{c,\theta_1} = 0.95 - 1.00 = -0.05 \end{cases} \quad \text{Pour} \quad \begin{cases} \Delta\theta_2 = 198^\circ - 100^\circ = 98^\circ \\ \Delta K_{c,\theta_2} = \frac{98^\circ \times (-0.05)}{100} = -0,05 \end{cases}$$

Donc $\theta_2 = 198^\circ\text{C}$ on aura $K_{c,\theta_1} = 1.00 + (-0.05) = 0.95$

Pour $\theta_1 = 198^\circ \rightarrow K_c(\theta_1) = 0,95$ Et $K_s(\theta_1) = 1,00$

- Dans la deuxième tranche W_2 nous avons un seul matériau qui se présente c'est la couche de béton avec la température moyenne $\theta_2 = 313^\circ\text{C}$

Donc d'après le tableau (3-3 pour le béton du chapitre III), on peut tirer pour une température $\theta_2 = 313^\circ\text{C}$ la valeur de facteur de réduction $K_c(\theta)$.

	Béton	
	300°	400°
$\theta [^\circ\text{C}]$	300°	400°
$K_c(\theta_2)$	0,85	0,75

Interpolation :

$$\begin{cases} \Delta\theta_2 = 400^\circ - 300^\circ = 100^\circ \\ \Delta K_{c,\theta_2} = 0.75 - 0.85 = -0.1 \end{cases} \quad \text{Pour} \quad \begin{cases} \Delta\theta_2 = 313^\circ - 300^\circ = 13^\circ \\ \Delta K_{c,\theta_2} = \frac{13^\circ \times (-0.1)}{100} = -0,013 \end{cases}$$

Donc $\theta_2 = 313^\circ\text{C}$ on aura $K_{c,\theta_2} = 0.85 + (-0.013) = 0.837$

Pour $\theta_2 = 313^\circ \rightarrow K_c(\theta_2) = 0,837$

- Dans la troisième tranche W_3 nous avons un seul matériau qui se présente c'est la coche du béton avec une température moyenne de $\theta_3 = 428^\circ\text{C}$

Donc d'après le tableau (3 -3 pour le béton du chapitre III), on peut tirer pour une température $\theta_3 = 428^\circ\text{C}$ la valeur de facteur de réduction $K_c(\theta)$.

	<i>Béton</i>	
$\theta [^\circ\text{C}]$	400°	500°
$K_c(\theta_3)$	0,75	0,60

Interpolation :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\theta_3 = 500^\circ - 400^\circ = 100^\circ \\ \Delta K_{c,\theta_3} = 0.60 - 0.75 = -0.15 \end{array} \right. \quad \text{Pour} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta\theta_3 = 428^\circ - 400^\circ = 28^\circ \\ \Delta K_{c,\theta_3} = \frac{28^\circ \times (-0.15)}{100} = -0,042 \end{array} \right.$$

Donc $\theta_3 = 428^\circ\text{C}$ on aura $K_{c,\theta_3} = 0.75 + (-0.042) = 0.708$

Pour $\theta_3 = 428^\circ \rightarrow K_c(\theta_3) = 0,708$

- Dans la dernière tranche W_4 nous avons deux matériaux qui sont présent une barre d'acier et une coche de béton avec une température moyenne de $\theta_4 = 543^\circ\text{C}$

Donc d'après les tableaux ([3-6] pour l'acier et [3-3] pour le béton) qu'on a vue précédemment au chapitre III on peut tirer pour une température $\theta_4 = 543^\circ\text{C}$ les valeurs des facteurs de réductions $K_s(\theta_4)$ et $K_c(\theta_4)$

	<i>Béton</i>		<i>Acier</i>	
$\theta [^\circ\text{C}]$	500°	600°	500°	600°
$K_c(\theta_4) ; K_s(\theta_4)$	0,60	0,45	0,78	0,47

Ici on va faire une double Interpolation une pour la couche du béton, et l'autre pour la barre d'acier.

Interpolation 1 : (Béton)

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\theta_4 = 600^\circ - 500^\circ = 100^\circ \\ \Delta K_{c,\theta_4} = 0.45 - 0.60 = -0.15 \end{array} \right. \quad \text{Pour} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta\theta_4 = 543^\circ - 500^\circ = 43^\circ \\ \Delta K_{c,\theta_4} = \frac{43^\circ \times (-0.15)}{100} = -0,0645 \end{array} \right.$$

Donc $\theta_4 = 543^\circ\text{C}$ on aura $K_{c,\theta_4} = 0.60 + (-0.0645) = 0.536$

Pour $\theta_4 = 543^\circ \rightarrow K_c(\theta_4) = 0,536$

Interpolation 2 : (Acier)

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\theta_4 = 600^\circ - 500^\circ = 100^\circ \\ \Delta K_{s,\theta_4} = 0.47 - 0.78 = -0.31 \end{array} \right. \text{ Pour } \left\{ \begin{array}{l} \Delta\theta_4 = 543^\circ - 500^\circ = 43^\circ \\ \Delta K_{s,\theta_4} = \frac{43^\circ \times (-0.31)}{100} = -0,1333 \end{array} \right.$$

Donc $\theta_4 = 543^\circ\text{C}$ on aura $K_{s,\theta_4} = 0.78 + (-0.1333) = 0,647$

Pour $\theta_4 = 543^\circ \rightarrow K_s(\theta_4) = 0,647$

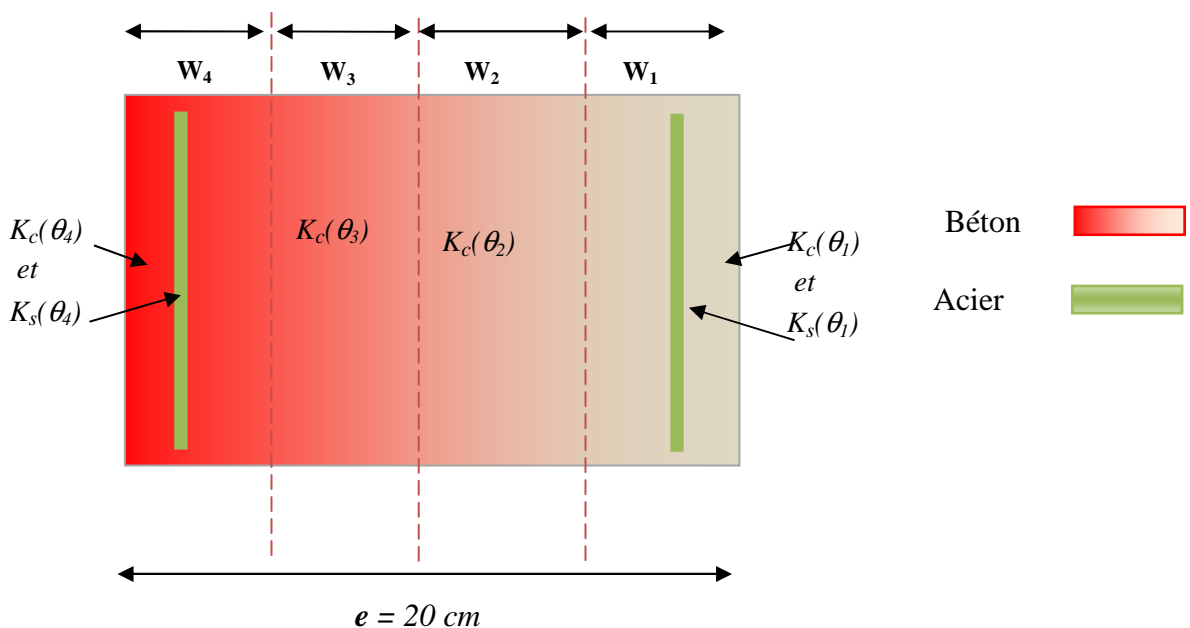


Figure 5-31 : Les différentes valeurs des coefficients de réduction des deux matériaux (béton-acier).

C- 3 Calcul des sollicitations reprise par chaque couche :

3-2 La tranche W_1 à température moyen $\theta_1 = 198^\circ\text{C}$

Comme on la déjà cité précédemment dans la 1^{ère} tranche on trouve deux matériaux qui sont sollicités au feu (une couche de béton, et une nappe de barre d'acier). Avec un facteur de réduction de caractéristiques de résistance des aciers est $K_{s,198^\circ} = 1,00$; et un facteur de réduction de la résistance caractéristique à la compression du béton égal $K_{c,198^\circ} = 0,95$.

3-1-2 Les sollicitations reprise par les barres d'acier sont les suivantes :

a- Les contraintes relatives pour chaque barre d'acier dans la couche w_1 sont données par la formule suivante :

$$\sigma_{es(\theta=198^\circ)} = \sigma_{es(\theta=20^\circ)} \times K_{s,198^\circ}$$

b- Les efforts normaux et les moments fléchissant repris par chaque barre d'acier « i » se trouvant dans la 1^{er} couche à température 198°C, sont résumer dans les deux tableaux (5-7 et 5- 8) qui suit, et on a déduit les sollicitations résultantes internes dans chaque zone.

c- 1 Le tableau (5-7) est le résumé du détail de calcule des barres se trouvant dans la zone comprimée avec :

- $F_{sc(198^\circ)} = \sum F_{sci(198^\circ)}$ avec $F_{si(\theta=198^\circ)} = \sigma_{si(\theta=198^\circ)} \times 1.13 \text{ cm}^2$

- $M_{sc(198^\circ)/AN} = \sum M_{sci(198^\circ)/AN} \rightarrow M_{sc(198^\circ)/AN} = F_{sc(198^\circ)} \times d_{sc}$

	d_i [m]	$\varepsilon_i \times 10^{-3}$ [-]	$\sigma_{\theta i}(20^\circ\text{C})$ [KN/cm ²]	$\sigma_{\theta i}(198^\circ\text{C})$ [KN/cm ²]	$F_i(198^\circ\text{C})$ [KN]	$M_i(198^\circ\text{C})$ $\times (-1)$ [KN.m]
Les barres d'acier dans la zone Comprimée.	0,08	0,22	4,40	4,40	4,97	0,40
	0,24	0,67	13,40	13,40	15,14	3,63
	0,4	1,11	22,20	22,20	25,09	10,03
	0,56	1,56	31,20	31,20	35,26	19,74
	0,72	1,74	40,00	40,00	45,20	32,54
	0,88	1,74	40,00	40,00	45,20	39,78
	1,04	1,74	40,00	40,00	45,20	47,01
	1,2	1,74	40,00	40,00	45,20	54,24
	1,26	1,74	40,00	40,00	45,20	56,95
					$\sum F_{sc(198^\circ)} =$ 306,46 KN	$\sum M_{sc(198^\circ)} =$ 246,33KN.m
					$d_{sc} = \frac{M_{sc(198^\circ)}}{F_{sc(198^\circ)}} = \frac{246,33}{306,46}$ = 0.86 m	

Tableau 5- 7: différentes valeurs des forces et moments repris par les barres comprimées de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 198^\circ$ Pour la 1^{ème} tranche W_1 .

c- 2 Le tableau (5-8) est le résumé du détail de calcul des barres se trouvant dans la zone tendue avec :

$$- F_{st(\theta=198^\circ)} = \sum F_{i(\theta=198^\circ)} \text{ avec } F_{si(\theta=198^\circ)} = \sigma_{si(\theta=198^\circ)} \times 1.13 \text{ cm}^2$$

$$- M_{st(\theta=198^\circ)} = \sum M_{i(\theta=198^\circ)} \rightarrow M_{st(\theta=198^\circ)} = F_{st(\theta=198^\circ)} \times d_{st}$$

	d_i [m]	ε_i [-]	$\sigma_{\theta i}(20^\circ\text{C})$ [KN/cm ²]	σ_a (198°C) [KN/cm ²]	$F_i(198^\circ\text{C})$ [KN]	$M_i(198^\circ\text{C})$ x (-1) [KN.m]
Les barres d'acier dans la zone Tendue.	0,08	0,22	4,40	4,40	4,97	0,40
	0,24	0,67	13,40	13,40	15,14	3,63
	0,4	1,11	22,20	22,20	25,09	10,03
	0,56	1,56	31,20	31,20	35,26	19,74
	0,72	1,74	40,00	40,00	45,20	32,54
	0,88	1,74	40,00	40,00	45,20	39,78
	1,04	1,74	40,00	40,00	45,20	47,01
	1,2	1,74	40,00	40,00	45,20	54,24
	1,36	1,74	40,00	40,00	45,20	61,47
	1,52	1,74	40,00	40,00	45,20	68,70
	1,68	1,74	40,00	40,00	45,20	75,94
	1,84	1,74	40,00	40,00	45,20	83,17
	2	1,74	40,00	40,00	45,20	90,40
	2,16	1,74	40,00	40,00	45,20	97,63
	2,32	1,74	40,00	40,00	45,20	104,86
	2,48	1,74	40,00	40,00	45,20	112,10
	2,64	1,74	40,00	40,00	45,20	119,33
	2,8	1,74	40,00	40,00	45,20	126,56
	2,96	1,74	40,00	40,00	45,20	133,79
	3,12	1,74	40,00	40,00	45,20	141,02
3,28	1,74	40,00	40,00	45,20	148,26	
3,44	1,74	40,00	40,00	45,20	155,49	
3,6	1,74	40,00	40,00	45,20	162,72	
					$\sum F_{st(198^\circ)} =$ 939,26 KN	$\sum M_{st(198^\circ)} =$ 1888,82KN.m
					$d = \frac{M_{st(198^\circ)}}{F_{st(198^\circ)}} = \frac{1888,82}{939,26}$ = 2,01 m	

Tableau 5-8: différentes valeurs des forces et moments repris par les barres tendues de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 198^\circ$ Pour la 1^{ème} tranche W_1 .

3-1-2 Les sollicitations reprise par la couche du béton est les suivantes :

- a- La contrainte limite reprise par le béton comprimée dans la 1^{er} tranche à température moyenne de 198°C est la suivante

$$f_{bu(\theta=198^\circ)} = f'_{bu(\theta=20^\circ)} \times K_{c,198^\circ}$$

$$f_{bu(\theta=198^\circ)} = 1.85 \times 0.95 = 1.758 \text{ KN/cm}^2$$

- b- Calcul de la force reprise par le béton comprimé :

$$\begin{aligned} F_{bc(198^\circ)} &= 0.8 L_c \times e_1 \times f_{bu(198^\circ)} \\ &= 0.8 \times 126 \times 5 \times 1.758 = 886.03 \text{ KN} \\ F_{bc(198^\circ)} &= 886.03 \text{ KN} \end{aligned}$$

- c- Calcul du moment fléchissant du béton comprimé par rapport à l'axe neutre:

$$\begin{aligned} M_{bc(\theta=198^\circ)} &= - F_{bc(198^\circ)} \times d_{bc} \\ &= - 886.03 \times 0.756 = - 669.83 \text{ KN.m} \\ M_{bc(\theta=198^\circ)} &= - 669.83 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

3-2-3 Calcul des sollicitations résultantes reprise par rapport à L'axe neutre dans la 1^{er} tranche à température moyenne de 198°C :

- Effort normale / Axe-Neutre :

$$\begin{aligned} N_{(\theta=198^\circ)} &= \sum F_{i(\theta=198^\circ)} = F_{bc(\theta=198^\circ)} + F_{sc(\theta=198^\circ)} - F_{st(\theta=198^\circ)} \\ &= 886.03 + 306.46 - 939.26 = 253.23 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$\text{Donc } N_{\text{Axe Neutre } (\theta=198^\circ)} = 253.23 \text{ KN}$$

- Moment fléchissant / Axe-Neutre :

$$\begin{aligned} M_{\text{Axe Neutre } (\theta=198^\circ)} &= \sum M_{i(\theta=198^\circ)} = - M_{bc(\theta=198^\circ)} - M_{sc(\theta=198^\circ)} - M_{st(\theta=198^\circ)} \\ &= - 669.83 - 246.33 - 1888.82 = - 2805 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

$$\text{Donc : } M_{\text{Axe Neutre } (\theta=198^\circ)} = - 2805 \text{ KN.m}$$

3-2-4 Calcul des sollicitations résultantes reprise par rapport au (C.D.G) de la 1^{er} tranche à température moyenne de 198°C :

- L'effort Normale/ C.D.G :

$$N_{\text{C.D.G } (\theta=198^\circ)} = N_{\text{Axe Neutre } (\theta=198^\circ)} = 253.23 \text{ KN}$$

- Moment fléchissant / C.D.G:

$$M_{\text{C.D.G } (\theta=198^\circ)} = M_{\text{Axe Neutre } (\theta=198^\circ)} - N_{\text{Axe Neutre } (\theta=198^\circ)} \times \delta$$

Avec : $\delta_{(\theta=198^\circ)} = 120 \text{ cm} = 1,20 \text{ m}$

Donc : $M_{/C.D.G(\theta=198^\circ)} = (-2805) - 253.23 \times 1.20 = - 3109 \text{ KN.m}$

$M_{/C.D.G(\theta=198^\circ)} = - 3109 \text{ KN.m}$

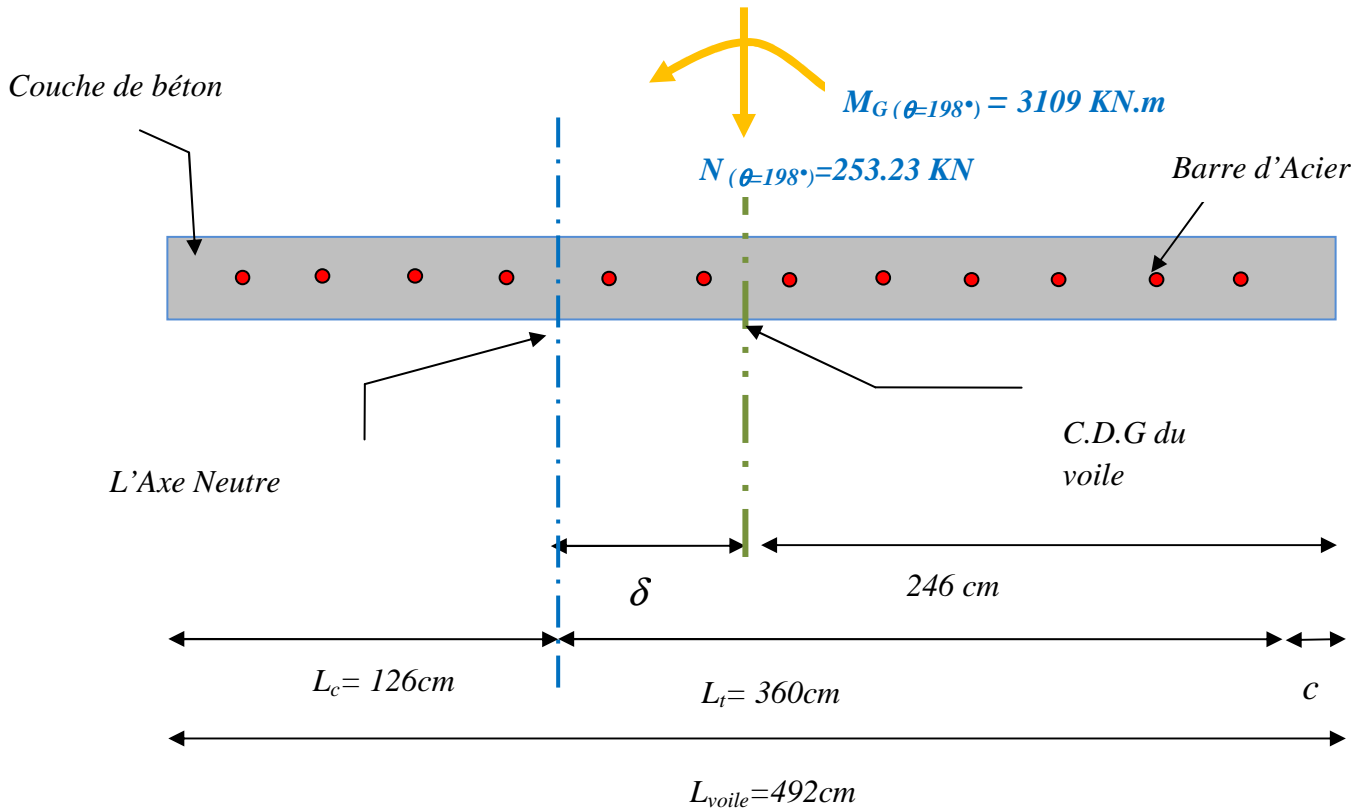


Figure 5-32: Diagramme résultant des sollicitations (M et N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 198°C

3-3 La tranche W_2 à température moyen $\theta_2 = 313^\circ \text{ C}$

Dans cette 2^{ème} tranche on trouve un seul matériau qui est sollicité au feu (une couche de béton de 0.5 m d'épaisseur).

3-2-1 La contrainte limite du béton est donnée par la formule suivante :

$$f_{bu(\theta=313^\circ)} = f'_{bu(\theta=20^\circ)} \times K_{c;313^\circ}$$

Avec :

$$K_{c;313^\circ} = 0.837 \quad \text{et} \quad f'_{bu} = 1.85 \text{ KN/cm}^2$$

$$f_{bu(\theta=313^\circ)} = 1.85 \times 0.837 = 1.548 \text{ KN/cm}^2$$

$$f_{bu(\theta=313^\circ)} = 1.548 \text{ KN/cm}^2$$

3-2-5 Calcul de la force reprise par le béton comprimé :

$$F_{bc(313^\circ)} = 0.8 \times L_c \times e_2 \times f_{bu(313^\circ)}$$

$$= 0.8 \times 126 \times 5 \times 1.548 = 780.20 \text{ KN}$$

$$F_{bc(313^\circ)} = 780.20 \text{ KN}$$

3-2-6 Calcul du moment fléchissant du béton comprimé par rapport à l'axe neutre:

$$M_{bc/AN(\theta=313^\circ)} = - F_{bc(313^\circ)} \times d_{bc}$$

$$= - 780.20 \times 0.756 = - 589.8 \text{ KN.m}$$

$$M_{bc/AN(\theta=313^\circ)} = - 589.8 \text{ KN.m}$$

3-2-7 Calcul du moment fléchissant du béton comprimé par rapport au (C.D.G) du voile :

- L'effort Normale/ C.D.G :
 $N_{/C.D.G(\theta=313^\circ C)} = F_{bc(\theta=313^\circ)} = 780.20 \text{ KN}$
- Moment fléchissant / C.D.G:

$$M_{/C.D.G(\theta=313^\circ)} = M_{AN(\theta=313^\circ)} - N_{AN(\theta=313^\circ)} \times \delta$$

Avec : $\delta = 120 \text{ cm} = 1,20 \text{ m}$

Donc : $M_{/C.D.G(\theta=313^\circ)} = (- 589.8) - 780.20 \times 1.20 = - 1526 \text{ KN}$

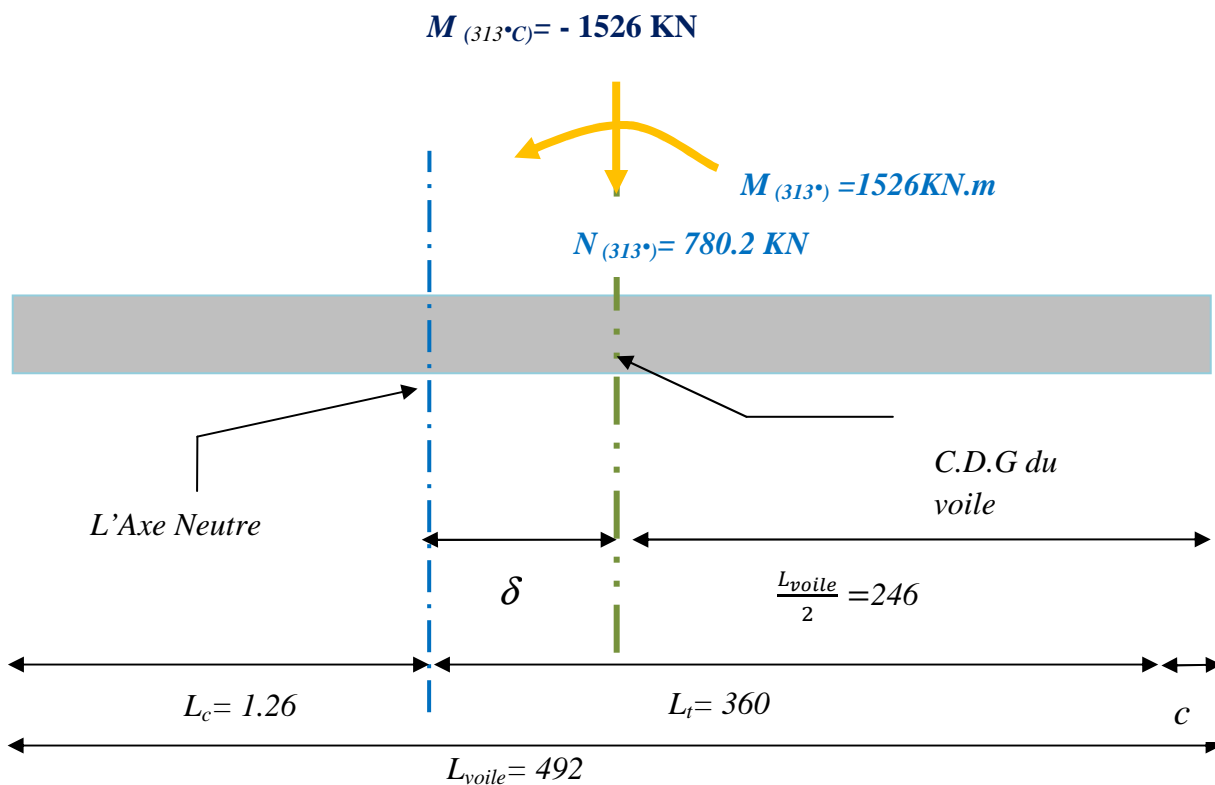


Figure 5- 33: Diagramme résultant des sollicitations (Met N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 313°C

3-4 La tranche W_3 à température moyen $\theta_3 = 428^\circ \text{C}$

Dans cette 3^{ème} tranche on trouve un seul matériau qui est sollicité au feu (une couche de béton de 5cm d'épaisseur).

3-4-5 La contrainte limite du béton est donnée par la formule suivante :

$$f_{bu(\theta=428^\circ)} = f'_{bu(\theta=20^\circ)} \times K_{c,428^\circ}$$

Avec :

$$K_{c,428} = 0.708 ; \text{ et } f'_{bu} = 1.85 \text{ KN/cm}^2$$

$$f_{bu(\theta=428^\circ)} = 1.85 \times 0.708 = 1.309 \text{ KN/cm}^2$$

$$f_{bu(\theta=428^\circ)} = 1.309 \text{ KN/cm}^2$$

3-4-6 Calcule de la force reprise par le béton comprimé :

$$\begin{aligned} F_{bc(428^\circ)} &= 0.8 L_c \times e_3 \times f_{bu(428^\circ)} \\ &= 0.8 \times 126 \times 5 \times 1.309 = 659.70 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$F_{bc(428^\circ)} = 659.70 \text{ KN}$$

3-4-7 Calcule du moment fléchissant reprise par le béton comprimé par rapport à l'axe neutre :

$$\begin{aligned} M_{bc/AN(\theta=428^\circ)} &= - F_{bc(428^\circ)} \times d_{bc} \\ &= - 659.70 \times 0.756 = - 498.73 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

$$M_{bc/AN(\theta=428^\circ)} = - 498.73 \text{ KN.m}$$

3-4-8 Calcule des sollicitations résultantes reprise par la couche du béton par rapport au (C.D.G) du voile :

- L'effort Normale/ C.D.G :

$$N_{/C.D.G(\theta=428^\circ \text{C})} = F_{bc(\theta=428^\circ)} = \mathbf{659.70 \text{ KN}}$$

- Moment fléchissant / C.D.G:

$$M_{/C.D.G(\theta=428^\circ)} = M_{/AN(\theta=428^\circ)} - N_{/Axe\ Neutre(\theta=428^\circ)} \times \delta$$

$$\text{Avec : } \delta = 120 \text{ cm} = 1,20 \text{ m}$$

$$\text{Donc : } M_{/C.D.G(\theta=428^\circ)} = (- 498.73) - 659.7 \times 1.20 = -1290.40 \text{ KN.m}$$

$$\mathbf{M_{(428^\circ \text{C})} = 1290.40 \text{ KN.m}}$$

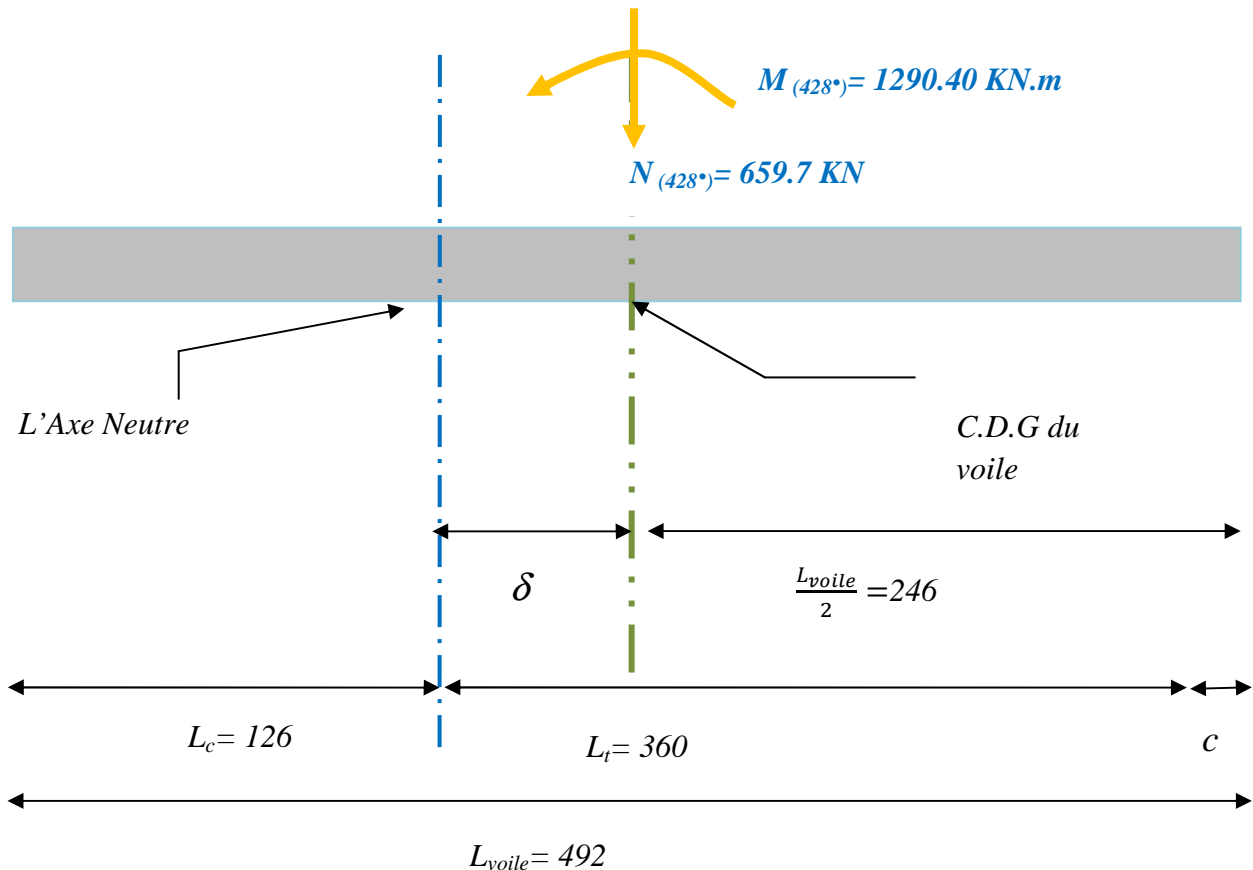


Figure 5- 34: Diagramme résultant des sollicitations (M et N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 428°C

3-5 La tranche W_4 à température moyen $\theta_4 = 543^\circ \text{ C}$

Dans cette dernière tranche on trouve deux matériaux qui sont sollicités au feu (une couche de béton, et une nappe de barre d'acier). Avec un facteur de réduction de caractéristiques de résistance des aciers est $K_{s;543^\circ} = 0,647$; et un facteur de réduction de la résistance caractéristique à la compression du béton égal $K_{c;543^\circ} = 0,536$

3-5-1 Les sollicitations reprise par les barres d'acier sont les suivantes :

- a- Les contraintes relatives pour chaque barre d'acier dans la couche w_4 sont données par la formule suivante :

$$\sigma_{es(\theta=543^\circ)} = \sigma_{es(\theta=20^\circ)} \times K_{s;543^\circ}$$

Donc : $\sigma_{es(\theta=543^\circ)} = \sigma_{es(\theta=20^\circ)} \times 0.647$

- b- Les efforts normaux et les moments fléchissant repris par chaque barre d'acier « i » se trouvant dans la 4^{ème} couche à température moyenne de 543°C, sont résumer

dans les deux tableaux (5-9 et 5-10) qui suit, et on a déduit les sollicitations résultantes internes dans chaque zone.

c- 1 Le tableau (5-9) est le résumé du détail de calcul des barres se trouvant dans la zone comprimée avec :

- $F_{sc(\theta=543^\circ)} = \sum F_{i(\theta=543^\circ)}$ avec $F_{si(\theta=543^\circ)} = \sigma_{si(\theta=543^\circ)} \times 1.13 \text{ cm}^2$
- $M_{sc(\theta=543^\circ)} = \sum M_{i(\theta=543^\circ)} \rightarrow M_{sc(\theta=543^\circ)} = F_{sc(\theta=543^\circ)} \times d_{sc}$

	d_i [m]	ε_i [-]	$\sigma_{\theta_i}(20^\circ)$ [KN/cm ²]	$\sigma_{\theta}(543^\circ)$ [KN/cm ²]	$F_{sci}(543^\circ\text{C})$ [KN]	$M_{sci}(543^\circ\text{C})$ x (-1) [KN.m]
Les barres d'acier dans la zone Comprimée.	0,08	0,22	4,40	2,85	3,22	0,26
	0,24	0,67	13,40	8,67	9,80	2,35
	0,4	1,11	22,20	14,36	16,23	6,49
	0,56	1,56	31,20	20,19	22,81	12,77
	0,72	1,74	40,00	25,88	29,24	21,06
	0,88	1,74	40,00	25,88	29,24	25,74
	1,04	1,74	40,00	25,88	29,24	30,41
	1,2	1,74	40,00	25,88	29,24	35,09
	1,26	1,74	40,00	25,88	29,24	36,85
					$\sum F_{sc(543^\circ)} =$ 198.28 KN	$\sum M_{sc(543^\circ)} =$ 171.02 KN.m
					$d = \frac{M_{sc(543^\circ)}}{F_{sc(543^\circ)}} = \frac{171.02}{198.28}$ = 0,86 m	

Tableau 5- 9: différentes valeurs des forces et moments dans la zone comprimée de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 543^\circ$ Pour la 4^{ème} tranche W_4 .

c- 2 Le tableau (5-10) est le résumé du détail de calcul des barres se trouvant dans la zone comprimée avec :

- $F_{st(\theta=543^\circ)} = \sum F_{i(\theta=543^\circ)}$ avec $F_{si(\theta=543^\circ)} = \sigma_{si(\theta=543^\circ)} \times 1.13 \text{ cm}^2$
- $M_{st(\theta=543^\circ)} = \sum M_{i(\theta=543^\circ)} \rightarrow M_{st(\theta=543^\circ)} = F_{st(\theta=543^\circ)} \times d_{st}$

	d_i [m]	ε_i [-]	$\sigma_{\theta_i}(20^\circ)$ [KN/cm ²]	$\sigma_{\theta}(543^\circ)$ [KN/cm ²]	$F_{sti}(543^\circ C)$ [KN]	$M_{sti}(543^\circ C)$ $\times (-1)$ [KN.m]
<i>Les barres d'acier dans la zone Tendue.</i>	0,08	0,22	4,40	2,85	3,22	0,26
	0,24	0,67	13,40	8,67	9,80	2,35
	0,4	1,11	22,20	14,36	16,23	6,49
	0,56	1,56	31,20	20,19	22,81	12,77
	0,72	1,74	40,00	25,88	29,24	21,06
	0,88	1,74	40,00	25,88	29,24	25,74
	1,04	1,74	40,00	25,88	29,24	30,41
	1,2	1,74	40,00	25,88	29,24	35,09
	1,36	1,74	40,00	25,88	29,24	39,77
	1,52	1,74	40,00	25,88	29,24	44,45
	1,68	1,74	40,00	25,88	29,24	49,13
	1,84	1,74	40,00	25,88	29,24	53,81
	2,00	1,74	40,00	25,88	29,24	58,49
	2,16	1,74	40,00	25,88	29,24	63,17
	2,32	1,74	40,00	25,88	29,24	67,85
	2,48	1,74	40,00	25,88	29,24	72,53
	2,64	1,74	40,00	25,88	29,24	77,21
	2,8	1,74	40,00	25,88	29,24	81,88
	2,96	1,74	40,00	25,88	29,24	86,56
	3,12	1,74	40,00	25,88	29,24	91,24
3,28	1,74	40,00	25,88	29,24	95,92	
3,44	1,74	40,00	25,88	29,24	100,60	
3,6	1,74	40,00	25,88	29,24	105,28	
					$\sum F_{st(543^\circ)} =$ 607,7 KN	$\sum M_{st(543^\circ)} =$ 1222,06KN.m
					$d = \frac{M_{st(543^\circ)}}{F_{st(543^\circ)}} = \frac{1222,06}{607,7}$ = 2,01 m	

Tableau 5- 10 : différentes valeurs des forces et moments dans la zone tendue de l'acier de la section d'un voile sous incendie, à température moyenne de $\theta = 543^\circ$ Pour la 4^{ème} tranche W_4

3-5-2 Les sollicitations reprise par la couche du béton est les suivantes :

a- La contrainte limite reprise par le béton comprimée dans la 4^{ème} tranche a température moyenne de 543°C est la suivante

$$f_{bu(\theta=543^\circ)} = f'_{bu(\theta=20^\circ)} \times K_{c;543^\circ}$$

$$f_{bu(\theta=543^\circ)} = 1.85 \times 0.536 = 0.991 \text{ KN/cm}^2$$

b- Calcule de la force reprise par le béton comprimé :

$$\begin{aligned} F_{bc(543^\circ)} &= 0.8 L_c \times e_4 \times f_{bu(543^\circ)} \\ &= 0.8 \times 126 \times 5 \times 0.991 = 499.5 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$F_{bc(543^\circ)} = 499.5 \text{ KN}$$

c- Calcule du moment fléchissant reprise par le béton comprimé par rapport à l'axe neutre :

$$\begin{aligned} M_{bc/AN(\theta=543^\circ)} &= - F_{bc(543^\circ)} \times d_{bc} \\ &= - 499.5 \times 0.756 = - 377.6 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

$$M_{bc/AN(\theta=543^\circ)} = - 377.6 \text{ KN.m}$$

3-5-3 Calcule des sollicitations résultantes reprise par rapport à L'axe neutre dans la 4^{ème} tranche à température moyenne de 543°C :

- L'effort Normale/Axe-Neutre :

$$\begin{aligned} N_{(\theta=543^\circ)} &= \sum F_{i(\theta=543^\circ)} = F_{bc(\theta=543^\circ)} + F_{sc(\theta=543^\circ)} - F_{st(\theta=543^\circ)} \\ &= 499.5 + 198.28 - 607.7 = 90 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$\text{Donc } N_{\text{Axe Neutre } (\theta=543^\circ)} = 90 \text{ KN}$$

- Moment fléchissant /Axe-Neutre :

$$\begin{aligned} M_{\text{Axe Neutre } (\theta=543^\circ)} &= \sum M_{i(\theta=543^\circ)} = M_{bc(\theta=543^\circ)} + M_{sc(\theta=543^\circ)} + M_{st(\theta=543^\circ)} \\ &= - 377.6 - 171.02 - 1222.06 = -1770.68 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

$$\text{Donc : } M_{\text{Axe Neutre } (\theta=543^\circ)} = - 1770.68 \text{ KN.m}$$

3-5-4 Calcule des sollicitations résultantes reprise par rapport au (C.D.G) de la 4^{ème} tranche à température moyenne de 543°C :

- L'effort Normale/C.D.G :

$$N_{\text{C.D.G } (\theta=543^\circ)} = N_{\text{Axe Neutre } (\theta=543^\circ)} = 90 \text{ KN}$$

- Moment fléchissant /C.D.G:

$$M_{\text{C.D.G } (\theta=543^\circ)} = M_{\text{Axe Neutre } (\theta=543^\circ)} - N_{\text{AN } (\theta=543^\circ)} \times \delta$$

$$\text{Avec: } \delta_{(\theta=543^\circ)} = 120 \text{ cm} = 1.20 \text{ m}$$

$$\text{Donc: } M_{\text{C.D.G } (\theta=543^\circ)} = (-1770.68) - 91 \times 1.20 = - 1880 \text{ KN.m}$$

$$M_{\text{C.D.G } (\theta=543^\circ)} = - 1880 \text{ KN.m}$$

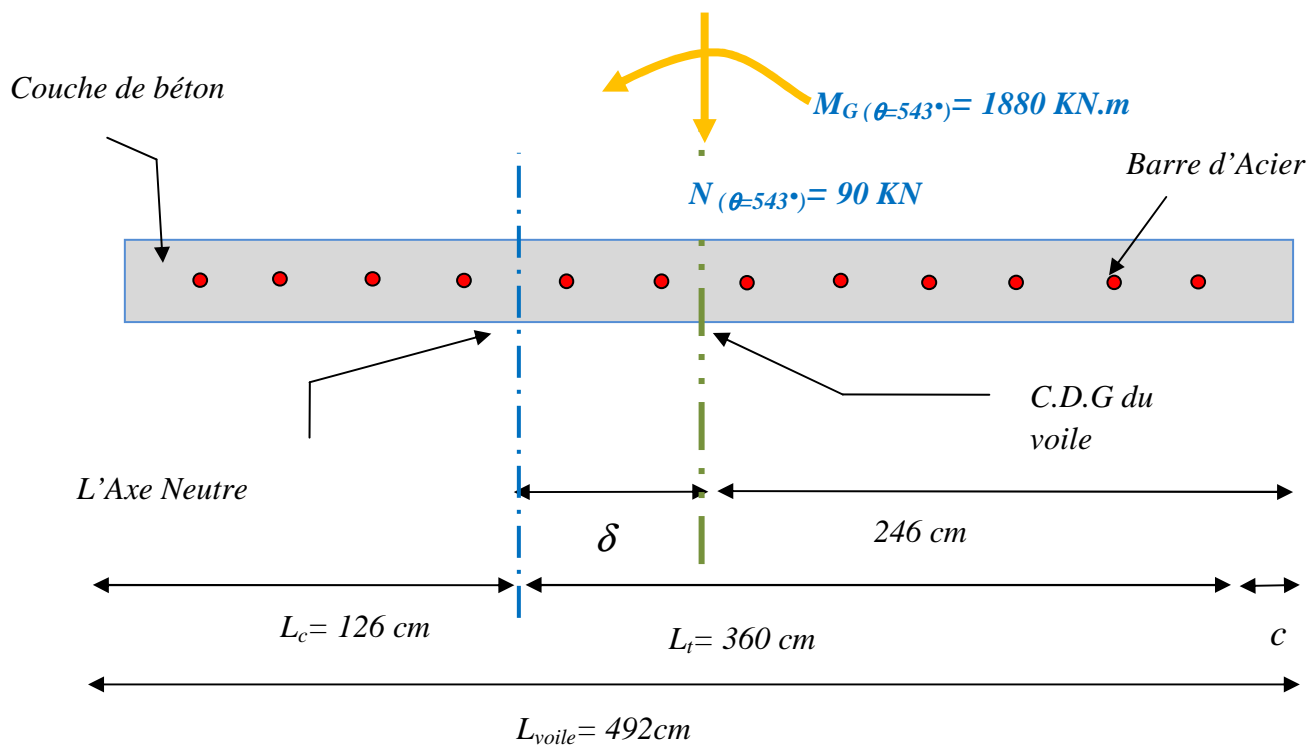


Figure 5- 35: Diagramme résultant des sollicitations (M_G et N) par rapport au C.D.G du voile pour une température de 543°C

C. 4 Calcule des sollicitations résultantes reprise par le voile exposé au feu :

- L'effort Normale/C.D.G :

$$N_{/C.D.G} = N_{\theta=198^\circ} + N_{\theta=313^\circ} + N_{\theta=428^\circ} + N_{\theta=543^\circ}$$

$$= 253.23 + 780.8 + 659.7 + 91 = 1784.13 \text{ KN}$$

$$N_{/C.D.G} = 1784.13 \text{ KN}$$

- Moment fléchissant /C.D.G:

$$M_{/C.D.G} = M_{\theta=198^\circ} + M_{\theta=313^\circ} + M_{\theta=428^\circ} + M_{\theta=543^\circ}$$

$$= (-3109) + (-1526) + (-1290.4) + (-1880)$$

$$= (-7805.4 \text{ KN.m})$$

$$M_{/C.D.G} = -7805.4 \text{ KN.m}$$

$$N_{/C.D.G} = 1784.13 \text{ KN}$$

$$M_{/C.D.G} = -7805.4 \text{ KN.m}$$

Sollicitations	Température	
	1 ^{er} cas (600° - 20°C)	2 ^{ème} cas (600° - 140°C)
N [KN]	1951,16	1784,13
M _G [KN.m]	8253,64	7805,40

Tableau 5- 11 : Tableau récapitulatif des différents résultats obtenue des sollicitations N ; M_G pour les deux Cas de température dans un milieu incendie.

V-4 Discussion des Résultats :

A partir de ces deux résultats, on peut faire l'extension pour plusieurs points à des températures différentes et pour des états de déformation différentes, on peut tracer un diagramme de courbe d'interaction N ; M.

Pour nos deux résultats obtenue lorsqu'on fixé la face exposée au feu à une température de 600°C, et on a fait varier la température de la face non exposé au feu une fois à 20°C, et une autre fois à 140°C, on présente le diagramme suivant :

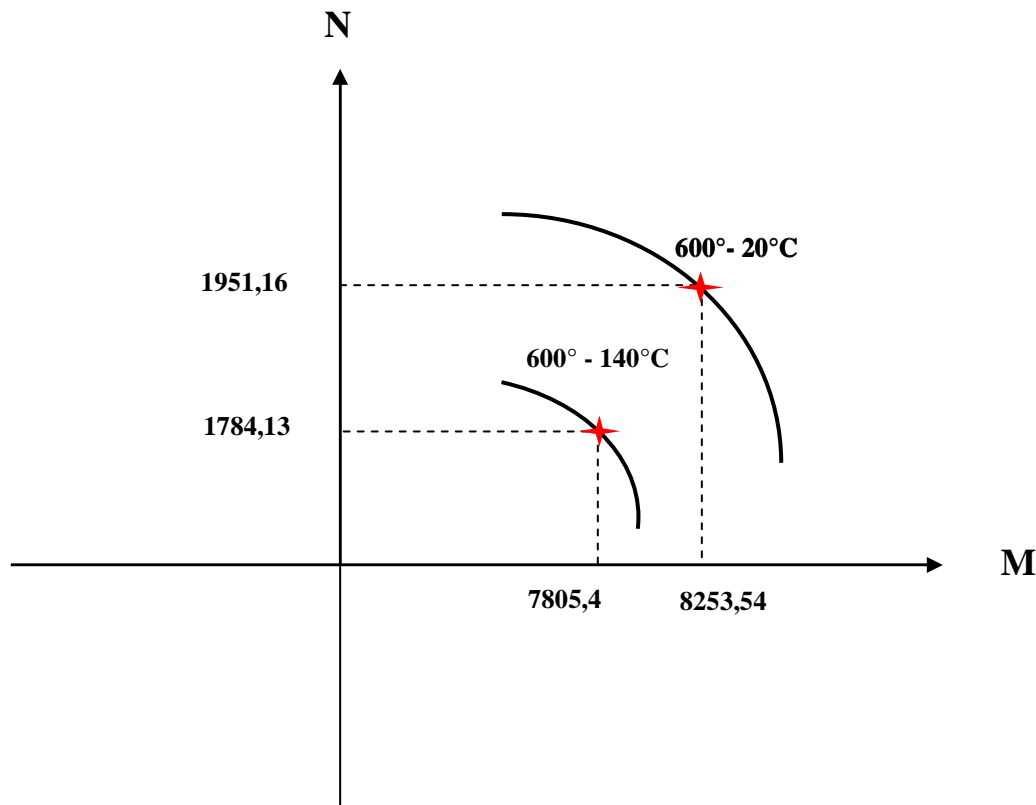


Figure 5- 36: Diagramme d'interaction de N et M pour deux variations de températures différentes.

V-5 CONCLUSION :

Ce dernier chapitre à vocation explicatif est destiné à détailler la problématique spécifique du comportement vis-à-vis de feu des parois des bâtiments industrielles ou de stockages. En s'intéressant plus précisément au cas de mur de compartimentage en béton armé, qui se présente comme élément séparatifs coupe feu, et aussi comme élément porteur soumis à des gradients thermiques dans un milieu d'incendie.

Le travail exposé dans ce chapitre est présenté en deux parties. Dont la première se résume au rôle que joue les murs de compartimentage en béton armé dans un hangar industrielle, et les différentes dispositions et règles d'applications concernant les murs et portes coupe feu.

La seconde partie est articulée autour d'un exemple de calcul de la capacité portante d'un refend avec un chargement extérieure soumis au feu, et on a exposée sa section transversale pour un état de déformation correspondant à la droite passant par le pivot (A et B).

À partir ainsi des données géométriques concernant ce refend et les propriétés thermiques des matériaux, on a calculés les sollicitations internes pour un environnement à température ambiante, en utilisant le règlement BAEL dans un premier cas, puis par analogie on a calculé les sollicitations internes pour un environnement à température élevées, en utilisant les caractéristiques mécaniques des matériaux Béton et acier dans un milieu d'incendie conformément au règlement en vigueur de l'Eurocode.

VI- 1 Conclusion Générale :

L'objectif de ce travail de recherche, est d'approfondir la connaissance et d'en comprendre le problème de la résistance vis-à-vis de l'incendie, des parois de bâtiment industriel ou de stockage. En s'intéressant plus spécifiquement au cas d'un mur de compartimentage en béton armé entre deux hangars. Ce dernier peut avoir deux fonctions principales : Une fonction d'un mur protecteur coupe- feu (C.F) ou bien d'un mur séparatif coupe-feu (S.C.F), et une fonction d'un mur porteur.

En ce qui concerne le premier cas (M.C.F), on a exposé les différentes dispositions à prendre pour rendre plus efficace le retardement de la transmission du feu d'un compartiment incendié à un autre contigu. A travers les règles d'applications en vigueur de l'Eurocode, et aussi les règles d'APSAD (R15 et R16) en la matière. Ce sont des règles élaborées sur la base des « Recommandations » établies par la Commission Incendie du Comité Européen des Assurances de FFSA.

En ce qui concerne le deuxième cas, on a fait une analyse dans un milieu ambiant en utilisant les règles de B.A.E.L, puis on a exposé deux cas d'incendie avec les gammes de températures suivantes ($600^{\circ} - 20^{\circ}\text{C}$, pour le 1^{er} cas ; et $600^{\circ} - 140^{\circ}\text{C}$, pour le 2^{ème} cas), pour nous permettre d'avoir une analyse comparatif et mettre en évidence l'influence de l'incendie réel ou conventionnel sur la capacité portante de l'élément dans une situation d'incendie (accidentel).

L'étude bibliographique a permis de constater qu'il existe une déstructuration de la pâte de ciment et des granulats avec l'élévation de la température qui affecte directement les propriétés mécaniques et de transfert du matériau. La perte des performances mécaniques est fortement liée au départ de l'eau et aux réactions de déshydratation source de l'évolution de la microstructure, et à la transformation physico-chimique de la matrice cimentaire.

Cette transformation structurelle de la matrice cimentaire se traduit par une augmentation de la taille caractéristique, par une évolution du volume poreux et par un accroissement de la perméabilité. En effet la pate de ciment se contracte tandis que les granulats se dilatent [15]. Durant l'augmentation de la température, l'eau présente dans les pores et dans les hydrates s'échappe du béton, et modifie significativement les propriétés thermiques du matériau, notamment dans le cas des bétons à hautes performances où l'augmentation de la pression de vapeur semble contribuer à l'apparition du phénomène d'écaillage et ou d'éclatement.

En conclusion, le béton permet la réalisation d'éléments de construction présentant la résistance au feu requise avec des épaisseurs courantes. Le dimensionnement des structures, du point de vue de leur résistance au feu, est généralement délicat à déterminer par le calcul. Dans la plupart des cas, on peut éviter cette démarche en se référant aux résultats des essais effectués sur des éléments de structure types, qui permettent d'apprécier leur degré de résistance au feu. Pour les ouvrages particuliers, le calcul peut s'avérer pratique.

- Pour les planchers et les poutres, on a intérêt à assurer la continuité de la transmission des efforts par des aciers disposés en partie supérieure, moins affectée en cas d'incendie.

- L'augmentation de l'enrobage des aciers est favorable à la stabilité au feu ; au-delà d'une certaine épaisseur, l'emploi d'un treillage de protection permet de s'opposer à l'éclatement du béton.

Le béton est bien adapté aux exigences des immeubles de grande hauteur et des établissements recevant du public où, sous réserve d'un enrobage correct des armatures, il assure largement la résistance exigée pour les structures et pour le compartimentage.

Il faut enfin souligner que la réglementation privilégie la prise en considération de la protection des personnes, par rapport à celle des biens, et des ouvrages.

A partir de l'exemple d'application exposé dans ce présent travail, nous pouvons montrer l'influence de l'élévation de la température sur la résistance d'un mur en béton armé, un diagramme d'interaction peut être déduit pour des températures ambiantes en fixant l'état de déformation de l'élément.

VI- 2 Perspectives :

Ce qu'on pourrait enfin suggérer comme études futures dans l'optique de la continuité et d'approfondissement de ce travail :

Dans un milieu d'incendie la transmission du feu n'est pas unidimensionnelle, elle est bidimensionnelle ou bien tridimensionnelle. Donc l'étude dans ce sens est vivement conseillée.

Référence Bibliographique.

- [1] **Helid ARESU** ; Cours de protection contre l'incendie ([http// :www.aresu.be](http://www.aresu.be))
- [2] **SOBANE** ; Fichier 1 d'observation de triangle du feu et les principes d'extinction
- [3] **DENOËL J.F** ; La protection incendie par construction en béton FEBELCEM (avril 2006) ([http// :www.febelcem.be](http://www.febelcem.be))
- [4] **HOCIN. S** ; Calcule dans la phase de refroidissement des évolutions de température dans un milieu aussi hétérogène que le béton soumis à des conditions de températures élevées. Thèse de magister Génie civil U.M.M.T.O encadré par SADAOUI.
- [5] **CT- B 94** ; Le béton et la sécurité incendie CIM- Béton centre d'information sur le ciment et ses applications.
- [6] **BOURSAS Farid** ; Analyse du comportement des structures sous l'influence du feu. Thèse de magister Génie civil université de Mentouri Constantine (2010).
- [7] **BELKHADA Salah** ; Mise en point d'une méthode simplifiée de calcul au feu des colonnes mixte acier- béton partiellement enrobée en considérant le problème de l'excentricité. Thèse de magister Génie civil U.M.M.T.O encadré par SADAOUI.
- [8] **INERIS**, Institut National de L'environnement Industriel et des Risques Incendie ; Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôts (DRA-03)
- [9] Réaction au feu des produits de construction, le nouveau système Européen **CSTB**, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
- [10] **Arrêt de 30 juin 1983** Portant sur les classifications des matériaux de construction et d'aménagement, selon leurs réactions au feu et définition des méthodes d'essais. Abroger et publier le 31/12/2003.
- [11] **Dr. GHOMARI F** ; Science des matériaux de construction Université Aboubekr Belkaid Faculté des sciences de l'ingénieur département de génie civil.
- [12] **CT-B 67** ; Conception des bâtiments d'activités en béton CIM-Béton édition février 2006.
- [13] **FRANSSEN J.M, KODUR Vand Zaharia**; Design steel structure for fire safety CRC press 2009
- [14] Shoorbaert, Fire safety engineering. Une solution pour le futur.

- [15] **DENOËL J.F** ; Sécurité incendie et construction en béton FEBELCEM édition (2007) ([http:// :www.febelcem.be](http://www.febelcem.be))
- [16] **LUIC Thomas Cuy** ; Archambault sécurité incendie collection MEMENTOS-Acier édition (2005).
- [17] **IR. P Boeraeve** ; Cours de béton armé (janvier 2010)
- [18] **CT- G12**, Fiche technique (Tome 3) ; Les ouvrages en béton : durabilité, dimensionnement et esthétique CIM-Béton (p.62- 70)
- [19] [http// : Fr. wikipédia .org/ béton- armé.](http://Fr.wikipedia.org/béton-armé)
- [20] **M^r BELAZOUGUI** ; Le béton armé aux états limites (théorie et application).
- [21] **Règle B.A.E.L 91 révisé 99**. DTU (p.18- 702) ; Règles technique de conception et de calcul des ouvrages de construction en béton armé suivant la méthode des états limites.
- [22] **Olivier GARLIADINI . IUP GC I 3** ; Option OS. Cours de béton armé ([http// :www.Mekzeulf.com/uploads/146472689. Pdf.](http://www.Mekzeulf.com/uploads/146472689.Pdf))
- [23] **Ezziane Mohammed (2012)** ; Formulation et tenue au feu des matériaux cimentaires renforcés de fibres de différentes natures. Thèse de doctorat génie civil, L'Université Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem Et L'Institut National des Sciences Appliqués de Rennes
- [24] **Hilsdorf H.K (1967)** ; A method to estimate the water content of concrete shields. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 6, pp. 251–263.
- [25] **Harmathy T.Z (1970)** ; Thermal properties of concrete at elevated temperatures. *ASTM Journal of Materials*, vol. 5, pp. 47-74
- [26] **Diederichs U., Jumpanen U.M. et Penttala V., (1992)** ; Behaviour of high temperatures. Espoo 1989, Helsinki University of technology, Department of Structural Engineering, Report 92, pp. 723.
- [27] **Bazant Z.P., Kaplan M (1996)** ; Concrete at high temperature: material behaviour and mathematical modelling. *London: Longman Concrete Design and Construction Series*, pp. 412.
- [28] **Piasta J., Sawicz Z., Rudzinski L (1984)** ; Changes in the structure of hardened paste due to high temperature. *Materials and Structures*, vol. 17, n°100, pp. 291-296.
- [29] **Bazant Z.P.,Wittmann F.H (1982)** ; Creep and Shrinkage in Concrete Structures. John Wiley & Sons.

- [30] **Dias W.P.S., Khoury G.A., Sullivan P.J.E., (1990)** ; Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700°C (1292° F). *ACI Material Journal*, vol. 87, Issue 2, pp. 160-165.
- [31] **Khoury G.A., Sullivan G.P.E., Grainger B.N (1984)** ; Radial temperature distributions within solid concrete cylinders under transient thermal states. *Magazine of concrete research*, vol. 36.
- [34] **Harmathy T.Z** ; Effect of moisture on the fire endurance of building elements. ASTM special technical publication, N° 385, 1964, (p. 74-95).
- [35] **Hertz K. D** ; Limits of spalling of fire – exposed concrete. *Fire safety journal*, vol. 38, 2003, (p. 103-116).
- [36] **Andeberg Y**; International workshop on fire performance of high-strength concrete, NIST, Gaithersburg, md, 1997.
- [37] **Ulm F-J., Coussy O., Bazant Z.P** ; The “Chunnel” fire. I: chemoplastic softening in rapidly heated concrete. *Journal of engineering mechanics*, march, 1999, p. 272-282.
- [38] **XP ENV 1992 1-2, 2005 EUROCODE 2** ; Actions sur les structures : Actions générales -Actions sur les structures en béton exposées au feu, Partie 1-2 : *Règles générales, Calcul du comportement au feu*
- [39] **XP ENV 1994**, décembre 1997, **EUROCODE 4** ; Calcul des structures mixtes acier béton et document d’application nationale partie 1-2 : *Règles générales, Calcul du comportement au feu.*
- [40] **F.ROBERT** ; (CERIB). **Eurocode 2**; Backyround and application (concepal fire design and assement) octobre 2011 Brusls (part I).
- [41] **B. BELTRAMY , J.KRUPPA** ; Résistance au feu des structures béton- acier- bois, paris 1978
- [42] **XP ENV 1993**, décembre 1997, **EUROCODE 3** ; Calcul des structures en acier béton et document d’application nationale, partie 1-2 : *Règles générales, Calcul du comportement au feu.*
- [43] **CT-B 94** ; Le béton et la sécurité incendie (p. 42-45) CIM-Béton
- [44] La Norme **P 92-701** ; Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton.
- [45] **YVES Jannot et MOYNE Christin** ; Cours de transfert thermique 2^{ème} année, école des mines, Nancy 2012.

- [46] **KAOUAN Malika** ; Analyse des contraintes mécaniques et de la fissuration des éléments en béton armé sous l'effet thermomécanique. Thèse de magister Génie civil U.M.M.T.O encadré par M^r DAHMANI. O
- [47] **J. BRAN** ; Cours sur la conduction, INSA de Lyon département de Génie civil et urbaine ([http// :www.Doc INSA-Lyon.fr/ cours/physique](http://www.Doc INSA-Lyon.fr/cours/physique). Pdf).
- [48] ([http// :www.Fsr.ac.ma/ cours/physique/ chapitre 3](http://www.Fsr.ac.ma/cours/physique/chapitre 3). Pdf).
- [49] ([http// :www.UTC.fr/ monde/cours/chapitre 3a](http://www.UTC.fr/monde/cours/chapitre 3a). html).
- [50] **Frederic DOUMENC** ; Module LA200, cours des éléments de la thermodynamique et thermique, version 1.2 Université De Pierre Et Marie Curie (paris VI).
- [51] **L. GAY et EWIZENNE, edf** ; Science d'ingénierie en incendie ([http// :www.dfr.enstra/ cours- incendie](http://www.dfr.enstra/cours- incendie). Pdf)
- [52] **CT-B 59** ; Installation classée et protection de l'environnement (p. 16-20) CIM-Béton
- [53] **BARREAU. N, LABOUTIN. N et VAUGIER. P** ; Conception des locaux de travail, risque incendie (projet : Facteur ambiant janvier 2005).
- [54] **CT-B 58** ; Conception architecturale et sécurité incendie (p. 133- 142), guide à l'usage des jeunes architectes CIM-Béton.