



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Populaire et Démocratique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي.

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد

Université d'Oran 2 Mohamed Ben

معهد الصيانة و الامن الصناعي

Institut De Maintenance Et De Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité: Sécurité Prévention et intervention

Thème

EFFET DES MATERIAUX IGNIFUGES SUR LA PROTECTION CONTRE L'INCENDIE

Présentée soutenu publiquement par:

SLAMANI Othman et CHOUGRANI Mohamed

Devant le jury composé de:

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Dr Talbi Z.	M.C.B	Université'Oran2	Encadreur
Dr Mechken A.	M.C.B	Université'Oran2	Président
Dr Bachir Bouaidja B.	M.C.B	Université'Oran2	Examineur

Année 2022/2023

REMERCIEMENT

Louange a dieux le miséricordieux qui nous a permis de bien accomplir ce modeste travail.

*Nos remerciements s'adressent tout particulièrement a notre encadreur **Mme Talbi Zahera** pour l'effort fourni, ses conseils, sa patience et sa persévérance dans notre suivi.*

Nos profonds remerciements vont aux membres de Jury

A nos familles et nos amis qui nous ont aidés par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.

A toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce travail.

S.Othman

Ch.Mohammed

Dédicace

Je dédie ce projet:

*A ma très chère mère **Aïcha***

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide

Et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

*A mon très cher père **Habib***

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et

M'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

*A mes frères **ABDELILAH** et **ABDELWAHAB** et **SidAli***

*A mes sœurs **SOUMIA** et **FATMA***

A mes chers amis Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A toute ma famille

A tous ceux que j'aime

Merci

Ch. Mohamed

Dédicace

Je dédie ce projet:

*A ma chère
mère,*

*A mon cher
père,*

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me
soutenir*

*A la famille **SLAMANI**, mes frères et sœurs et a mon neveu **RAYAN**, ils
vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect, d'amour et
reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.*

*A mes chers amis Pour leurs aides et supports dans les moments
difficiles.*

S.Othman

Sommaire :

Introduction générale :	14
Chapitre I : Généralité sur le feu	17
I.1 Introduction	1
I.1.a Définition de la combustion :	1
I.1.b Terminologies feu et incendie:	1
I.2 Le déroulement d'un incendie	1
I.2.1 Triangle du feu	1
I.2.2 Types de combustion.....	3
1°) Combustion lente.....	3
I.2.3 Les classes de feux	3
I.3 Types d'extincteurs d'incendie :	4
I.3.1 Les extincteurs à mousse	4
I.3.2 Les extincteurs à eau	5
I.3.3 Les extincteurs à poudre sèche	5
I.3.4 Les extincteurs à dioxyde de carbone (CO ₂).....	5
I.4 Notion d'explosivité (inflammable).....	6
I.4.1 Définition de l'explosion	6
I.5 Propagation et effets.....	7
I.6 Modélisation d'un incendie	8
I.6.2 Feu hydrocarbure.....	10
I.6.3 Feu extérieur	10
I.6.4 Feu paramétrique.....	12
I.6.5 Feu réel	13
I.7 Effets des incendies.....	13
I.8 Prévention et protection.....	14
Chapitre II : Les matériaux utilisés dans la protection passive contre l'incendie.....	17
II.1 Introduction	18
II.2 Caractéristiques du matériau à mettre au point.....	18
II.2.1 caractéristiques thermiques	19
II.2.2 Caractéristiques mécaniques	19
II.3.1 Matériaux de protection passive contre l'incendie	20
II.3.1.a Matériaux isolants fibreux :	20

II.3.1.b matériaux isolants cellulaires inorganiques :	21
II.3.2 Propriétés des matériaux de la protection passive	22
II.3.3 Matériaux d'isolation thermique	23
II.3.3.a béton	23
II.3.3.a Le gypse.....	24
II.3.5 Les fibres de propylènes	27
II.3.6 Matériaux intumescents	27
II.3.6.a matériaux intumescents à couche mince.....	27
II.3.6.b Matériaux intumescents à couche épaisse	28
II.3.7 Matériaux ablatifs	29
II.3.8 La perlite	29
II.3.9 La vermiculite.....	30
II.3.10 Le mica.....	31
II.4. Test de la protection passive	31
II.4.1 Méthodologie d'essais	31
II.4.2 La courbe ISO 834.....	32
CHAPITRE III : Les propriétés de l'acier et autres matériaux au feu	34
III.1 Introduction.....	35
III.2 Les propriétés physiques de l'acier	35
III.3 Le coefficient de dilatation de l'acier	37
III.4 La chaleur spécifique de l'acier	37
III.5 conductivité thermique de l'acier	38
III.6 Facteur de réduction de résistance des aciers.....	38
III.7 Comportement des autres aciers et matériaux au feu.....	39
III.7.1 Acier inoxydable	39
III.7.2 Fonte et fer forgé	40
III.7.3 Béton normal et léger.....	40
III.7.4 Briques	41
III.8 Protection des structures métalliques sous l'effet d'incendie	41
Les processus de transfert de chaleur	41
Figure III 03 : échauffement d'un profilé en acier en fonction du type de protection thermique	41
a) Echauffement par conduction	42
b) Echauffement par convection	42
c) Echauffement par rayonnement.....	43
III.9 Calcul de la température des sections métalliques lors d'un feu conventionnel	43

Chapitre IV : Description de complexe GP1/Z.....	46
IV.1 Introduction :.....	47
IV.2 Objectif de complexe GP1/Z :	47
IV.3 Fiche technique du complexe GP1/Z :	47
IV.4 Situation géographique et voisinage du complexe GP1/Z :.....	48
IV.5 Organisation du complexe GP1/Z :.....	50
IV.5.1 Organigramme du Complexe GP1/Z :.....	50
IV.5.2 Organigramme du département HSE :.....	50
IV.6 Description de procédé :(PFD).....	51
IV.6.1 Section de stockage de GPL :	52
IV.6.2 Section déshydratation:	53
IV.6.3 Section de séparation (Fractionnateur) :.....	54
Explication des (PFD) ci-dessus :.....	56
IV.6.4 Déethaniseur:	57
IV.6.5 Dépentaniseurs :.....	57
IV.6.6 Section de Réfrigération:	58
IV.6.7 Section d'huile chaude:	59
IV.6.7 Zone des utilités :	60
IV.6.8 Section stockage et expédition :.....	61
Section de stockage à basse température.....	61
Section de stockage à température ambiante	61
IV.6.9 Section BOG (Boil- Off- Gas)	62
Section jetée (CN) :.....	62
Section Chargement par Camion (CC) :.....	62
Chapitre V Partie Pratique : Etude du temps d'échauffement du matériau ignifuge du complexe GP1/Z.....	63
V.1 Introduction	64
V.2 Caractéristiques des produits ignifuges utilisés	64
V.3 Qualification Du Système Ignifuge.....	66
V.4 Mode d'application du produit ignifuge	66
V.5 Etude cinétique du matériau ignifuge.....	68
Comportement de l'acier du support non protégé au feu	68
Le facteur de section	69
V.6 Etude du cas du support de l'échangeur de chaleur.....	69

V.7 Calcul du temps de l'échauffement du support.....	70
Calcul du facteur de section du support	70
V.8 Calcul du temps de l'échauffement du support protégé par la Fendolite.....	73
Conclusion générale :.....	76

Résumé :

Le complexe GP1/Z dispose d'un système de protection passive contre l'incendie par des matériaux ignifuges de type : ciment portland avec vermiculite. Le système ignifuge devra présenter une résistance de 120 min au feu hydrocarbure en considérant les conditions d'essai définies dans la norme UL1709, lorsque ce dernier est appliqué à une épaisseur de 33.4 mm. L'objectif de ce travail est d'évaluer le temps de résistance du matériau ignifuge pour une température de 600°C, la méthode adoptée pour ce but est une résolution d'une équation différentielle de la température en fonction du temps par intégration incrémentée. Les résultats obtenus montrent une résistance de 3h 10 min du matériau ignifuge.

Les mots clés : Incendie, protection passive, Fendolite.

Abstract:

The GP1/Z complex has a passive fire protection system using fireproof materials such as Portland cement with vermiculite. The fire-retardant system must have a resistance of 120 min to hydrocarbon fire considering the test conditions defined in the UL1709 standard, when the latter is applied at a thickness of 33.4 mm.

The objective of this work is to evaluate the resistance time of the fireproof material for a temperature of 600°C, the method adopted for this purpose is a resolution of a differential equation of temperature as a function of time by incremented integration. The results obtained show a resistance of 3h 10 min of the fireproof material.

Key words: Fire, passive protection, Fendolite.

ملخص :

يحتوي مجمع GP1 / Z على نظام حماية سلبي من الحرائق باستخدام مواد مقاومة للحريق مثل الأسمنت البورتلاندي مع الفيرميكلوليت. يجب أن يتمتع نظام مثبتات الحريق بمقاومة تصل إلى 120 دقيقة للحريق الهيدروكربوني مع مراعاة ظروف الاختبار المحددة في معيار UL1709 ، عندما يتم تطبيق الأخير بسك 33.4 مم. الهدف من هذا العمل هو تقييم زمن مقاومة المادة المقاومة للحريق لدرجة حرارة 600 درجة مئوية ، والطريقة المعتمدة لهذا الغرض هي حل المعادلة التفاضلية لدرجة الحرارة كدالة للوقت عن طريق التكامل المتزايد. النتائج التي تم الحصول عليها تظهر مقاومة 3h 10 دقيقة من المادة المقاومة للحريق.

الكلمات المفتاحية: النار ، الحماية السلبية ، فيندوليت.

Liste des figures

Figure I 01 : triangle de feu

Figure I 02 : feu classe A

Figure I 03 : feu classe B

Figure I 04 : feu classe C

Figure I 05 : feu classe D

Figure I 06 : les plages de danger

Figure I 07 : les différents modes de propagation des feu

Figure I 08 : l'effet physique du feu sur l'environnement

Figure I 09 : courbe nominale du feu conventionnelle ISO834

Figure I 10 : courbe hydrocarbure du feu

Figure I 11 : exemple de feu paramétrique

Figure I 12 : exemple de feu naturel

Figure II 01 : verre cellulaire

Figure II 02: température dans une paroi en béton exposée au feu

Figure II 03 : le procédé de la géolocalisation

Figure II 04 : câbles avec des matériaux intumescents

Figure II 05 : conductivité thermique de la perlite

Figure II 06 : conductivité thermique de la vermiculite

Figure II 07 : essai au feu des matériaux

Figure II 08 : courbe ISO 834

Figure III 01 : Données de contrainte-déformation pour l'acier de nuance 43A à des températures élevées

Figure III 02: Dilatation de l'acier grade 43 avec la température

Figure III 03 : échauffement d'un profilé en acier en fonction du type de protection thermique

Figure III 04 : Structure en acier de forme I non protégés

Figure III 05: échangeur de chaleur

Figure III 06 : support métallique

Figure III 07 : forme du support étudié

Figure III 08 : Evolution de la température en fonction du temps structure non protégée

Figure III 09 : L'évolution de la température en fonction du temps pour la structure protégée par la Fendolite

Figure IV 01 : plan de situation géographique du complexe GP1/Z

Figure IV 02 : plan de masse du complexe GP1/Z

Figure IV 03 : organigramme du complexe GP1/Z

Figure IV 04 : organigramme du département de sécurité HSE

Figure IV 05: schéma général du procédé

Figure IV 06 : Représentation de la section stockage de la charge GPL

Figure IV 07 : Section de déshydratation

Figure IV 08: Section de séparation

Figure IV 09 : Fractionnateur 1/2

Figure IV 10 : PFD tête de Fractionnateur

Figure IV 11 : PFD Déethaniseur

Figure IV 12 : PFD Section de Réfrigération

Figure IV 13 : PFD déshydrateur de garde

Figure IV 14 : Section d'huile chaude 1/2

Figure IV 15 : Section d'huile chaude 2/2

Figure IV 16 : La section de reliquéfaction des vapeurs (BOG)

Figure V 01 : Structure en acier de forme I non protégés.

Figure V 02 : a) échangeur de chaleur b) support métallique.

Figure V 03 : la forme du support étudié.

Figure V 04 : Evolution de la température en fonction du temps structure non protégée.

Figure V 05 : L'évolution de la température en fonction du temps pour la structure protégée par la Fendolite.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : valeur température-temps pour la courbe ISO 834

Tableau II.1 : L'effet de l'isolant thermique sur la température de parois exposées au feu

Tableau II.2 : Propriétés des matériaux d'isolation des bâtiments (classiques et de pointe.)

Tableau II.3 : les principales sources des aluminosilicates.

Tableau III.1 : Comparaison des facteurs de rétention de résistance applicables aux températures élevées [35]

Tableau III.2 : Les propriétés physiques de l'acier inoxydable [34]

Tableau V.1: Propriétés physiques de la Fendolite

Tableau V.2: Composition de la Fendolite

Tableau V.3 : Les paramètres utilisés pour le calcul du temps

Tableau V.4 : Solution de l'équation (1) après itération

Tableau V.5: Solution de l'équation (3) par itérations

Liste des abréviations

Symbole	Définition
BLEVE	Bowling Liquide Expanding Vapor Explosion
PFA	Protection Feu Active
PFP	Protection Feu Passive
L.I.E	Limite Inférieure d'Explosivité
P.E	Plage d'explosivité
L.S.E	Limite Supérieure d'Explosivité
ISO 834	Valeur de température-temps
CFD	Computational fluid dynamics
RIA	Robinet d'incendie armé
P.F D	Description de procédé
GPL	Gaz pétroliers liquéfié

Introduction générale

Introduction générale :

La protection passive contre l'incendie est actuellement un domaine d'intérêt actif dans la technologie du bâtiment. Une des différentes approches pour obtenir un matériau qui assure cette protection est d'ajouter des substances à la formulation initiale capables d'absorber la chaleur lorsque la température du matériau augmente.

Ceci est réalisé au moyen de réactions endothermiques que ces substances subissent à des températures spécifiées. Dans le cas d'un scénario d'incendie, d'énormes quantités de chaleur sont libérées et de telles réactions d'absorption de chaleur retardent l'atteinte de températures qui peuvent être critiques pour la stabilité structurelle.

La protection passive contre l'incendie (PPF) peut être définie comme un revêtement ou système autonome qui offre une protection thermique en cas d'incendie et qui nécessite tout moyen d'amorçage, de ravitaillement ou de subsistance.

Les matériaux ignifuges sont des isolants considérés comme un type de PPF. Les performances de protection des matériaux ignifuges dépendent fortement des propriétés thermophysiques, de la structure et des modifications que ces matériaux subissent lors de l'exposition au feu.

L'American Petroleum Institute (API) divise les matériaux ignifuges en isolants actifs et inactifs. Les isolants actifs subissent un changement physique ou chimique important lorsqu'ils sont exposés à la chaleur (par exemple, les revêtements intumescents époxy).

Dans le cas de tels matériaux, un changement important des propriétés physiques et chimiques lors de l'exposition au feu est attendu. Les matériaux ignifuges inactifs comprennent les revêtements tels que les matériaux à base de ciment et les fibres synthétiques, qui ne sont pas intrinsèquement conçus pour être modifiés pendant l'exposition au feu.

Néanmoins, tous les matériaux subissent en fait des changements dans les propriétés d'isolation lors de l'exposition au feu. Ceci, à son tour, peut affecter de manière significative les performances du PPF et doit être soigneusement pris en compte lors de la notation et de la conception.

L'efficacité de la protection passive contre l'incendie est déterminée en fonction de sa capacité à protéger une structure contre l'élévation de température et la capacité à empêcher l'absorption de la charge thermique. A cet effet, la présente étude est une contribution à l'évaluation de la durée du chauffage d'une structure métallique protégée par un matériau ignifuge utilisé au complexe GP1/Z. Ce mémoire comporte cinq chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons abordé les différentes généralités sur le feu à savoir, le déroulement et le développement d'un incendie, nous avons traité également la modélisation d'un incendie par la courbe ISO 834.

Le deuxième chapitre est consacré aux différents matériaux utilisés dans la protection passive contre l'incendie tels que ; le ciment, la vermiculite, le gypse, le béton... Les propriétés thermiques sont bien détaillées.

Dans le troisième chapitre nous avons fait une description du complexe GP1/Z, dans lequel notre étude a été réalisée, quant au quatrième chapitre qui est une suite du troisième chapitre, nous avons effectué une recherche approfondie sur la résistance de l'acier aux incendies.

Le cinquième chapitre est la partie pratique qui est une étude du temps d'échauffement du matériau ignifuge du complexe GP1/Z lorsqu'il est exposé aux hautes températures.

Enfin, on termine par une conclusion générale faisant apparaître l'intérêt du sujet et les perspectives recommandées

Chapitre I : Généralité sur le feu

I.1 Introduction

Chaque année des millions de personnes décèdent à cause du feu ; ainsi que des dégâts matériels considérables sont enregistrés. Les objectifs de la sécurité incendie [1] sont la protection efficace contre les risques d'incendie des personnes et des biens et plus précisément ils concernent:

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

Les exigences de base de la protection incendie consistent a :

- 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 sa peurs pompiers...

I.1.a Définition de la combustion :

La combustion est une réaction chimique d'oxydation d'un combustible par un comburant. Une source d'énergie est nécessaire pour déclencher cette réaction.

I.1.b Terminologies feu et incendie:

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

I.2 Le déroulement d'un incendie

I.2.1 Triangle du feu

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

Chapitre I : Généralité sur le feu

- **Présence d'un combustible** : matière inflammable solide : (bois, charbon, papier..).Liquide:(essence, alcools...);gazeux:(butane, propane...).
 - **Présence d'un carburant** : corps qui se combinant avec le combustible qui permet la combustion (oxygène, air, peroxyde...)
 - **Source d'inflammation** : source d'énergie nécessaire au démarrage de la combustion (Flamme étincelle décharge électrique...)
- Ces trois composantes sont souvent représentées graphiquement sous forme d'un triangle appelé triangle du feu [3].



Figure I 01. Triangle du Feu [3]

1°) Le combustible

C'est le matériau qui va fournir la matière première de la combustion. Il peut-être:

Solide : (bois, papier, tissus...)

Liquide : (hydrocarbure...)

Gazeux : (gaz naturel, butane...)

2°) Le comburant

C'est le corps qui, en associant à un combustible rend la combustion possible : oxygène, air, peroxyde,

3°) L'énergie d'activation

C'est l'énergie nécessaire pour la naissance de la réaction chimique de combustion : flammes, électricité, étincelles, chaleur, combustions spontanées, échauffement, frottements mécaniques...

I.2.2 Types de combustion

1°) Combustion lente

C'est une combustion sans émission de lumière (par exemple: la combustion dans les décharges d'ordures ménagères). Comme exemple : la réaction d'oxydation.

2°) Combustion vive

La combustion est complète dégageant ainsi de la chaleur et de la lumière en quantité élevée.

3°) Combustion très vive

Le feu se développe violemment en produisant beaucoup de chaleur et avec pression.

C'est la déflagration.

4°) Combustion instantanée

C'est la combustion immédiate d'un corps, avec une grande vitesse de propagation (supérieure à la vitesse du son) et une très forte pression. C'est l'explosion.

I.2.3 Les classes de feux

Les feux sont répertoriés dans quatre classes:

1. **Classe A:** feu de matériaux solides dont la combustion forme des braises
-Bois, Papiers, Tissu, PVC etc....



Fig.02. Feu Classe A

2. **Classe B:** feu de liquides ou solides liquéfiables
-Essence, Pétrole, Huiles, Solvants, peintures, polystyrène ...



Fig.03. Feu Classe B

3. Classe C: feu de gaz

-Méthane, Butane, Propane



Fig.04. Feu Classe C

4. Classe D: feu de métaux

-Aluminium, Sodium, Potassium, Métaux alcalins, etc...



Fig.05. Feu Classe D

5. **Incendies d'origine électrique** : incendies impliquant des équipements électriques, mais qui changent de classe dès que l'on retire l'objet électrique (appareils électriques défectueux).

I.3 Types d'extincteurs d'incendie :

I.3.1 Les extincteurs à mousse

Les extincteurs à mousse sont les extincteurs les plus couramment utilisés pour les incendies de classe B. Cependant, ils sont à base d'eau, ce qui signifie qu'ils peuvent également être utilisés pour les incendies de classe A. En revanche, il ne doit pas être utilisé pour les incendies causés par des métaux inflammables, les feux de cuisine et les incendies d'équipements électriques.

➤ Comment fonctionne cet extincteur ?

Ces extincteurs fonctionnent en créant un effet de refroidissement sur le combustible à l'origine de l'incendie. Lorsqu'il est versé sur un liquide en feu, le feu s'éteint en créant une barrière entre le combustible et la flamme à l'aide de l'agent moussant.

I.3.2 Les extincteurs à eau

Ils sont principalement utilisés pour les risques d'incendie de classe A. Dans la plupart des locaux, il est nécessaire de disposer d'extincteurs à mousse ou à eau. Ce type d'extincteur ne doit pas être utilisé pour les feux de cuisine, les feux causés par des gaz et des liquides inflammables ainsi que les feux impliquant des équipements électriques.

➤ **Comment fonctionne cet extincteur ?**

En ce qui concerne le fonctionnement interne, un extincteur à eau fonctionne en ayant un effet de refroidissement sur le liquide qui fait que le combustible brûle plus lentement jusqu'à l'extinction complète des flammes.

I.3.3 Les extincteurs à poudre sèche

Également connus sous le nom d'extincteurs ABC, ils peuvent être utilisés pour les feux de classe A, B et C. Cependant, ils ne doivent pas être utilisés dans des endroits où le feu est plus intense ou dans des espaces clos car la poudre sèche contenue dans l'extincteur peut être facilement inhalée. En outre, il n'est pas facile de nettoyer les résidus une fois l'incendie terminé. Ils peuvent également être utilisés pour les feux d'équipements électriques.

Il peut être utilisé pour les incendies causés par diverses matières organiques, notamment le bois, le charbon, les textiles, les tissus, le carton et le papier, entre autres ; pour les incendies provoqués par des liquides inflammables tels que l'essence et la peinture, ainsi que par des gaz inflammables tels que l'acétylène et le gaz de pétrole liquéfié. Tout incendie impliquant des équipements électriques jusqu'à 1000 V peut également être traité à l'aide de cet extincteur.

I.3.4 Les extincteurs à dioxyde de carbone (CO₂)

Les extincteurs à CO₂ sont principalement utilisés pour les risques d'incendie d'origine électrique et sont généralement le principal type d'extincteur fourni dans les salles de serveurs informatiques. Ils éteignent également les incendies de classe B. Les extincteurs au CO₂ étouffent les incendies en déplaçant l'oxygène dont le feu a besoin pour brûler.

I.4 Notion d'explosivité (inflammable)

I.4.1 Définition de l'explosion

L'explosion est une réaction brusque d'oxydation ou de décomposition entraînant une élévation de température, de pression, ou les deux simultanément.

L'énergie libérée par l'explosion se matérialise par une onde de choc, accompagnée ou non de débris, et d'une vague de chaleur.

I.4.2 Plages de danger

Lors d'un incendie, les matériaux en combustion vont libérer toutes sortes de gaz, sous formes de fumées. Ces fumées, combinées à l'oxygène de l'air, forment un mélange, qui sera explosif dans une certaine mesure. Cette mesure est différente pour chaque produit en combustion.

On distinguera trois plages différentes :

-La **L.I.E** (Limite Inférieure d'Explosivité) : sous la L.I.E, la teneur en gaz est insuffisante pour rendre le mélange explosif;

-La **P.E** (Plage d'Explosivité) : le mélange est explosif;

-La **L.S.E** (Limite Supérieure d'Explosivité) : au-dessus de la L.S.E, il n'y a plus assez d'oxygène pour permettre la combustion du gaz.

Attention, lors de la ventilation, il y aura forcément passage en plage d'explosivité.

Certains produits ont une plage d'explosivité réduite (exemple : l'essence de térébenthine, de 0,7 à 2,5% de gaz dans l'air) et d'autres, une plage d'explosivité très large (exemple : (l'hydrogène, de 4 à 75% de gaz dans l'air).

Ces plages peuvent être résumées par le schéma suivant:

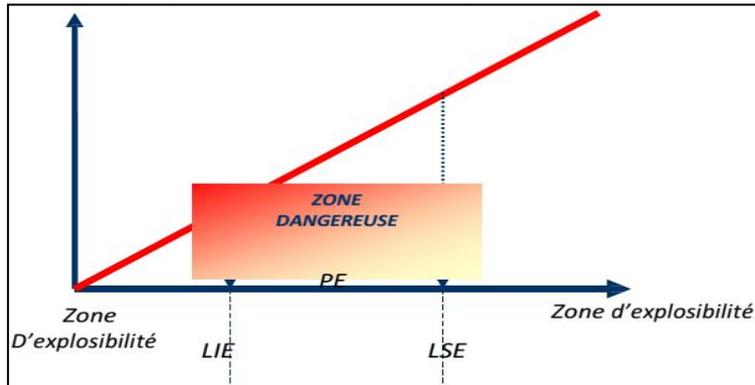


Figure 06. Les Plages de Danger

I.5 Propagation et effets

I.5.1 Causes des incendies

- **Les causes humaines**

- L'imprudence, l'ignorance, la malveillance, la négligence technique...

- **Les causes naturelles**

- La foudre, la fermentation (tourbières,...), le soleil (la sécheresse)...

- **Les causes industrielles**

- Sur les ouvrages électriques :

- Une installation électrique en mauvais état.

- L'absence de dispositifs de protection (fusibles, disjoncteur).

- L'électricité statique.

- La projection de particules en fusion (disqueuse, tronçonneuse).

- La production de points chauds (soudures, chaufferettes etc...).

- Le blocage des dispositifs de protection (disjoncteurs, contacteurs).

- La suppression des fusibles et le remplacement par des fusibles plus gros ou tout

- autre dispositif (pièces en alu, acier, etc...).

- **Les causes chimiques :**

- mauvaise manipulation de produits dangereux.

- mélange entre produits chimiques (risque d'explosion).

- **Les causes biologiques :**
 - Fermentation dans silo.
 - Émanation de gaz du es aux animaux.
 - Émanation de gaz dus à la putréfaction d'algues.
- **Les causes mécaniques :**
 - Échauffements mécaniques.

I.5.2 Les différents modes de propagation

La propagation peut se de quatre manières différentes (parfois combinées entre elles) :

- **Par rayonnement thermique:** c'est la chaleur qui émane du feu.
- **Par convection:** c'est un déplacement de gaz ou de fumée chauds. Un gaz chaud s'élève, car la chaleur diminue sa densité, et le rend ainsi plus léger.
- **Par conduction:** c'est un transfert de chaleur au sein d'un ou plusieurs éléments.
- **Par projection ou écoulement de liquide:** lors d'un incendie, l'air transporte faire des particules enflammées (escarbilles).

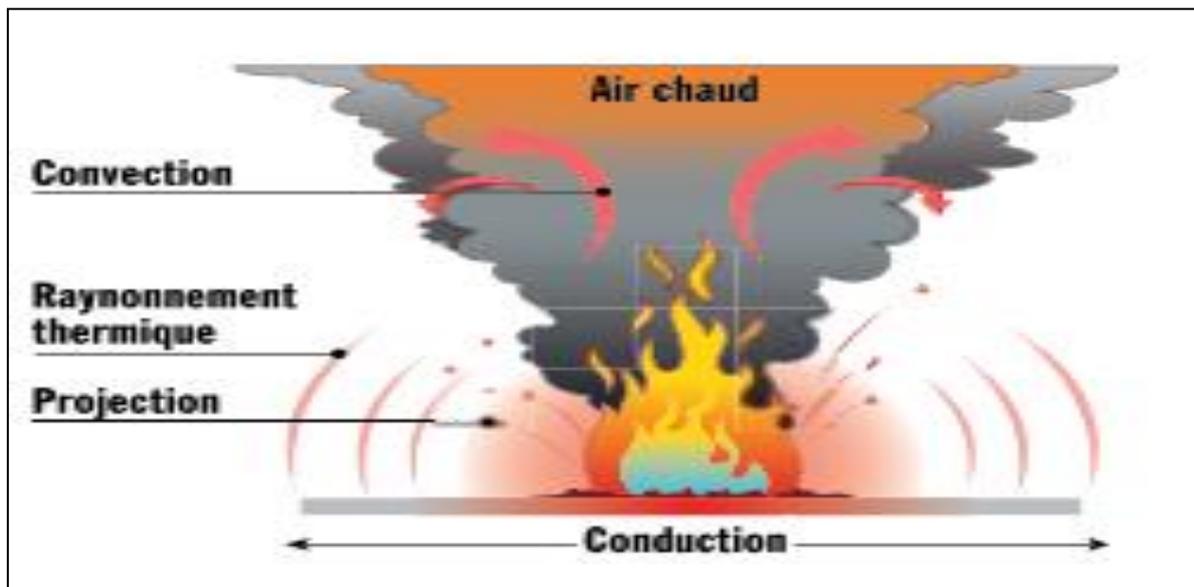


Figure 07. Les différents modes de propagation des Feux.

I.6 Modélisation d'un incendie

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

Chapitre I : Généralité sur le feu

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

I.6.1 Feu normalisé ISO834

Le feu conventionnel est caractérisé par une température ambiante qui augmente de façon continue avec le temps mais avec un taux de croissance. Une courbe logarithmique est utilisée en laboratoire pour modéliser le feu la valeur de durée de résistance au feu n'indique pas la durée réelle pendant laquelle une composante résiste dans un incendie de bâtiment. Elle constitue une comparaison indiquant la sévérité d'un incendie au quel la composante peut résister

Tableau I.1 : Valeurs température-temps pour la courbe ISO834 [9]

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

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

Avec

θ_g = température des gaz dans le
compartiment en °C t = temps en minute.

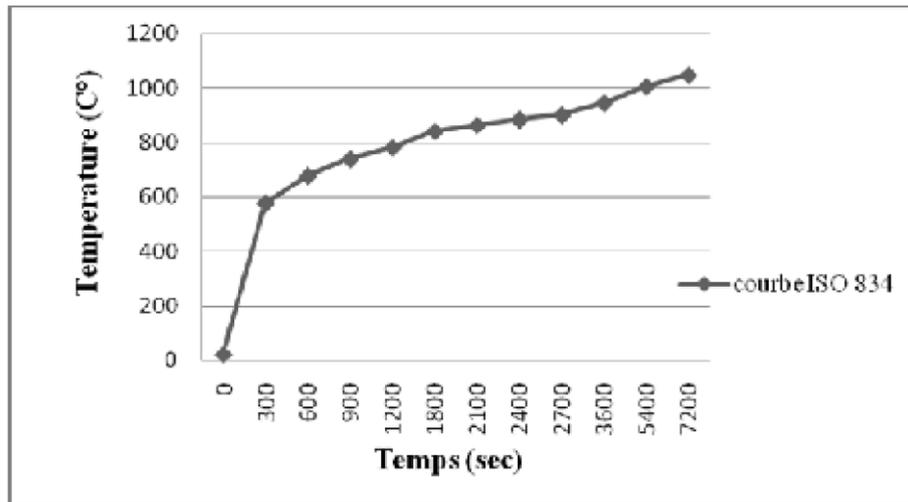


Figure 08: Courbe nominale du feu conventionnel ISO834

I.6.2 Feu hydrocarbure

Il existe de nombreuses façons de simuler un incendie et de montrer l'effet de la chaleur l'intérieur du bâtiment. Par ordre de complexité croissante, les modèles les plus couramment utilisés sont:

Développé par la compagnie pétrolière Mobil dans les années 1970, sa température s'élève très rapidement : la température est de 900°C pendant les 5 premières minutes et reste stable à 1100°C. La recherche a été lancée pour développer un programme de test utilisé pour évaluer les matériaux ignifuges pour les plates-formes de forage offshore et les complexes pétroliers [8]

La courbe température/temps des hydrocarbures est donnée par:

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

Où:

θ_g = température des gaz dans le compartiment

en °C t = temps en minutes

I.6.3 Feu extérieur

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

Chapitre I : Généralité sur le feu

La courbe de feu extérieure est une courbe plafonnée à une élévation de la température égale à $20+660^{\circ}\text{C}$, une température nettement inférieure à la courbe standard.

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

Développé par la compagnie pétrolière Mobil dans les années 1970, sa température s'élève très rapidement : la température est de 900°C pendant les 5 premières minutes et reste stable à 1100°C . La recherche a été lancée pour développer un programme de test utilisé pour évaluer les matériaux ignifuges pour les plates-formes de forage offshore et les complexes pétroliers.

La courbe température/ temps des hydrocarbures est donnée par:

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

Où:

θ_g = température des gaz dans le compartiment

en $^{\circ}\text{C}$ t = temps en minutes

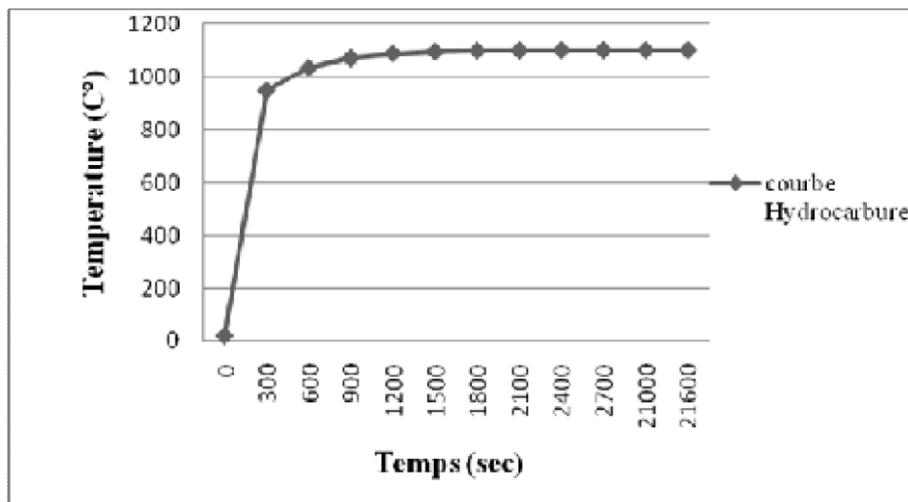


Figure 09: Courbe hydrocarbure du feu [9]

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

Où :

θ_g = température des gaz dans le compartiment

en $^{\circ}\text{C}$

t = temps en minutes.

I.6.4 Feu paramétrique

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

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

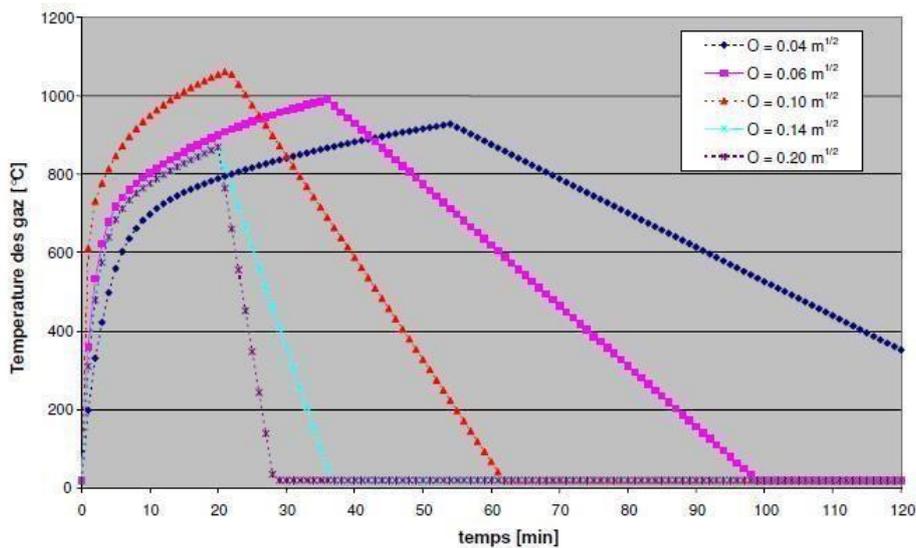


Figure 10: Exemple de feux paramétriques [5]

I.6.5 Feu réel

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

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

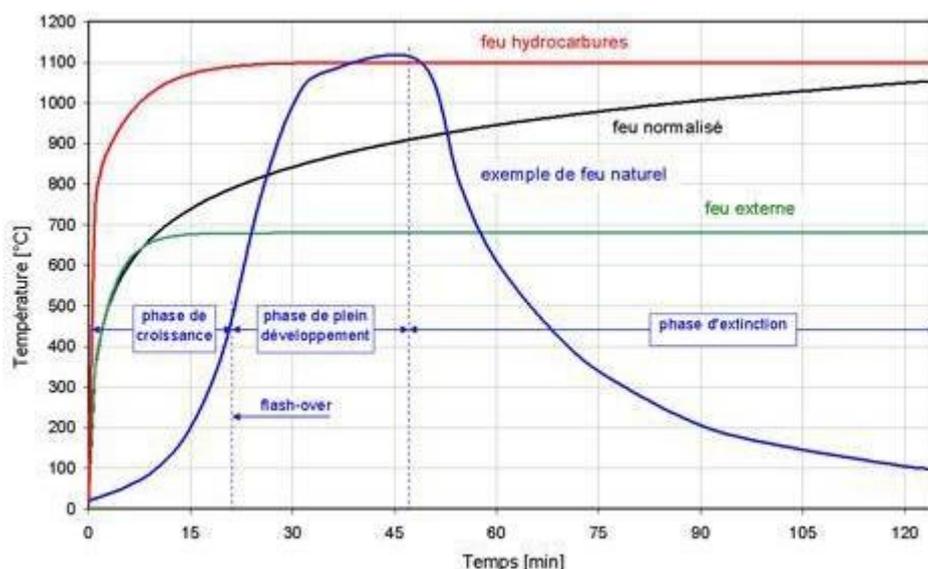


Figure 11: Exemple de feu naturel.

I.7 Effets des incendies

I.7.1 Les effets physiques du feu sur l'homme

- **La fumée est la première cause de décès lors des incendies :**
 - **Asphyxie** liée à la baisse du taux d'oxygène. La concentration dans l'air du taux d'oxygène est de 21%. Lors d'un incendie cette concentration diminue rapidement.
 - **Gêne visuelle:** plus la fumée est opaque, plus elle gêne l'évacuation des sinistrés et l'intervention des secours.
- **Intoxication par les produits de combustion:** Le monoxyde de carbone (CO) est le gaz le plus toxique. Il est généré lors de toute combustion de matières organiques. Il

est particulièrement dangereux car inodore. Cependant, d'autres gaz (oxydes d'azote, acides...), issus de substances dangereuses, génèrent une odeur discrète mais réelle.

Repérer une odeur suspecte peut être un bon moyen de déceler un incendie à temps pour pouvoir le contrer.

●**La chaleur et les flammes:** Les deux risques liés à ces facteurs sont le risque de brûlure, et le risque de problèmes oculaires. Les yeux sont en effet très sensibles à la lumière qui émane des flammes. La température des flammes varie de 600 à 1200°C.

I.7.2 Les effets physiques du feu sur l'environnement

●**L'effondrement des structures:**

La résistance mécanique des structures d'un bâtiment peut, sous l'action de la chaleur s'effondrer après quelques minutes d'incendie, menaçant ainsi la vie des individus.

●**Détérioration des outils de travail:**

Les outils de travail peuvent être détruits ou fortement dégradés par les dépôts de résidus carbonneux, l'aspersion d'eau ou d'agents extincteurs. Un incendie peut engendrer des pertes économiques trop conséquentes pour que l'entreprise puisse y faire face.

●**Fermeture temporaire ou définitive d'un établissement industriel :**

Le personnel se trouve confronté à l'incertitude quant à son avenir.

●**L'environnement :**

Il est pollué par les agents extincteurs, dont la mousse. Ces pollutions diverses peuvent atteindre la nappe phréatique par les eaux de ruissellement.

I.8 Prévention et protection

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

I.8.1 La protection contre l'incendie

L'obligation de protection contre l'incendie est très large dans la mesure où elle s'impose à toutes les personnes (autres que les salariés et le public reçu) ayant un lien avec l'établissement et s'applique non seulement au moment de la construction mais également au cours d'exploitation de l'établissement.

➤ **La protection active**

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

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

Nous présentons quelques dispositifs de protection active:

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

➤ **La protection passive**

La Protection Feu Passive (PFP) joue quant à elle un rôle préventif. Elle représente l'ensemble des mesures constructives permettant à un ouvrage de résister à un incendie pendant un temps donné (fixé par la réglementation relative au type de bâtiment).

Ces mesures constructives sont destinées à :

- Stopper la progression des fumées
- Éviter la propagation des flammes
- Contenir les effets thermiques à la zone sinistrée
- Maintenir la stabilité au feu des éléments de structure

Ces mesures sont appelées passives car elles fonctionnent sans aucune intervention humaine ni apport extérieur d'énergie. Elles visent à permettre l'évacuation des personnes et

l'intervention des services de secours, en confinant le plus longtemps possible le feu dans le seul espace où il s'est déclaré.

Pour apporter une réponse à l'ensemble de ces objectifs, nous distinguons deux types de solutions pour cette protection feu :

- Les solutions de protection des structures, comme les peintures intumescentes
- Les solutions coupe-feu pour le compartimentage, comme les mousses, mastics et bourrelets coupe-feu

La Protection Feu Passive doit être appréhendée dès la conception d'un bâtiment, à la fois par la maîtrise d'ouvrage mais également par l'ensemble de l'équipe de maîtrise d'œuvre (Architecte, Economiste, Bureau d'études ingénierie, Bureau d'études structure, Bureau d'études fluides, Bureau d'études thermique,

Chapitre II : Les matériaux utilisés dans la protection passive contre l'incendie

II.1 Introduction

Dans les bâtiments ainsi que dans les structures de génie civil comme les tunnels, la protection active/passive contre l'incendie est utilisée. La protection active comprend la détection automatique des incendies et les systèmes d'extinction, tandis que l'objectif principal de la protection passive contre l'incendie est de tenter de contenir les incendies ou de ralentir leur propagation. Le but de l'utilisation de ce type de système de protection est de maintenir la température du composant du bâtiment (élément de structure en acier, installation électrique) sous la température critique lors d'un incendie, mais sont également destinés à contenir un feu dans le compartiment d'incendie d'origine pendant une période de temps limitée.

Les matériaux de la protection passive ou d'isolation thermique peuvent être classés en trois catégories selon leurs fonctions [10] :

- 1) Matériaux agissant comme barrière d'isolation thermique
- 2) Matériaux de construction endothermique tel que : béton et gypse
- 3) Nouveaux matériaux à base d'alcali activé.

Le béton est considéré comme un matériau de protection, cependant dans certains cas lorsqu'il est chauffé il a tendance à s'écailler mettant en péril la stabilité de la structure. Dans ce cas particulier, les fibres de polypropylène (PP) sont ajoutées au mélange de béton qui agissent comme un système de protection.

Un autre groupe de matériaux de protection passive contre l'incendie, décrit dans ce chapitre, sont les matériaux intumescents et ablatifs pour la protection des structures en acier. L'acier est très sensible à l'augmentation de température et 550 ° C est considéré comme la température critique pour l'acier de construction [10] car il induit une perte de résistance importante.

Donc les mesures, comme système de protection passive, doivent être prises pour retarder la surchauffe de la structure en acier en créant une couche de charbon entre l'acier et le feu. Le présent chapitre décrit également les techniques des systèmes de protection passive contre l'incendie.

II.2 Caractéristiques du matériau à mettre au point

Le matériau à développer est destiné à une utilisation sous forme de panneaux préfabriqués prêts à être posés. Ces panneaux seront utilisés pour la construction de conduits de désenfumage et pour la

protection de gaines électriques dans le bâtiment (immeuble, parking sous terrain, centre commercial ...).

La formulation proposée doit tenir compte de différents impératifs comme la toxicité, les propriétés thermiques et mécaniques, la densité et le coût.

II.2.1 caractéristiques thermiques

Les panneaux pour la protection d'incendie, ainsi que les matériaux rentrant dans leur composition, doivent présenter des propriétés thermiques spécifiques. En effet, étant données les températures auxquelles sont exposés les matériaux et l'aspect barrière thermique que les plaques doivent posséder, il est nécessaire que le matériau formulé ait les propriétés suivantes :

- Être coupe-feu 2h.
- Pour une épaisseur de plaque de 45 mm, la température de la face non exposée au feu (ISO 834) ne doit pas dépasser 180 °C au bout de 2h [31].
- Lorsque les panneaux sont utilisés en tant que conduit de désenfumage, le conduit doit être étanche aux gaz lorsqu'il est soumis à une simulation d'incendie selon la courbe ISO 834.
- Une faible conductivité thermique : dans le bâtiment, les matériaux de construction sont considérés comme isolants si leur conductivité thermique est inférieure à 2 W.m-1.K-1 [32].
- Les produits de base entrant dans la composition des plaques seront choisis de préférence avec les propriétés suivantes :
 - Une conductivité thermique inférieure à 2 W.m-1.K-1.
 - Un coefficient de dilatation thermique le plus faible possible.

II.2.2 Caractéristiques mécaniques

Les panneaux de protection incendie doivent posséder les propriétés suivantes :

- Une masse volumique faible permettant d'obtenir des panneaux de protection incendie d'une densité maximale de 1000 kg.m-3 afin d'être manipulables par les ouvriers.
- Une épaisseur maximale de 45 mm
- Une bonne résistance mécanique évaluée par flexion 3 points [33].
- Une dureté permettant le découpage et le perçage des matériaux avec des outils standards.
- Une bonne résistance au fluage sous son propre poids lors d'un test au feu selon la courbe ISO 834.
- À la vue des contraintes s'exerçant sur les matériaux de protection incendie et des contraintes économiques relatives à la production de matériaux pour le bâtiment, il est

difficile de trouver un seul matériau répondant à la fois aux critères thermiques et mécaniques.

II.3.1 Matériaux de protection passive contre l'incendie

Il existe une grande variété de matériaux d'isolant thermique qui peuvent être utilisés comme barrière contre les transferts de chaleur. Cependant, en testant l'ignifugation des isolants thermiques, on ne trouve que peu de matériaux qui peuvent résister à des conditions d'incendie réelles. La laine minérale, argiles expansés et la cellulose sont des matériaux ignifuges d'excellence pour l'isolation thermique (Tableau II.1).

Tableau II.1 : L'effet de l'isolant thermique sur la température de parois exposées au feu

Conditions	Températures (°C)		
	5 min	10 min	20 min
Acier	475	700	825
2,5 cm de laine minérale	70	379	671

II.3.1.a Matériaux isolants fibreux :

La laine minérale est un matériau isolant fibreux inorganique qui comprend la laine de roche, de verre et de laitier. Ceux-ci sont dérivés du calcin, du sable de quartz, de la diabase et du basalte [10] [11].

La laine minérale peut résister à des températures allant jusqu'à 1000 ° C et ne brûle pas. À plus de 1000 ° C, les fibres minérales commencent à fondre.

Ces matériaux sont disponibles dans le commerce sous forme de matelas et de planche.

Les panneaux de laine minérale plus denses et plus durs sont utilisés dans les planchers, les murs et le toit. Ils sont également utilisés pour couvrir les tuyaux et conduites.

Les isolants en laine minérale consomment plus d'énergie au stade de la production en raison de l'exigence d'une température de 1400 ° C pour former des fibres de verre à partir de verre borosilicaté et de fusion de roche à 1500 ° C pour créer la laine de roche. Les résines phénoliques et l'huile de dépoussiérage lient la roche et les fibres de verre pour améliorer les caractéristiques thermiques et autres.

II.3.1.b matériaux isolants cellulaires inorganiques :

Les matériaux isolants cellulaires inorganiques sont le silicate de calcium, le verre cellulaire (Figure II.1), la perlite et la vermiculite. Leurs matériaux de base sont la craie, le sable, les fibres de cellulose, le calcin, la dolomie, l'oxyde (aluminium et silicium) et le silicate de magnésium-aluminium [2] [10].

Les isolants en mousse ont une faible conductivité thermique en raison de leur forte porosité qui réduit leur résistance mécanique et améliore leurs caractéristiques hygroscopiques [9].

De nouveaux matériaux isolants mousseux ont été élaborés préparés en utilisant de la perlite qui comprenait de la perlite / silicate de sodium, du H_2O_2 , du bromure de cétyltriméthylammonium et de la laine de roche. Le nouvel isolant mousseux était plus léger que tout autre matériau inorganique ayant une faible conductivité thermique et une résistance mécanique relativement élevée.



Figure II 01 : Verre cellulaire

Enfin, l'isolant cellulosique est réalisé en vrac à partir d'un papier recyclé, journal, carton ou autres matériaux similaires, il est considéré comme l'un des matériaux d'isolation thermique les plus écologiques. Bien que la composition du matériau soit associée à la grande inflammabilité, le traitement chimique avec du sulfate d'ammonium et du borate confère son incombustibilité. De plus, en raison d'une compacité élevée des fibres cellulosiques, le matériau ne contient presque pas d'oxygène et étouffe efficacement les cavités murales de l'air de combustion et peut ainsi minimiser la propagation du feu. Comme l'isolant cellulosique est un matériau en vrac, il ne peut être utilisé que pour remplir le toit, le sol et les murs, de sorte que la partie externe de la structure est directement soumise au feu.

II.3.2 Propriétés des matériaux de la protection passive

Tableau II.2 : Propriétés des matériaux d'isolation des bâtiments (classiques et de pointe) [15] [16] [17] [18].

Type d'isolation	Densité	Conductivité thermique	La capacité thermique spécifique	facteur de résistance à la diffusion de vapeur	Facteur d'absorption acoustique	Réaction au feu	Coût	Énergie grise	carbone incorporé
Notion (unité)	$\rho (\frac{kg}{m^3})$	$K (mW/mK)$	$c_p (j/g^2c)$	$\mu (-)$	$\alpha (-)$	$\emptyset (-)$	$C_1 (US \$/m^3)$	$EE (Mj/g)$	$EC (kgCO_2/g)$
Matériaux d'isolation de bâtiment conventionnels									
Laine de verre	10-100	30-50	0,8-1	1-1,3	0,45-0;8	A1	9;3-14,7	14-30,8	1,24
Laine de roche	40-200	33-40	0,8-1,0	1,0-1,3	0,29-0,9	A1-A2	12-20	16,8	1,05
Laine de Bataille	50	40	0,7	0,5	0,5	-	-	-	-
polystyrène expansé	18-50	29-41	1,25	20-100	0,22-3,65	E	8,6-17	80,8-127	6,3-7,3
polystyrène extrudé	32-40	32-37	1.45-1.7	80-170	0.2-0.65	E	18-23	72.8-105	7.55
polyuréthane	30-160	22-35	1.3-1.45	50-100	0.67ou0.8	D-F	24.91	74-140	5.9
Polyisocyanate S	30-45	18-28	1.4-1.5	55-150	-	B	20-24	69.8	5.5
Verre moussé	100-200	38-55	0.21	+infini	-	A1	46-62	20.6-27	-
Perlite	32-176	40-60	0.2	3.5	0.2-0.75	A1	38-42		
silicate de calcium	200-240	59-65	1.3	6-20	0.71	A1	10		
vermiculite	64-130	40-64	0.84-1.08	3-5	0.8	A1	7.2		
mousse phénolique	40-106	18-24	1.3-1.4	35	0.3-0.5	B-C	23	13-159	4.15-7.21
Liège	100-120	37-43	1.5-1.7	5-30	0.39-0.85	E	25.6-44.7	26	0.82
Cellulose	30-80	37-42	1.3-1.6	1.7-3	0.53-0.9	B-C-E	24.6	3.3-105	0.31-1.53

II.3.3 Matériaux d'isolation thermique

II.3.3.a béton

Le béton est un matériau résistant au feu et incombustible, il a donc été utilisé comme matériau de base pour les structures résistantes au feu au cours des dernières décennies. Il protège une structure du feu de deux manières. Le béton lui-même contient de l'eau libre mais aussi la pâte de ciment est constituée d'une quantité importante de cristaux hydratés, elle contient donc une grande quantité d'eau liée. En cas d'incendie, l'eau libre s'évapore d'une surface exposée à la chaleur et absorbe ainsi une grande partie de la chaleur, ce qui réduit la température dans la partie interne de l'élément structurel.

La réaction endothermique peut être encore plus élevée si les agrégats calcaires sont utilisés (Figure II.02).

Cependant, le développement technologique récent et la demande croissante de structures à haute résistance ont également conduit au développement de la technologie du béton. Ainsi le béton à haute performance qui présente un meilleur compactage de la microstructure grâce à sa densité élevée est particulièrement plus sensible à l'écaillage par le feu, contrairement au béton.

D'autre part, les enduits cimentaires tel que le béton projeté, utilisé comme protection incendie des éléments de charpente en acier (poutres, poteaux) est déconseillé en raison du risque d'écaillage, de fissuration ou de délaminage dans la couche de contact entre le béton et l'acier. De plus, les revêtements à base de béton, en tant que matériaux denses et massifs, ajoutent une composante importante de charge à une conception de capacité portante de la structure en acier.

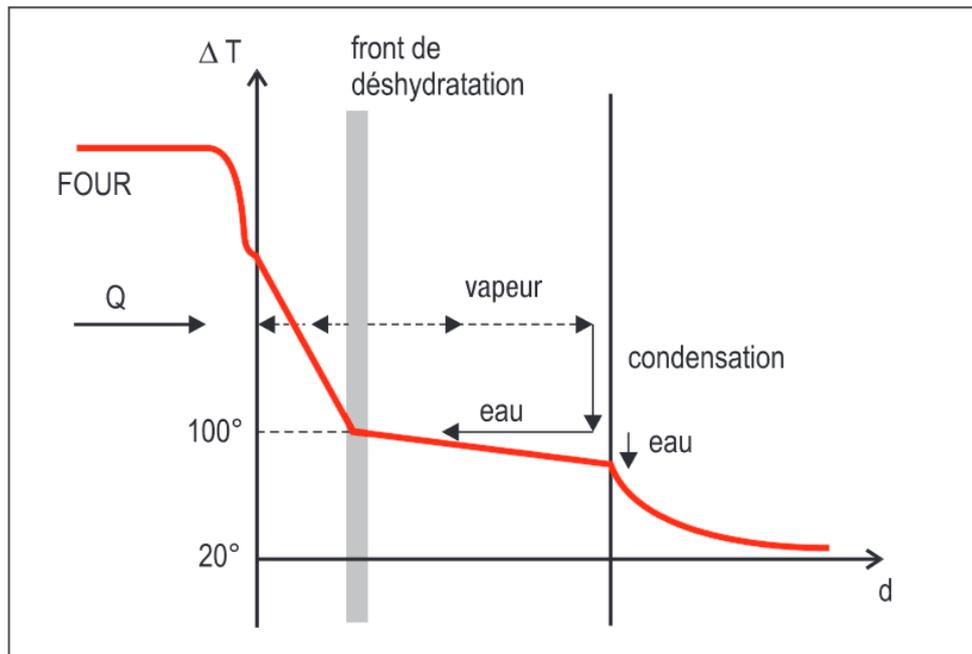


Figure II 02 : Température dans une paroi en béton exposée au feu.

II.3.3.a Le gypse

Le gypse est une roche minérale cristalline. Les plaques de plâtre constituent une protection passive très efficace contre l'incendie. Étant donné que le gypse contient environ 20% d'eau chimiquement liée, il peut être évaporé en cas d'incendie et aider à minimiser la température à l'intérieur de la structure protégée et la propagation du feu, comme décrit précédemment. De plus, les plaques de plâtre sont des matériaux totalement incombustibles donc même après évaporation de la totalité de l'eau, elles constituent une barrière d'isolation thermique.

Les fabricants de plaques de plâtre offrent une grande variété de produits pour une gamme d'applications, y compris : des plaques de plâtre pour l'assemblage en surface sur les murs et les plafonds, ainsi qu'à l'intérieur des ascenseurs ou des gaines similaires. Les plaques de plâtre peuvent également être utilisées comme un séparateur entre deux zones ou montées directement sur des éléments structurels, par exemple : poutres en acier, pour fournir une couche résistante au feu.

II.3.4 Les liants alcalis activés

Comme mentionné précédemment, le béton à base de ciment est incombustible et endothermique, cependant certains bétons, en particulier ceux à faible rapport eau/ciment comme les bétons en poudre réactive, sont particulièrement sensibles à l'éclatement du feu en raison de leur haute densité et une faible perméabilité.

Les liants alternatifs pour le ciment sont les liants activés par les alcalis (géopolymères) récemment développés. Ce sont des liants inorganiques, respectueux de l'environnement et offrent un meilleur comportement au feu, leur conductivité thermique est de l'ordre de 0,1 à 0,3 W/m.K, ce qui est relativement faible par rapport aux autres matériaux de construction structurels couramment utilisés et presque identiques ou comparables aux matériaux résistants au feu commercialisables. Par conséquent, les liants activés par les alcalis ont la capacité de fonctionner comme une barrière efficace contre le flux de chaleur.

Le géopolymère est un type de céramique matériau avec des structures tridimensionnelles d'aluminate de silice amorphe à semi-cristalline [3]. Une fois les matériaux sources riches en silice (Si) et en aluminium (Al) activés par une solution alcaline mixte, les tétraèdres AlO_4 et SiO_4 dissous se combinent pour former des monomères en partageant un atome d'oxyde (O). Les monomères interagissent pour former des oligomères puis pour synthétiser un réseau 3D de structures aluminosilicatées. Ce processus de dissolution et de polycondensation est appelé géopolymérisation (Figure II.3).

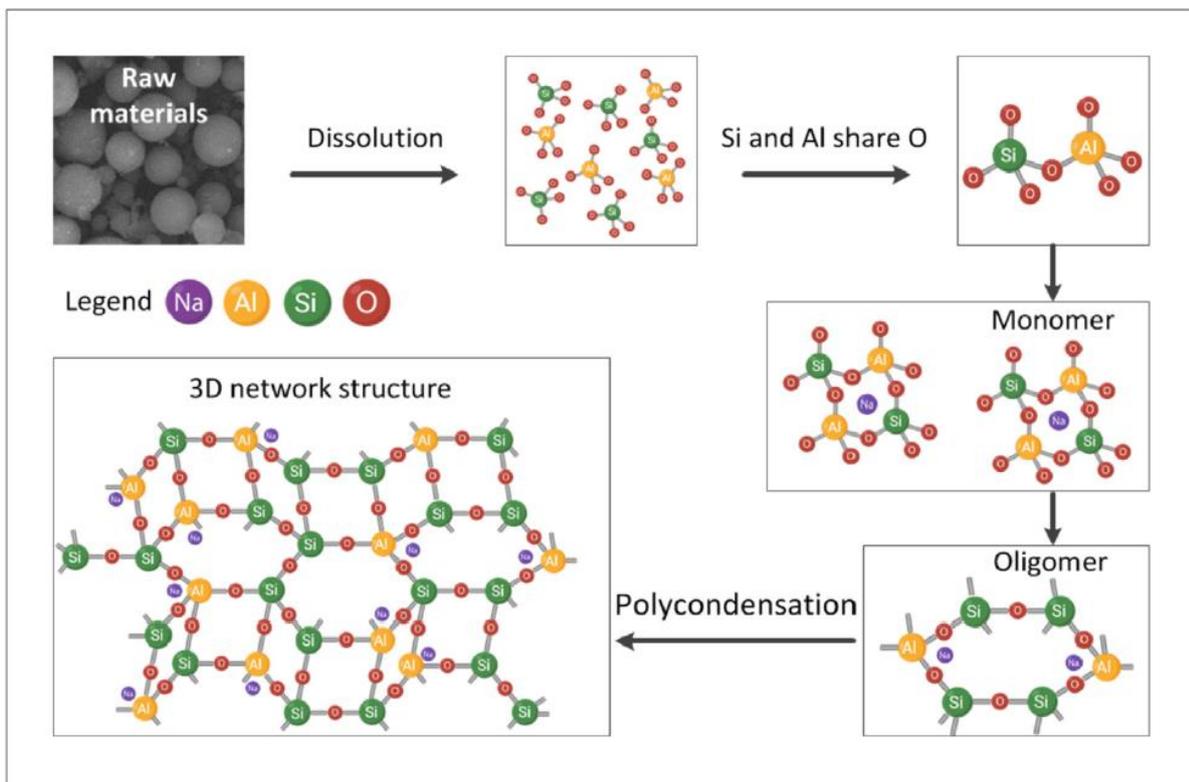


Figure II.03 : Le procédé de la géopolymérisation.

Chapitre II : les matériaux utilisés dans la protection passive contre l'incendie

Sur le **Tableau II.3** est mentionné les principales sources des aluminosilicates.

Type	Objet	Acronyme	constituent
Matières premières	cendres volantes	FA	SiO ₂
	Mâchefer	BA	Al ₂ O ₃
	pouzzolane		Fe ₂ O ₃
	Laitier de haut fourneau	BFS	CaO
	métakaolin	MK	P ₂ O ₅
	Zéolites naturel les kaolin	kl	Na ₂ O
	Cendres de carburant d'huile	POFA	K ₂ O
	De palme		
	laitier de fonderie de plomb granulé	GLSS	MnO
	Cendre de balle de riz	RHA	MgO
	Ferrochrome	FS	SO ₃

	Kaolite ultra fine frêne haute performanc	HFA	TiO ₂
	Cendres volantes de Bio masse	BFA	
	Fumées desilico-manganèse	SMF	
Additifs	Ciment d'aluminates de Calcium nano-silice	cac	
	Hydroxyde de calcium	Ca(OH) ₂	
	Portland ordinaire		
	Ciment		
	Fumée desilice		

II.3.5 Les fibres de propylènes

Un béton fibré est un matériau composite associant une matrice (le béton) et un renfort (les fibres). Les fibres ont pour rôle principal de maîtriser la fissuration et de reprendre les efforts au droit des fissures éventuelles. Elles confèrent au béton des performances et des propriétés liées à leur nature, leurs formes et à leurs caractéristiques mécaniques.

Il existe un certain nombre d'études concernant la quantité et le type de fibres de PP qui affectent positivement le comportement à l'écaillage du béton.

Des travaux antérieurs [24] [25] ont montré que le béton avec un rapport eau / ciment de 0,4, l'ajout de 0,05 % (en poids) de fibres de propylènes élimine complètement l'apparition d'écaillage. Lorsque le mélange contient des fibres de PP à plus de 0,05 % en volume, aucun écaillage ne s'est produit et la résistance du béton à l'écaillage est significativement améliorée. D'autres travaux [26] ont été effectués avec différentes quantités de fibres de PP (1 kg/m³ et 2 kg/m³) et différentes vitesses de chauffe (0,5, 1, 2, 4 et 8 °C/min). L'ajout de fibres de PP à 2,0 kg/m³ permet de limiter le risque d'écaillage du matériau cimentaire. L'écaillage a été efficacement limité même lorsque la vitesse de chauffage relativement élevée (8 °C/min) a été appliquée.

II.3.6 Matériaux intumescents

Un intumescent est un matériau de revêtement semblable à une peinture, il peut être à base d'eau, de solvant ou d'époxy. A des températures de 200 °C à 250 °C, ces matériaux subissent des réactions chimiques complexes qui leur permettent de gonfler (expansion), diminuent sa densité et entraînent une faible conductivité thermique de la couche intumescence. Deux principaux types de matériaux intumescents peuvent être distingués : couche mince et couche épaisse.

II.3.6.a matériaux intumescents à couche mince

Le revêtement intumescent à couche mince ignifuge consiste en une couche de peinture à base d'eau ou de solvant d'environ 1 à 3 mm d'épaisseur.

La couche complexe est généralement constituée de trois composants distincts : une couche d'apprêt, une couche de base qui réagit au feu et un scellant qui assure l'étanchéité du revêtement.

La couche de base est constituée d'un certain nombre d'ingrédients influençant le bon comportement lors de l'action du feu. Parmi eux, il convient de mentionner : une résine acrylique qui se ramollit à une température spécifique, et un agent « spumific » qui se décompose simultanément avec la fusion de la résine acrylique et produit une grande quantité de gaz ininflammables. Ces gaz comprennent le dioxyde de carbone, l'ammoniac et la vapeur d'eau. En raison de la présence d'une grande quantité de gaz libres, le matériau initial se dilate dans son volume de 20 à 50 fois. Une telle couche expansée peut supporter une charge calorifique même pendant 120 minutes.

Ce type de revêtement peut être appliqué sur les éléments de structure en acier soit sur site par des techniciens spécialisés, soit hors site dans un hall industriel.

L'application hors site est plus chère, mais plus précise en termes d'étanchéité du revêtement et d'apparence, ce qui est particulièrement important pour les composants exposés. Les revêtements en couche mince sont généralement utilisés pour la protection contre les incendies de type cellulosique qui se produisent dans les bâtiments industriels et commerciaux.

II.3.6.b Matériaux intumescent à couche épaisse

En cas de risque d'incendies d'hydrocarbures, l'application de matériaux intumescent à couche épaisse est recommandée principalement dans les immeubles de grande hauteur et les tunnels.

Les matériaux intumescent à couche épaisse à base d'époxy au lieu d'eau ou de solvant afin de fournir une protection supplémentaire contre la corrosion d'éléments en acier en contact avec l'eau.

Le revêtement en film épais peut être appliqué sous forme de pulvérisation, à la truelle ou par coulée, ce qui permet d'obtenir une surface de finition dure et lisse de haute qualité.

Cependant, les principes de fonctionnement en conditions d'incendie sont les mêmes que ceux décrits pour les revêtements en couches minces, mais le taux d'expansion du matériau dans ce cas atteint 5 fois la valeur initiale. Ces revêtements sont souvent utilisés dans les structures offshore pour protéger les éléments en acier de la corrosion et de l'environnement marin agressif.



Figure II.4 : Câbles avec des matériaux intumescent.

II.3.7 Matériaux ablatifs

L'utilisation de la peinture ablative est importante comme protection passive contre le feu car celui-ci déclenche dans les matériaux ablatifs les réactions endothermiques, qui absorbent l'énergie thermique et minimisent l'augmentation de la température dans les couches sous-jacentes.

De plus, l'énergie thermique absorbée provoque des réactions qui produisent une vapeur qui à son tour, contribue à retarder et à réduire la formation de flammes. Le revêtement ablatif peut être appliqué sous forme de pulvérisation ou à la truelle et son épaisseur dépend directement de la charge calorifique conçue et de sa durée.

Ces matériaux sont faits de silicone élastomère, suffisamment élastiques pour rester fixer sur une surface incurvée et pour résister également à la fissuration en phase d'exploitation de la structure. Selon les tests [27], l'épaisseur de 1 à 2 mm des revêtements ablatifs peut résister à la charge au feu pendant 20 minutes et les épaisseurs de revêtement sont donc appliquées approximativement entre 1 mm et 7 mm pour fournir une résistance au feu entre 30 minutes et 120 minutes. Afin de protéger la couche ablative de l'eau et des dommages mécaniques, une couche supérieure de résine est couramment appliquée.

II.3.8 La perlite

La perlite résulte de l'expansion à 900 °C d'une roche volcanique siliceuse. Cette expansion est due à la présence d'eau dans la roche (environ 6 % de son poids) sous forme d'eau de constitution. L'expansion de cette roche peut atteindre de 4 à 20 fois son volume initial. La perlite ainsi obtenue, (structure amorphe principalement constituée de : 75 % de SiO₂, 15 %

de Al_2O_3 , 5 % de Na_2O et des traces de CaO et Fe_2O_3) présente une masse volumique apparente allant de $0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ à $0,40 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (porosité entre 85 % et 97 %).

Du fait de son importante porosité, la perlite renferme une grande quantité d'air qui lui apporte ses qualités d'isolant thermique. Par ailleurs, la température de fusion de la perlite ($1100 \text{ }^\circ\text{C}$) permet son utilisation à haute température, ce qui est important pour une utilisation en protection incendie.

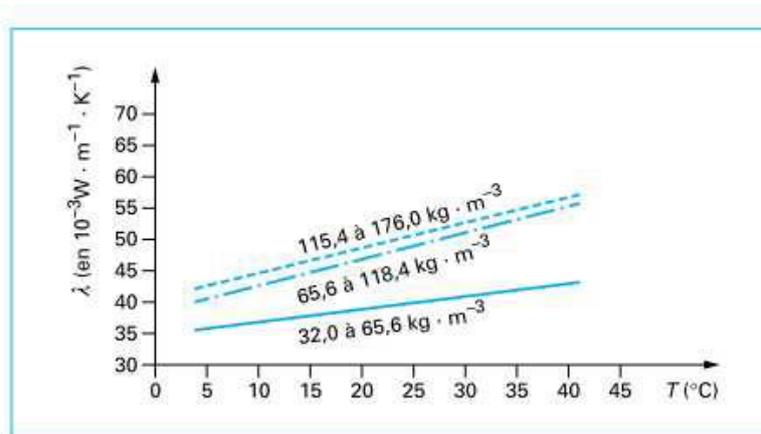


Figure II5 : Conductivité thermique de la perlite.

II.3.9 La vermiculite

La vermiculite de formule $(\text{Mg},\text{Ca})_{0,7}(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_6(\text{Al},\text{Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_4\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ résulte de l'exfoliation de roche volcanique de la famille des phyllosilicates (silicates d'aluminium de fer et de magnésium hydratés).

La vermiculite est donc largement utilisée dans le secteur du bâtiment pour réaliser des panneaux d'isolation phonique et thermique, mais également comme coupe-feu.

Son principal inconvénient est sa faible résistance mécanique. En compression, les feuillets se compriment facilement et particulièrement lorsque les contraintes exercées sont perpendiculaires aux feuillets ; en traction, le phénomène de délaminage des feuillets est prépondérant conduisant le matériau à la rupture.

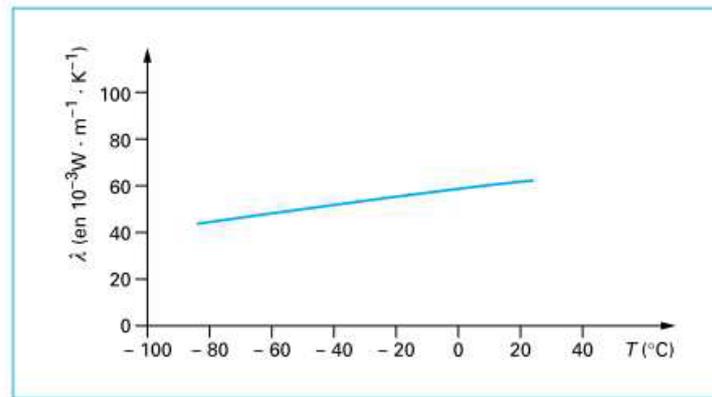


Figure II.06 : Conductivité thermique de la vermiculite.

II.3.10 Le mica

Le mica est un minéral formé principalement de phyllosilicates d'aluminium et de potassium. Il est caractérisé par sa structure feuilletée, son éclat métallique et sa grande résistance à la chaleur. Il est insensible à des températures supérieures à 1000 °C, ininflammable et présente une faible conductivité thermique (0,35 W.m-1.K-1) [31].

La densité du mica est 2,5 fois plus élevée que celle de la vermiculite exfoliée (environ 0,24 g.cm-3). Il ne permettra donc pas de diminuer autant la densité du composite que le ferait l'ajout de vermiculite. Cependant, d'un point de vue mécanique, le mica possède de meilleures propriétés mécaniques que la vermiculite et notamment une résistance à la traction élevée.

II.4. Test de la protection passive

En règle générale, les tests de protection passive sont effectués conformément aux directives et procédures spécifiques décrites dans les normes. Pour l'Europe, la norme de base pour les essais au feu est EN 1363-1, tandis qu'aux États-Unis, la principale norme d'incendie est la norme ASTM E119 : Standard Test Méthode for Essais au feu de la construction et des matériaux de construction. Il existe également une série de directives nationales et internationales et de rapports techniques fournissant des instructions détaillées pour tester la protection passive pour des fins particulières, exemple, les revêtements de tunnels.

II.4.1 Méthodologie d'essais

Pour vérifier la stabilité au feu d'une structure, on peut procéder à un essai normalisé. On vérifie le temps de résistance d'un élément vis-à-vis d'un feu conventionnel (ISO 834) et ce, jusqu'à la déformation excessive ou la ruine de l'élément (conduit d'extraction des fumées).

Ces essais sont conduits dans des laboratoires agréés. L'arrêté du 22 mars 2004 a pour objet de fixer les méthodes et conditions d'évaluation des performances de résistance au feu des produits.



Figure II 07 : Essai au feu des matériaux.

Les essais de résistance au feu permettent d'estimer la stabilité au feu, le degré par flammes ou coupe-feu d'un produit ou d'un élément de construction.

A titre d'exemple, la norme NF EN 1366-8 [29] décrit les conditions d'exposition à un feu pleinement développé. Elle a été élaborée en vue d'établir la méthode d'essai nécessaire pour déterminer la résistance au feu des conduits d'extraction de fumée.

Il s'agit de vérifier que des conduits résistants au feu, essayés au préalable suivant la norme EN 1366-1 [30], peuvent être utilisés comme conduits d'extraction de fumées.

II.4.2 La courbe ISO 834

La courbe ISO 834, est une courbe qui exprime la variation de la température T (°C) du four en fonction du temps exprimés en minutes.

Les recherches ont conduit à adopter une formule standard considérant les variations de température en fonction du temps, formule nécessairement arbitraire qui ne reflète pas notamment les températures atteintes lors des incendies réels pendant la période

d'embrasement, ni pendant celle de décroissance. Cette formule a été adoptée par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) afin de normaliser un type de feu et de permettre la comparaison du comportement vis-à-vis de ce feu des matériaux de construction. Définie dans la norme ISO 834 « Essai de résistance au feu - Elément de construction » et illustrée par la courbe « courbe température-temps normalisée », la relation est la suivante :

$$T = 345 \text{ Log } (8t + 1) + 20$$

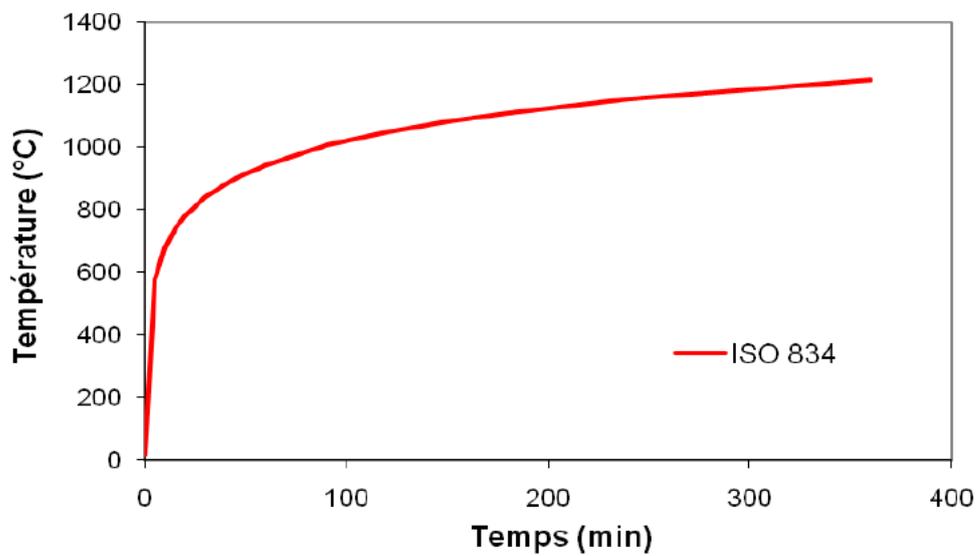


Figure II 08 : Courbe ISO 834

**Chapitre III : Les propriétés de l'acier et
autres matériaux au feu**

III.1 Introduction

Le comportement des structures exposées au feu dépend de la vitesse à laquelle ces éléments sont chauffés et de la répartition des températures en section et sur la longueur des éléments.

Les propriétés mécaniques des matériaux diminuent avec l'augmentation de la température et par conséquent, la résistance mécanique des éléments et donc la structure diminue également.

Ce chapitre traite l'effet d'un incendie sur les propriétés mécaniques de l'acier et autres matériaux.

Un aperçu sur les mécanismes de transfert de chaleur dans les éléments des aciers en cas d'incendie a été également traité dans cette partie.

III.2 Les propriétés physiques de l'acier

Les propriétés importantes qui déterminent la performance de l'acier à des températures élevées sont:

- ✚ La résistance;
- ✚ La déformation;
- ✚ La dilatation thermique;
- ✚ La chaleur spécifique;
- ✚ La conductivité thermique;

Toutes ces propriétés varient avec la température, comme c'est le cas pour la plupart des matériaux de structure.

L'acier commence à perdre de sa résistance à des températures supérieures à 300°C et sa résistance diminue à un rythme approximativement constant jusqu'à environ 800°C [34].

La résistance résiduelle, bien que faible, diminue en suite plus progressivement jusqu'à la température de fusion aux alentours de 1500°C. Ce comportement est similaire pour les aciers de construction et d'armature laminés à chaud, mais avec des profilés et des armatures écrouis à froid, il y a une diminution plus rapide de la résistance après 300°C. En comparaison, les

températures lors d'un test de résistance au feu ne dépassent pas 1200°C (après 4 heures).

Le comportement de l'acier au feu est affecté par la vitesse de chauffage, car il existe une composante de déformation résultant du fluage à des températures supérieures à 450°C. Le comportement au fluage de l'acier est un phénomène complexe et il est difficile d'intégrer ce facteur dans les méthodes de dimensionnement indépendantes du temps, avec lesquelles le concepteur est familier.

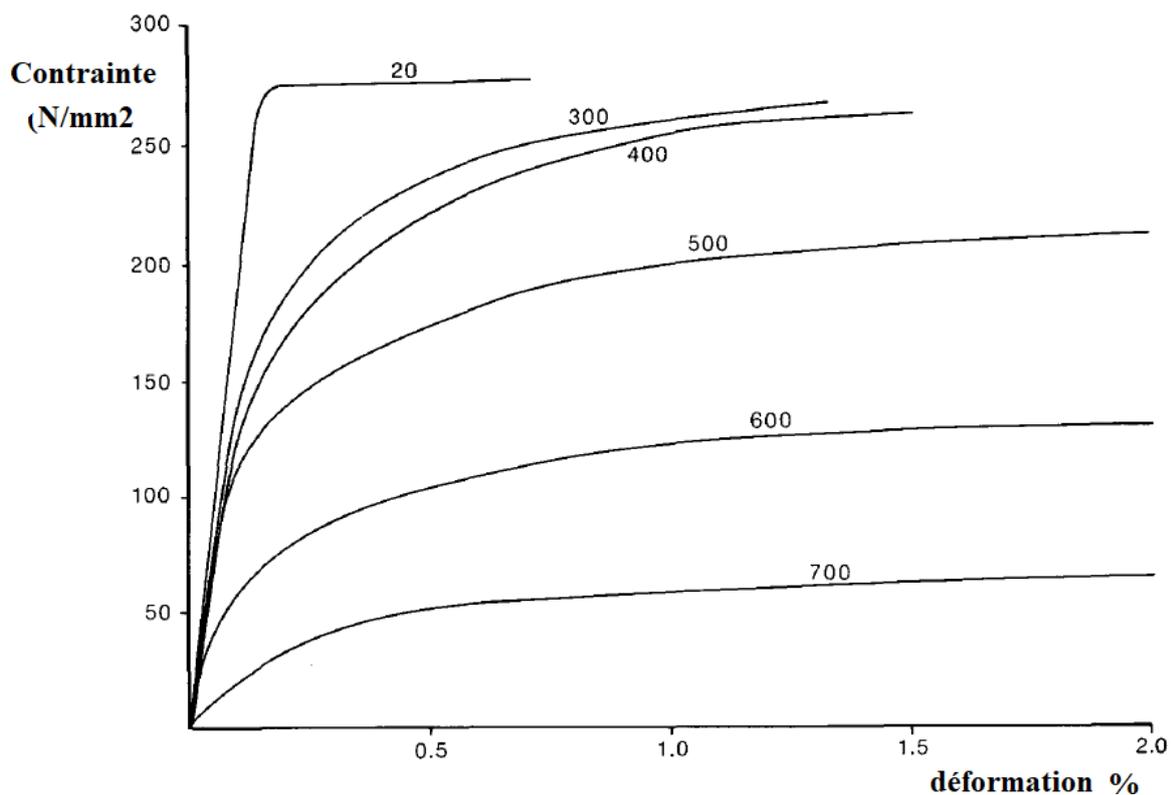


Figure III.01: Données de contrainte-déformation pour l'acier de nuance 43A à des températures élevées.

À des températures supérieures à environ 300°C [34], l'acier ne présente pas de limite d'élasticité bien définie et il y a une augmentation plus progressive de la résistance avec la déformation.

Ce comportement est illustré à la figure IV.1. La capacité de l'acier à accepter des niveaux élevés de déformation augmente de manière significative à des températures plus élevées (des déformations supérieures à 5 % sont souvent rencontrées dans les essais de faisceau).

III.3 Le coefficient de dilatation de l'acier

Le coefficient de dilatation thermique de l'acier « α_T » augmente légèrement avec la température. A la température ambiante, α_T est souvent pris égal à $12 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, mais à des températures comprises entre 200 et 600° C, α_T peut être pris égal à $14 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. À environ 730°C [1], l'acier subit un changement de phase et il y a un changement marqué dans les caractéristiques de dilatation à mesure que l'énergie est absorbée et que le matériau adopte une structure interne plus dense.

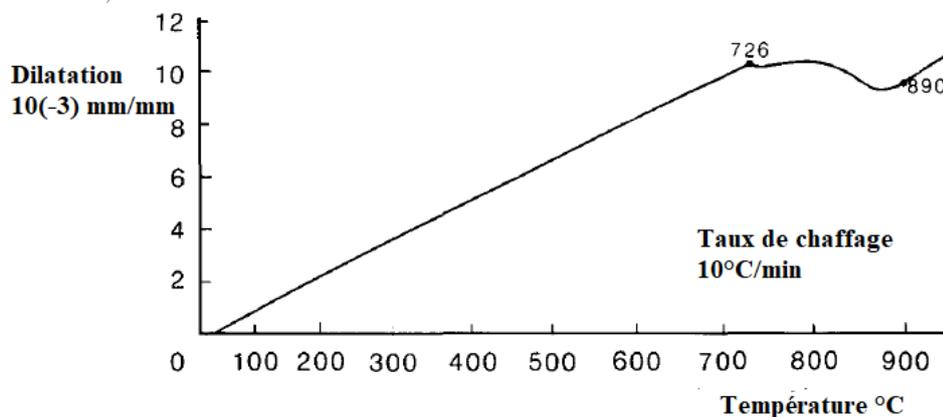


Figure III.02: Dilatation de l'acier grade 43 avec la température.

L'extension total δ_T , de 20°C jusqu'à sa température de changement de phase est plus précisément donné par la formule :

$$\delta_T = (0.4 \times 10^{-8} t_s^2 + 1.2 \times 10^{-5} t_s - 2.42 \times 10^{-4}) l$$

Où: **L** est la longueur originale de l'échantillon et **T**, est la température de l'acier (°C).

III.4 La chaleur spécifique de l'acier

La chaleur spécifique de l'acier est la chaleur stockée (Joules) dans une unité de masse d'acier pour une élévation de température de 1° C. Plus la chaleur spécifique d'un matériau est grande, plus son élévation de température.

Pour la plupart des calculs, une valeur constante de la chaleur spécifique de l'acier est

de 520 J/(kg°C) peut être utilisée. Plus précisément pour des températures jusqu'à 725°C, la chaleur spécifique de l'acier est:

$$C_s = 0.47 + 2 \times 10^{-4} t_s + 38 \times 10^{-8} t_s^2 \text{ (kJ/(kg°C))}$$

À environ 725°C, la chaleur spécifique de l'acier augmente rapidement en raison des changements dans la structure interne de l'acier à cette température.

III.5 conductivité thermique de l'acier

La conductivité thermique est définie comme la quantité de chaleur en unité de temps (Watts) qui traverse une unité de section transversale d'un matériau pour un gradient de température unitaire (c'est-à-dire un changement de température de 1°C par unité de longueur). Ce paramètre est moins important pour l'acier que pour les matériaux de protection incendie.

En effet, la conductivité thermique de l'acier est plus de 50 fois supérieure à celle du béton et 500 fois supérieure à celle de la vermiculite-ciment (un matériau de protection incendie typique). La conductivité thermique de l'acier (k_s) est d'environ 37,5 W/m°C ou plus précisément :

$$k_s = 52.57 - 1.541 \times 10^{-2} t_s - 2.155 \times 10^{-5} t_s^2 \text{ (W/m°C)}$$

Le coefficient de Poisson pour l'acier peut être pris égal à 0,3 et la masse volumique de l'acier peut être prise égale à 7850 kg/m³. On peut supposer que les deux sont indépendants de la température.

III.6 Facteur de réduction de résistance des aciers

Un paramètre important définissant la résistance de l'acier à une température particulière est le facteur de réduction de résistance ; c'est-à-dire la résistance résiduelle par rapport à la limite d'élasticité d'un acier à température ambiante.

Tableau III.1 : Comparaison des facteurs de rétention de résistance applicables aux températures élevées.

Matériau	Température (°C)									
	20	50	100	200	300	400	500	600	700	800
Acier grade43	1,00	0,97	0,97	0,95	0,85	0,80	0,62	0,38	0,19	0,07
Acier grade50	1,00	0,97	0,97	0,95	0,85	0,80	0,62	0,38	0,19	0,07
Inox grade 316L	1,00	1,00	0,99	0,96	0,92	0,87	0,82	0,65	0,51	0,35
Aluminium grade6061	1,00	0,98	0,94	0,78	0,29	0,09				
Béton	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,91	0,93	0,73	0,56	0,38
Béton Poids léger	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,60	0,40

La détermination des résistances de conception appropriées à des températures élevées a fait l'objet de débats considérables ces dernières années. Ceci est compliqué par deux facteurs clés; premièrement, la méthode d'essai et la vitesse de chauffage utilisée, et deuxièmement, la limite de déformation à laquelle la résistance de l'acier est déterminée.

III.7 Comportement des autres aciers et matériaux au feu

III.7.1 Acier inoxydable

Les aciers inoxydables sont disponibles dans une grande variété de grades et de formes, en fonction de leur composition chimique, de leur procédé de production et de leur micro structure. Leurs performances au feu varient d'une nuance à l'autre, de nombreuses nuances ayant de meilleures caractéristiques de rétention de résistance à température élevée que l'acier au carbone. Cependant, étant donné que la résistance à température élevée de l'acier inoxydable est largement spécifique au produit, il est important de déterminer la méthode d'essai utilisée pour générer des facteurs de rétention de résistance, la limite de déformation à laquelle la résistance a été mesurée, la taille de l'échantillon et la base statistique des données.

Tableau III.2: Les propriétés physiques de l'acier inoxydable [34].

Température (°C)									
	20	100	200	300	400	500	600	700	800
L'expansion thermique $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$	-	1,60	1,66	1,72	1,77	1,83	1,87	1,91	1,93
Conductivité Thermique $\text{W/m.}^{\circ}\text{C}$	14,3	15,5	17,0	18,4	20,0	21,5	23,0	24,5	26,0
Chaleur spécifique $\text{J/Kg}^{\circ}\text{C.}$		499	510	522	533	544	553	560	563

III.7.2 Fonte et fer forgé

La fonte est un matériau fragile et de qualité variable et ne peut pas subir de déformation au feu en raison de sa faiblesse en tension. Une défaillance se produit souvent à la suite d'effets secondaires tels que la dilatation thermique d'un plancher, un chauffage différentiel ou un refroidissement rapide.

Les propriétés de résistance à température élevée de la fonte en compression sont similaires à celles de l'acier doux.

Le fer forgé peut également être de qualité variable mais est relativement ductile. Le fer forgé perd de sa résistance plus rapidement que l'acier doux à des températures supérieures à 450°C.

III.7.3 Béton normal et léger

Le béton perd moins rapidement sa résistance à haute température que l'acier en raison du phénomène d'écaillage, c'est-à-dire de la rupture de l'enrobage de béton sur l'armature en acier. Pour les éléments en flexion, c'est l'échauffement et la perte de résistance de l'armature qui déterminent la résistance au feu.

III.7.4 Briques

La conductivité thermique de la plupart des briques d'argile est inférieure à celle du béton de poids normal, mais la chaleur spécifique est similaire. Il y a peu de perte de résistance à haute température.

Les liens entre la structure et la maçonnerie doivent être bien isolés des effets d'un incendie afin de maintenir la stabilité latérale du parement de maçonnerie. Ceci est normalement réalisé par la feuille intérieure d'un mur de maçonnerie.

III.8 Protection des structures métalliques sous l'effet d'incendie

Les processus de transfert de chaleur

Lors d'un incendie, la température de l'acier augmente de la même façon que la température de gaz chauds mais avec un décalage (fig.1), ce décalage dépend de l'inertie thermique d'élément aussi bien que l'intensité du transfert thermique s'effectuent à sa surface extérieure

Si l'élément est protégé, le décalage est plus important. En ce qui concerne les éléments non protégés, le décalage dépend de la massivité de l'élément (A_m/V ou $A_m(m^2/m)$: surface du contour par unité de longueur exposé au feu et $V(m^3)$: la section transversale de l'élément).

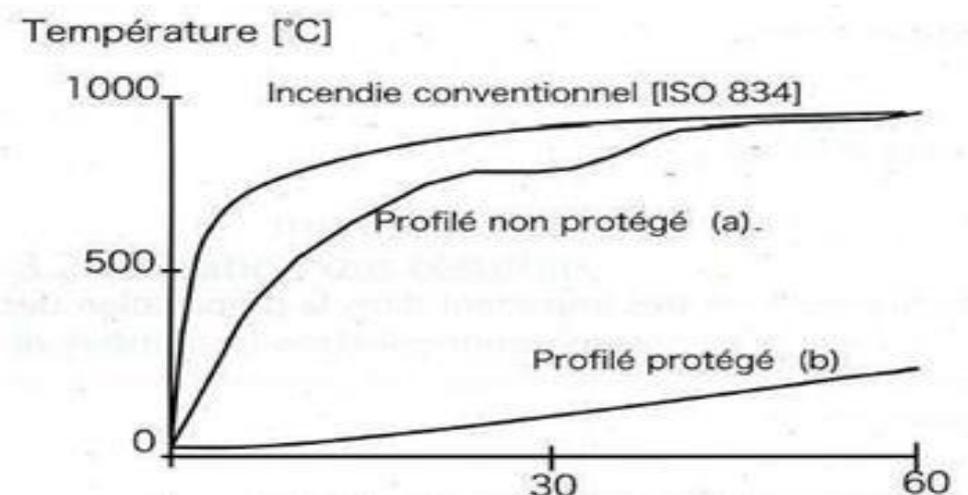


Figure III 03 : échauffement d'un profilé en acier en fonction du type de protection thermique

Dans l'incendie conventionnel ISO 834, la température T est définie par :
$$T=345\log_{10}(8t+1)+T_0$$

D'où:

t (mn) est le temps.

T_0 (°C) est la température ambiante.

Le transfert de chaleur entre l'environnement en feu et l'élément se produit par les trois processus de conduction, convection et rayonnement.

a) Echauffement par conduction

Energie permanent, le transfert de chaleur par conduction est proportionnel au gradient thermique entre deux points et a la conductivité thermique λ suivant la relation:

$$q=\lambda \frac{dT}{dx}$$

Avec:

q: le flux de chaleur par unité de surface (W/m²).

λ: la conductivité thermique(W/m.K).

T:la température (°C ou K)

X: la distance dans la direction du flux de chaleur(m)

Le calcul en régime permanent ne prend pas en considération le taux de chaleur nécessaire pour changer la température de l'élément chauffé.

b) Echauffement par convection

La convection est le transfert de chaleur par mouvement des fluides (gaz ou liquide), C'est un facteur important dans l'étendue du feu par la montée de la fumée et des gaz chauds au plafond ou hors d'une pièce au feu a travers une fenêtre.

Le transfert de chaleur par convection est proportionnel a la différence de température entre les deux matériaux (solide et fluide) et le flux de chaleur par unité de surface est donné par la relation suivante:

$$q=h.\Delta t$$

Avec:

h: coefficient de transfert thermique par convection

Δt : différence de température entre la surface du solide et le fluide environnant

Pour les conditions habituelles de convection, h peut être pris égale à 25W/m².K

c) Echauffement par rayonnement

Le rayonnement est très important dans la propagation de feux car c'est le mécanisme principale dans le transfert de chaleur des flammes vers les surfaces du combustible, ou de la fumée chaude vers des objets d'une construction ou en fin le flux de chaleur par rayonnement q (W/m²) d'une surface d'émission vers une surface de réception est donné par:

$$q = h(T_f - T_a) \cdot \phi \varepsilon \sigma [(T_2 + 273)^4 - (T_2 - 273)^4]$$

Avec:

ϕ :facteur de configuration égale a1

ε : émissivité des deux sur faces égale a:0.5 dans EC1(1995)

σ : constante de Stefan-Boltzmann égale a: 5.67 x10⁸ (W/m²K²).

III.9 Calcul de la température des sections métalliques lors d'un feu conventionnel

A partir des actions thermiques définies par un modèle feu (ISO 834), l'échauffement des éléments de structures (poteaux, poutres, assemblages...) est déterminé a partir des méthodes analytiques (méthode pas a pas) dites méthodes de calculs simplifiées des parties (feu) des EUROCODES pour les cas suivants:

- Eléments métalliques non protégés
- Eléments métalliques protégés sur le contour de l'élément et protection par écran.

a) Section métallique non protégées

Sous des conditions de feu, la quantité de chaleur transférée sur la surface A de l'élément en acier dans l'intervalle de temps Δt (s) est égale a la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température de l'acier par ΔT (°C) en supposant que la température est uniforme sur la section de l'élément.

On peut écrire:

$$q \cdot A \cdot \Delta T = \rho \cdot C \cdot V \cdot \Delta T$$

D'où:

P: densité de l'acier (Kg/m³),

C: chaleur spécifique de l'acier (J/Kg K),

V: section transversale de l'élément (m²)

q: quantité de chaleur transférée sur la surface de l'élément (W/m²), donnée par :

$$q = h(T_2 - T_1) + \sigma \varepsilon [(T_2 + 273)^4 - (T_1 + 273)^4]$$

D'où:

T1 : température de l'acier pendant l'intervalle de temps Δt (s)

T2: température de gaz chauds (ou feu K)

Les deux équations peuvent être réarrangées pour donner:

$$\Delta T = \left(\frac{A}{V} \cdot \frac{1}{\rho \cdot C} \right) \cdot [(h(T_2 - T_1) + \sigma \varepsilon ((T_2 + 273)^4 - (T_1 + 273)^4))] \Delta t.$$

La solution de cette équation donne, pas à pas, l'évolution de la température de l'élément métallique au cours de l'incendie.

b) Section métallique protégées

Les éléments métalliques protégés chauffent lentement par rapport à d'autres sans protection à cause de l'isolement thermique appliquée qui protège l'acier de l'absorption rapide de chaleur.

Il existe deux grands groupes de systèmes de protection:

- Les protections rapportées autour des éléments métalliques
- Les protections par écrans formant des cavités dans les quelles sont situés les éléments.
- Pour les protections rapportées, l'échauffement de l'acier est régi par les mêmes paramètres que précédemment avec, en plus, l'épaisseur du matériau de protection mis en œuvre et l'efficacité de ce matériau principalement caractérisée par sa conductivité thermique.

L'équation du transfert de chaleur s'écrit:

$$\Delta\theta_a = \frac{\lambda_p}{d_p \rho_a C_a} \frac{A_p}{V} \frac{1}{\left(1 + \frac{\phi}{3}\right)} (\theta_f - \theta_a) \Delta t - (e^{\frac{\phi}{10}} - 1) \Delta\theta_f$$

Où ϕ est la chaleur stockée dans la couche de protection égale à:

$$\phi = \frac{\rho_p C_p}{\rho_a C_a} d_p \frac{A_p}{V}$$

Chapitre IV : Description de complexe GP1/Z

IV.1 Introduction :

Le complexe GP1/Z dénommé « JUMBO GPL », dépend directement de la division GNL & GPL de l'Activité LRP de l'entreprise nationale SONATRACH. Il est conçu pour le traitement de GPL provenant des champs gaziers et pétroliers du sud de l'Algérie

IV.2 Objectif de complexe GP1/Z :

L'importance du complexe construit dans la zone industrielle d'Arzew a pour objectif le traitement du GPL venant de plusieurs sources du sud algérien (Hassi Messaoud, Hassi R'mel) pour la production des gaz « **Propane** » et « **Butane** » liquéfiés.

Le site GP1/Z est certifié ISO 14001 version 2015, ISO 9001 version 2015.

IV.3 Fiche technique du complexe GP1/Z :

- ✓ **Raison Sociale** : Complexe GP1/Z
- ✓ **Superficie** : 120 hectares.
- ✓ **Objectif** : 10.8 Mt/an de GPL.
- ✓ **Produits** :
 - Propane Commercial
 - Butane Commercial
- ✓ **Procédé Utilisé** : Distillation sous pression.
- ✓ **Nombre de Trains** : Neuf (09) trains de 1,2 Mt /an chacun.

Constructeur : Consortium japonais IHI (ISHIKAWAJIMA -HARIMA Heavy Industry) et C. ITOH Compagnies.

- ❖ **Date de démarrage des travaux** : 10 Novembre 1980
- ❖ **Date de Mise en Production du premier train Phase I** : 12 Décembre 1983.
- ❖ **Date de Mise en Production du premier train Phase II** : 24 février 1998.
- ❖ **Date de Mise en Production du premier train Phase III** : 12 février 2010.

Enlèvements : Deux quais de chargement recevant navire des Gaz Pétrolier Liquéfier d'une capacité de 3 000 à 50 000 tonnes de GPL (D1, M6)

- ❖ **Une rampe de chargement par camions** : Six (06) camions.
- ❖ **Destination de la Production** : Exportation et Marché national.

- ❖ **Source d'Approvisionnement :** Gaz en provenance des champs gaziers du sud algérien.
- ❖ **Capacité de stockage :**
 - ✓ Vingt-deux (22) Sphères de Stockage de la charge : 22 000 m³.
 - ✓ Quatre (04) Bacs de Stockage de propane réfrigéré : 280 000 m³.
 - ✓ Quatre (04) Bacs de Stockage du butane réfrigéré : 280 000 m³.
 - ✓ Quatre (04) sphères, une (01) de propane et trois (03) de butane ambiants : 500 m³ et 1500 m³.
 - ✓ Une (01) Sphère de stockage pentane : 500 m³
 - ✓ 9 trains de traitement du GPL dont trois nouvellement installés
 - ✓ 02 unités de récupération des vapeurs de propane et butane (BOG propane et BOG butane).
 - ✓ Section dépentanisassions pour les trois trains de la phase III.
 - ✓ Section démercurisation.
 - ✓ 02 stations électriques assurent l'alimentation du complexe via SONELGAZ.
 - ✓ 05 salles de contrôle.
 - ✓ 06 générateurs de secours
 - ✓ 02 quais de chargement (D1 et M6) pouvant recevoir des navires d'une capacité variant entre 4 000 et 45 000 tonnes du propane et butane.
 - ✓ 01 rampe de chargement de camions.
 - ✓ 01 station d'eau de mer.
 - ✓ 01 unité de déshuilage.
 - ✓ 01 unité de neutralisation des déchets liquides.
 - ✓ 02 unités SIDEM de dessalement d'eau de mer.

IV.4 Situation géographique et voisinage du complexe GP1/Z :

Le complexe GP1Z est situé sur le littoral de l'ouest algérien, à 40KM approximativement de la ville d'Oran et à 8KM de la ville d'Arzew. Il est d'une superficie de 120 hectares, situé dans la zone industrielle d'Arzew ; entre le centre thermique Marsa el Hadjadj du côté est et du côté ouest les complexes GNL de liquéfaction du gaz naturel.

IV.5 Organisation du complexe GP1/Z :

IV.5.1 Organigramme du Complexe GP1/Z :

Afin de permettre une exploitation optimale des ressources disponibles, l'organisation du complexe GP1/Z est étudiée de façon à avoir une coordination complète entre les différentes structures de l'usine.

Le complexe GP1/Z est composé d'une direction et deux sous directions et des départements schématisé comme suit :

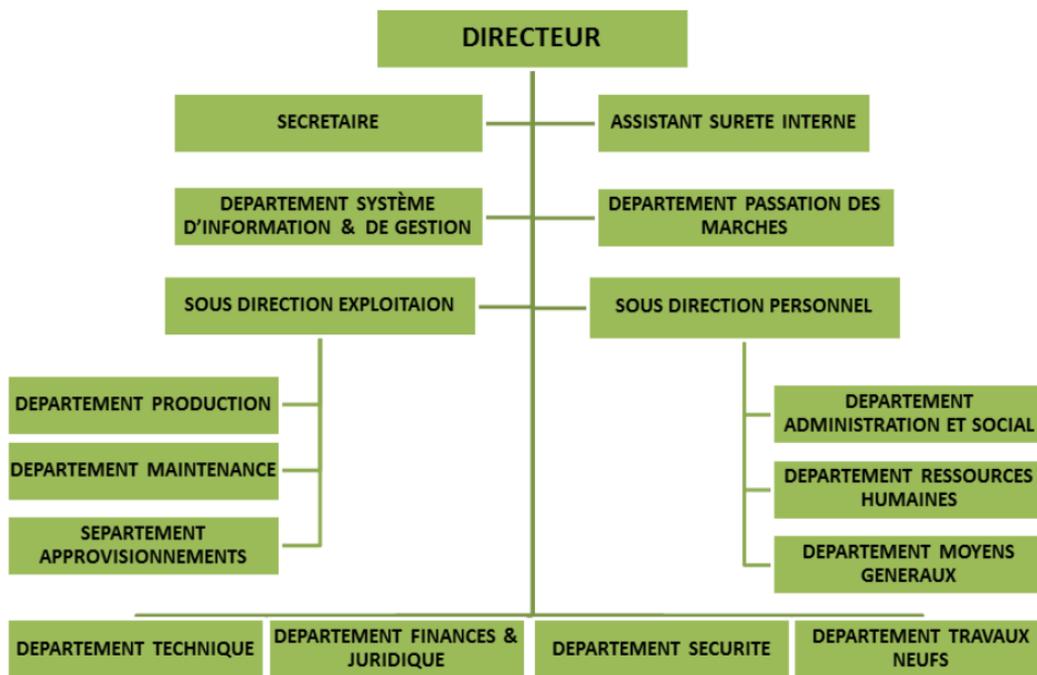


Figure IV 03 : organigramme du complexe Gp1/z

IV.5.2 Organigramme du département HSE :

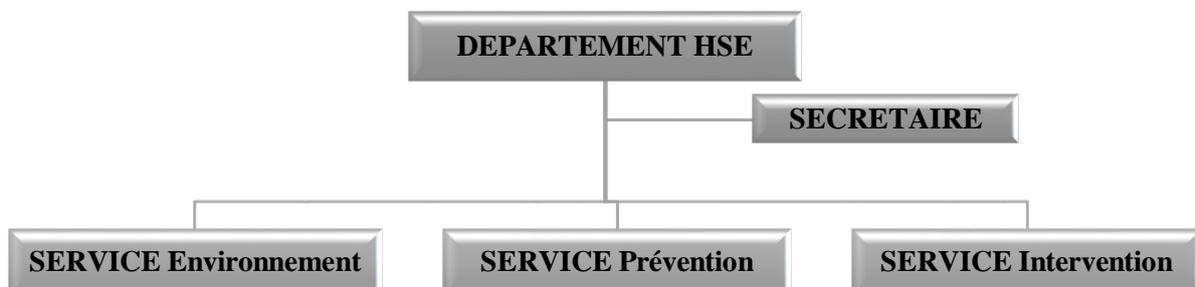


Figure IV. 04 : organigramme du département HSE

IV.6 Description de procédé :(PFD)

Le complexe GP1Z comprend neuf (09) trains dans la zone de procédé, et des moyens communs pour la charge, le stockage, le chargement et la reliquéfaction des vapeurs en off-site. Chaque train dans la zone de procédé a été conçu pour une production nominale annuelle d'un million de tonnes de produits (propane et butane commercial).

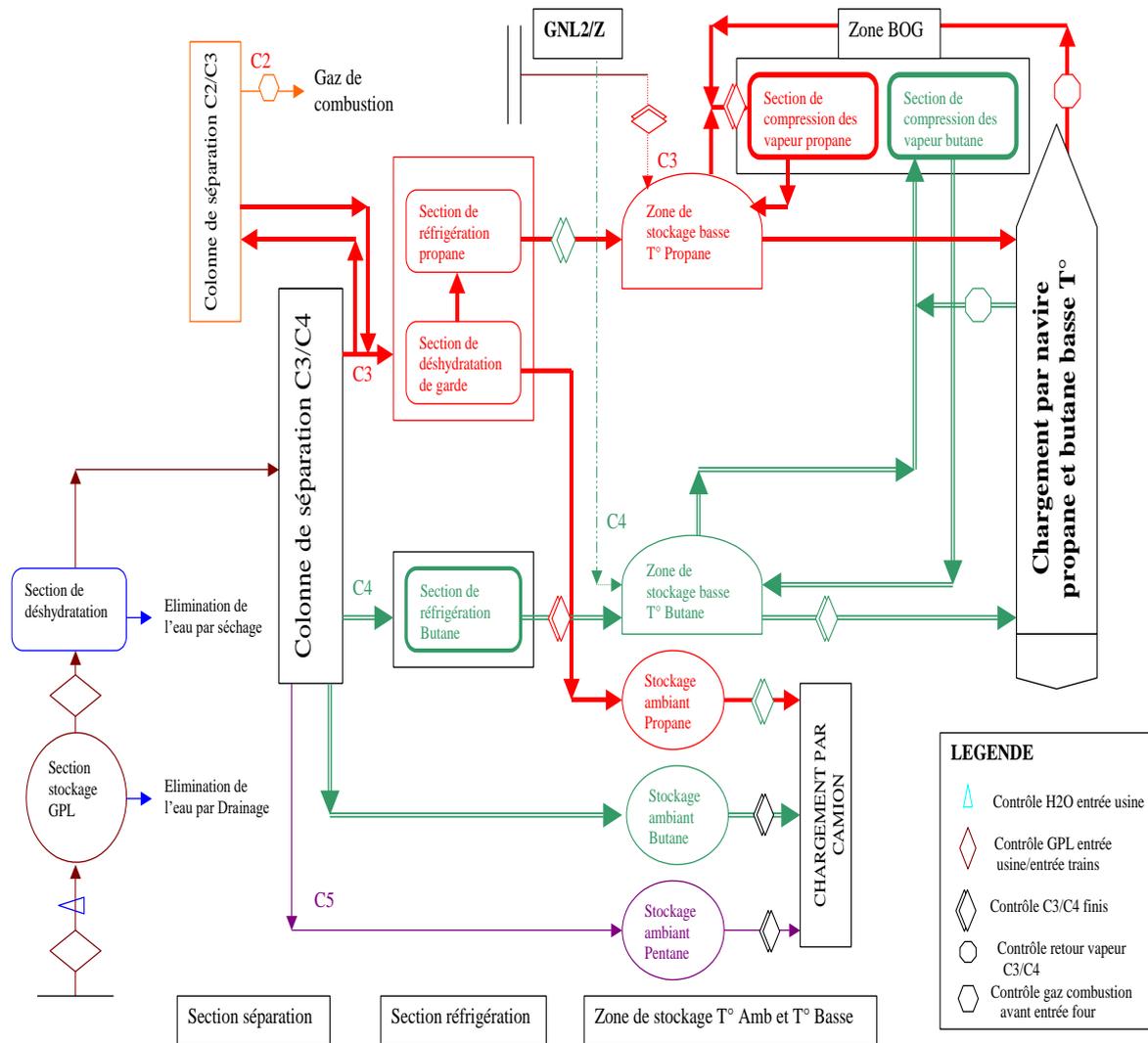


Figure IV 05 : Schéma général du procédé

IV.6.1 Section de stockage de GPL :

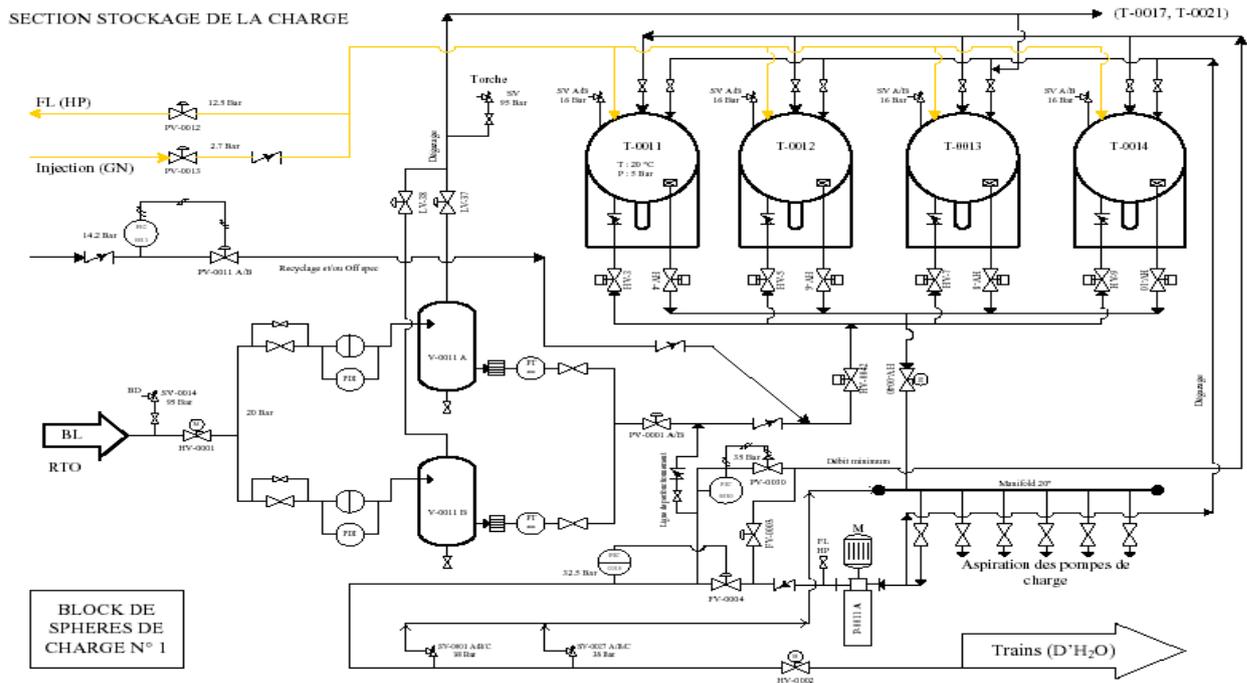


Figure IV 06 : Représentation de la section stockage de la charge GPL

Cette section (fig. II) est conçue pour maintenir un fonctionnement stable et d'assurer une autonomie de plus de 10 heures pour alimenter les trains en GPL brut en cas d'arrêt de pompage. Elle est destinée aussi pour recevoir soit le flux de recyclage, soit le produit hors spécification revenant des sections en aval.

La charge d'alimentation est livrée par RTO (Région Transport Ouest) au complexe GP1Z en GPL brut en provenance des différents champs du sud (Hassi Messaoud, Hassi R'mel, Adrar, In Amenas, Tin-FouyeTabankort et RhourdeNous). Elle est acheminée vers le stockage à l'aide d'une pipe de 24". Avant le stockage le GPL brut passe d'abord par un collecteur équipé par un contrôleur de pression permettant le maintien d'une pression de service stable puis traverse des filtres chacun muni PDI ($\Delta P=0,5$) afin de signaler l'encrassement.

Ensuite le GPL traverse les dégazeurs de la charge afin de séparer et purger les vapeurs du mélange vers les sphères d'alimentation.

Une fois que la charge est filtrée et dégazée, elle passe alors à travers six (06) démercuriseurs pour réduire sa teneur en Mercure jusqu'à l'ordre de 5 nano-g/Nm^3 .

A l'issue des démercuriseurs la charge passe par des redresseurs pour rendre l'écoulement laminaire afin d'avoir une lecture correcte du débit et de la densité du GPL. Le GPL brut est

acheminé ensuite vers les sphères de charge sous une pression de 18 ~ 22 Kg/cm² et une température de 5 ~ 41.8° C.

La charge est stockée dans 22 réservoirs sphériques de capacité de 1000 m³ chacune à des pressions variables entre 7 et 9 bars. Le schéma de la section stockage de la charge GPL est représenté dans la figure suivante.

Le GPL brut est acheminé par la suite vers les neuf trains du procédé qui fonctionnent en parallèle. Cette opération est assurée par 14 pompes centrifuges multi étages à puisard qui aspirent à partir de ce dernier et refoulent dans le collecteur commun pour approvisionner les trains du procédé à une pression de 30 Kg/cm².

IV.6.2 Section déshydratation:

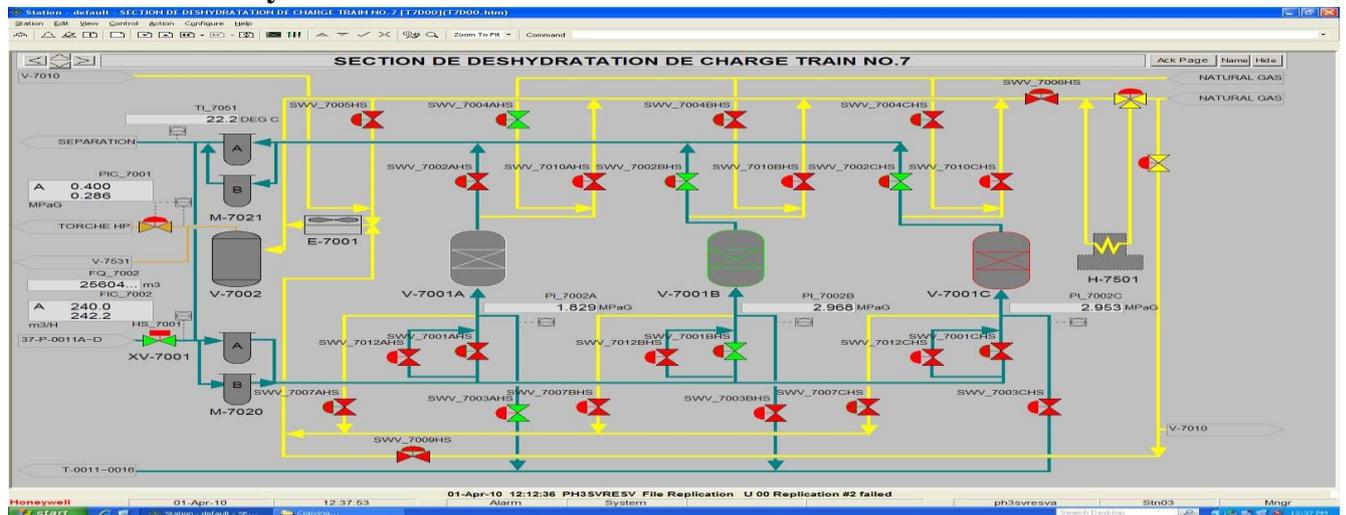


Figure IV 07 : Section de déshydratation

Le but de la section de déshydratation (fig.3) est de réduire la teneur d'eau dissoute dans le GPL de 100 ppm à 5 ppm en poids pour éviter ainsi la formation de glace et de bouchons de givre dans les parties froides de l'installation (réfrigération).

Cette section comprend trois colonnes d'adsorption à tamis moléculaires, à tout instant on a une colonne en service (en adsorption), l'autre en régénération et la dernière en attente. Le GPL passe dans le sécheur du bas vers le haut, l'humidité est extraite lors du passage du GPL à travers les tamis moléculaires pendant 36 heures, une fois cette durée est dépassée le sécheur passe automatiquement en régénération.

La régénération passe par les séquences suivantes :

Drainage (durée 1h) : La vidange du sécheur se fait par l'injection du gaz naturel sous une pression de **20 kg/cm²**. Le GPL restant est acheminé vers les sphères de charge.

Dépressurisation (durée 30 mn): Cette séquence sert à réduire la pression du sécheur de **20 kg/cm²** à **3 kg/cm²** et cela se fait par l'évacuation de GN contenu dans le sécheur vers la section fuel gaz.

Chauffage (durée 11h) : Le réchauffage se fait par le GN chauffé dans le four à une température de **280°C**. Il passe dans le sécheur de haut en bas pour évaporer l'eau contenue dans les tamis moléculaires.

Refroidissement (durée 5h) : Le secteur étant chaud après la séquence de réchauffage, il est refroidi par le GN porté à une température de 12 à 45 °C et une pression de **3kg/cm²**.

Pressurisation (durée 30 min) : Avant le remplissage de la colonne par le GPL, il faut atteindre une pression de service de **20 kg/cm²**. Cette opération se fait par l'introduction de GN à haute pression.

Remplissage : Cette opération consiste à mettre le sécheur en attente.

IV.6.3 Section de séparation (Fractionnateur) :

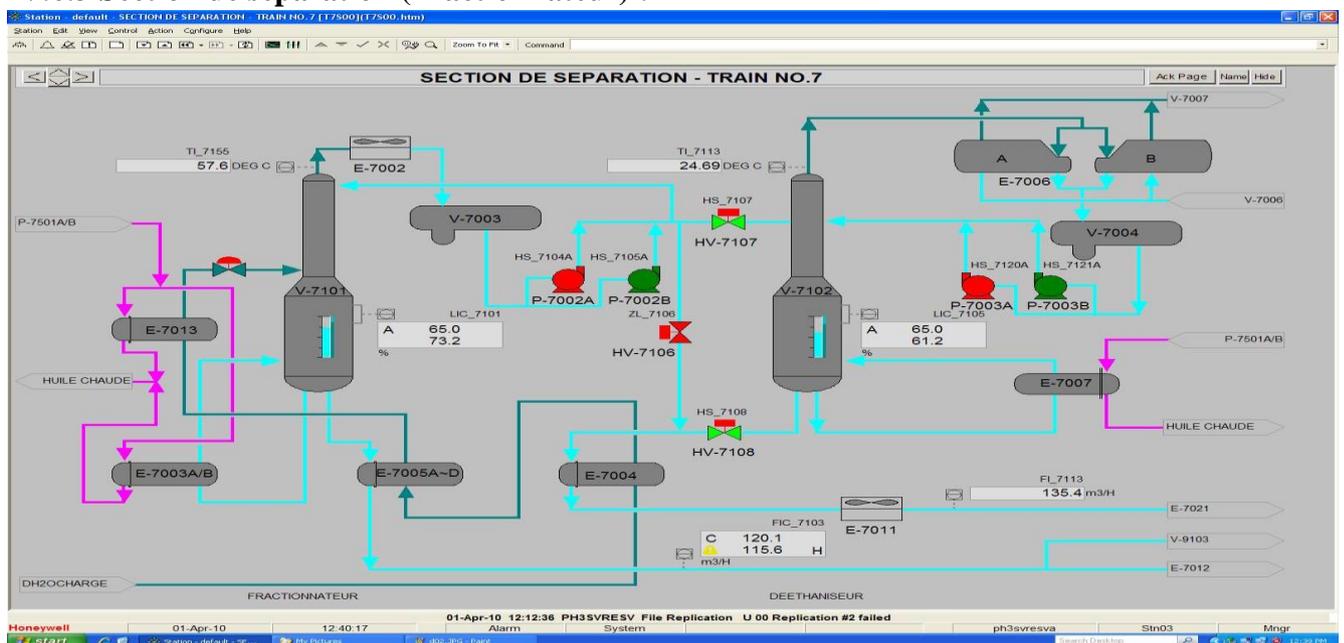


Figure IV.08 : Section de séparation

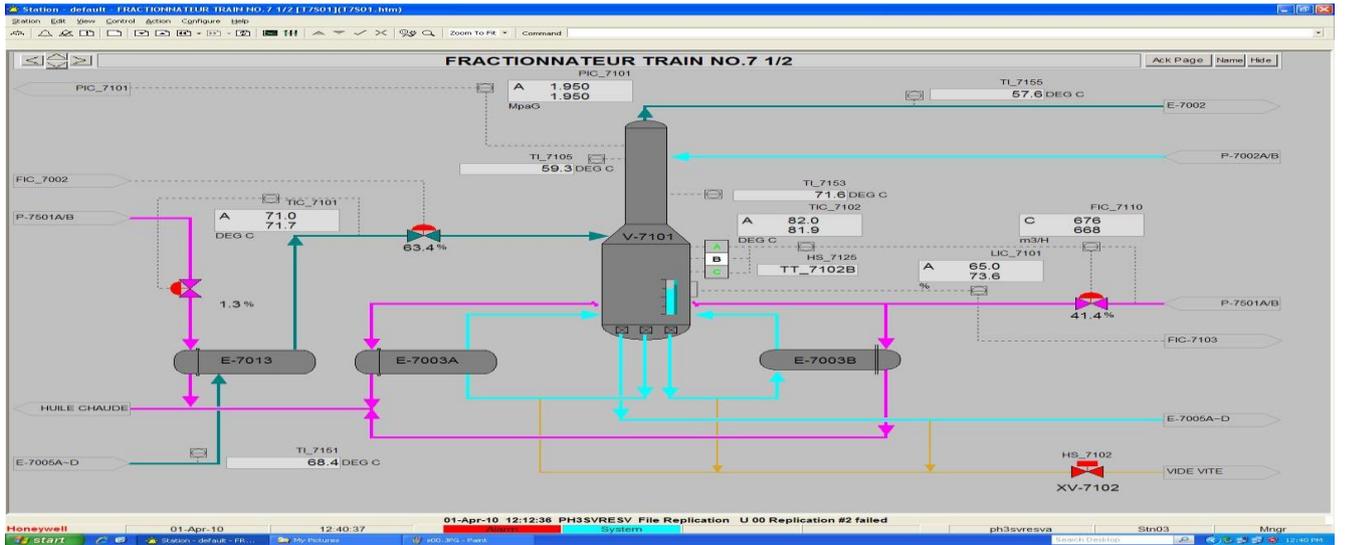


Figure IV.09 : Fractionnateur 1/2

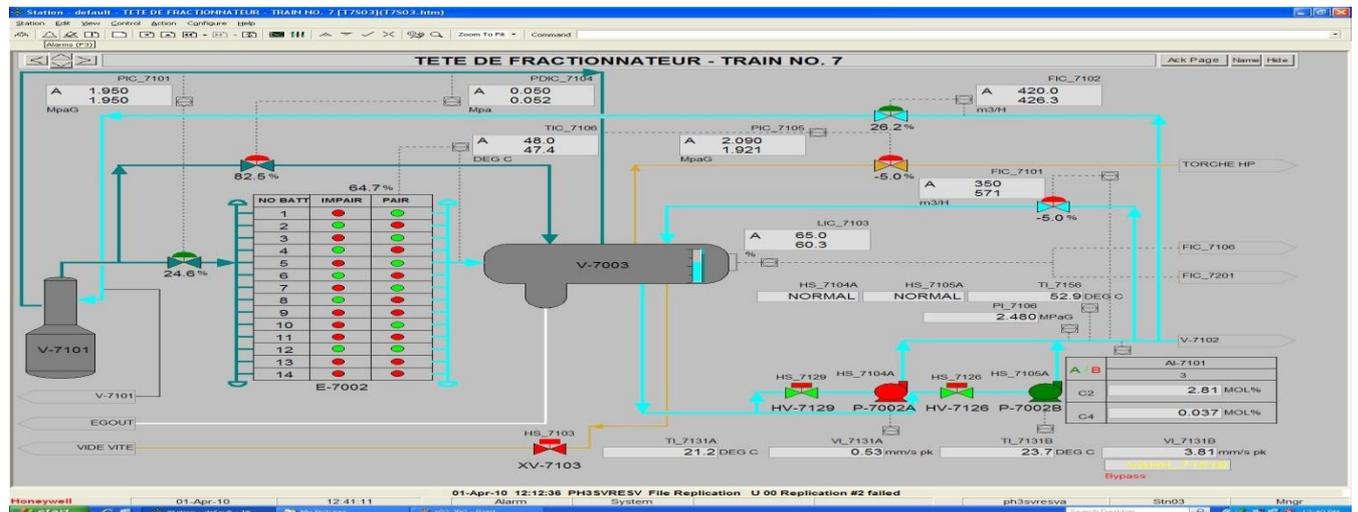


Figure IV.10 : PFD tête de Fractionnateur

Le débit de charge vers la section de séparation dépend de la qualité de cette même charge. Chaque train doit produire 1 million de tonne par an de propane et butane commerciaux, le débit nécessaire en GPL brut est de 1 million de t/an, plus les sous-produits. Le débit de charge nécessaire est d'autant plus élevé que la teneur en éthane et en pentane est importante.

La capacité minimale de chaque train correspond à 50 % de sa capacité normale. A ce débit, chaque colonne doit être exploitée avec un reflux et un rebouillage suffisants pour assurer un fonctionnement stable.

Si un produit d'un train dérive et se trouve hors spécification, il faut recycler tous les produits de ce train, pour maintenir autant que possible, la composition de la charge dans les réservoirs sphériques. Cependant, cela n'est pas nécessairement vrai pour le pentane produit. Autrement

dit, si l'acheminement du produit doit être arrêté pour une raison quelconque, il faut que toutes les colonnes soient mises sur fonctionnement à reflux total, jusqu'à ce que le fonctionnement continu puisse être repris. Il faut noter que la ligne de recyclage des produits hors spécification permet le recyclage des produits d'un train à pleine capacité, ce qui est équivalent à la production de 2 trains fonctionnant à 50 % de leur capacité.

Lorsque le rapport $C2 / (C2 + C3)$ est égal ou supérieur à 4,8% mole, le dééthaniseur doit être en service.

De même, lorsque le rapport de $C5 / (C4 + C5)$ est égal ou supérieur à 1,75 % mole, il faut que le de-pentaniseur soit en service.

Explication des (PFD) ci-dessus :

Après la section de déshydratation, le GPL brut entre dans la section de séparation comme alimentation du Fractionnateur V-7101. Le GPL récupère d'abord la chaleur du propane produit sortant du fond du dérive dans le préchauffeur N° 1, E-7004, puis une autre récupération de chaleur dans le préchauffeur N° 2, E-7005 A~D, cette fois ci sur le produit du fond du Fractionnateur.

Le GPL est finalement amené à son point de bulle dans le préchauffeur N° 3, E-7013, qui fait appel au fluide caloporteur avec contrôle de la température de sortie de l'E-7013. A la sortie de l'E-7013, le débit de charge est réglé selon le point de consigne du contrôleur de débit.

Dans le Fractionnateur, le GPL brut est séparé en un produit de butane au fond et un produit de propane liquide en tête. La colonne comprend 55 plateaux à clapets.

Le fonctionnement du Fractionnateur est réglé de manière à réaliser la séparation voulue en propane et en butane, tout en effectuant le taux de récupération recherché.

La pression en tête du Fractionnateur est maintenue constante par action de la vanne placée dans la longe des vapeurs de tête vers l'aéro-condenseur E-7002.

La pression dans le ballon de reflux est maintenue par un contrôleur de la différence de pression et un by-pass de gaz chaud E-7002. La température des condensât sortant de E-7002 est maintenue constante par le réglage du pas des pales du ventilateur.

Les vapeurs de tête du V-7101 sont complètement condensées dans E-7002. Une partie des condensât récupéré au V-7003 est repris par la pompe de reflux P-7002 et renvoyée au V-7101 comme reflux froid, sous contrôle du débit de liquide excédentaire à la sortie de P-7002,

à savoir le produit de tête, est envoyé au dérive V-7102 sous contrôle du débit piloté par le contrôleur de niveau de V-7003.

Le liquide au fond du Fractionnateur représente essentiellement un butane à teneur variable en pentane. En fonction de la teneur en pentane de la charge, le butane peut subir une dépentanisations ou non. En fonctionnement normal, le Dépentaniseur n'est pas nécessaire. Ce qui explique le nombre faible des colonnes prévues (06) pour les neuf trains.

IV.6.4 Dééthaniseur:

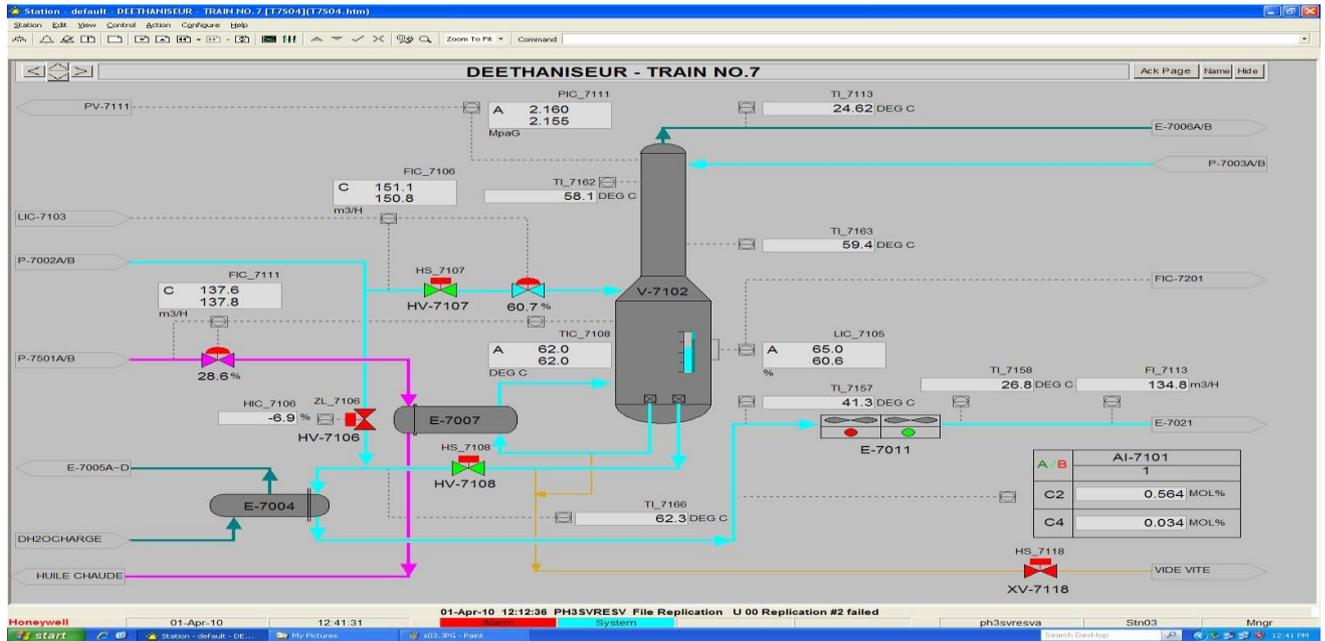


Figure IV. 11 : PFD Dééthaniseur

Afin de produire du propane commercial plus au moins pur les produits de tête de la colonne de fractionnement alimentent le dééthaniseur (fig.5). Ce dernier est une colonne de fractionnement équipée de 25 plateaux à clapets. Le propane sort au fond de la colonne à une température de 62 °C se dirige directement vers le premier préchauffeur du fractionnateur, passe ensuite vers les aérorefrigerants E-7011 où il va être refroidit avant de pénétrer dans la section de réfrigération, où il est refroidi à - 38° C, enfin vers les sphères de stockage afin d’être expédiés sur le marché national. Le gaz riche en éthane sortant de la partie supérieure du dééthaniseur est utilisé comme combustible du four.

IV.6.5 Dépentaniseurs :

Il existe deux Dépentaniseurs communs pour les 09 trains. Le rôle d’un Dépentaniseurs est d’éliminer les traces de pentane contenues dans le butane. La colonne est constituée de 50 plateaux à clapets.

Le butane sortant de la tête du Dépénantiseur, mélangé au reste du butane non dépénantisé est envoyé à la section de réfrigération. Le pentane recueilli du fond du Dépénantiseur sera refroidi par aérorefrigerants, et envoyé vers le stockage ambiant, cette opération est souvent by-passée, car la charge de GPL arrive avec une très faible teneur en pentane.

IV.6.6 Section de Réfrigération:

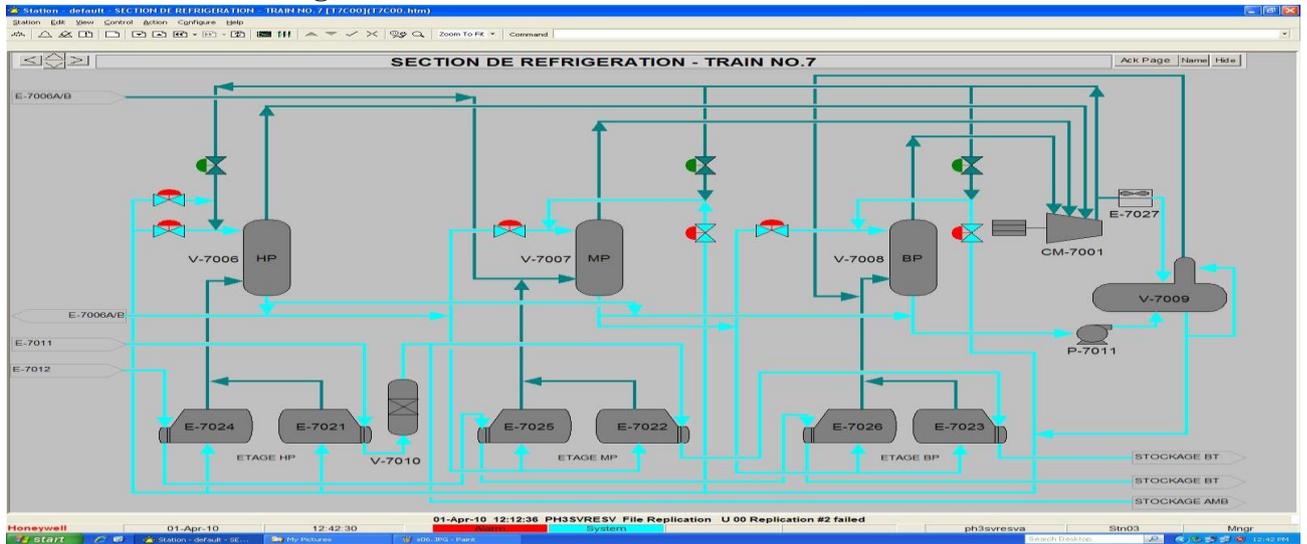


Figure IV 12: PFD Section de Réfrigération

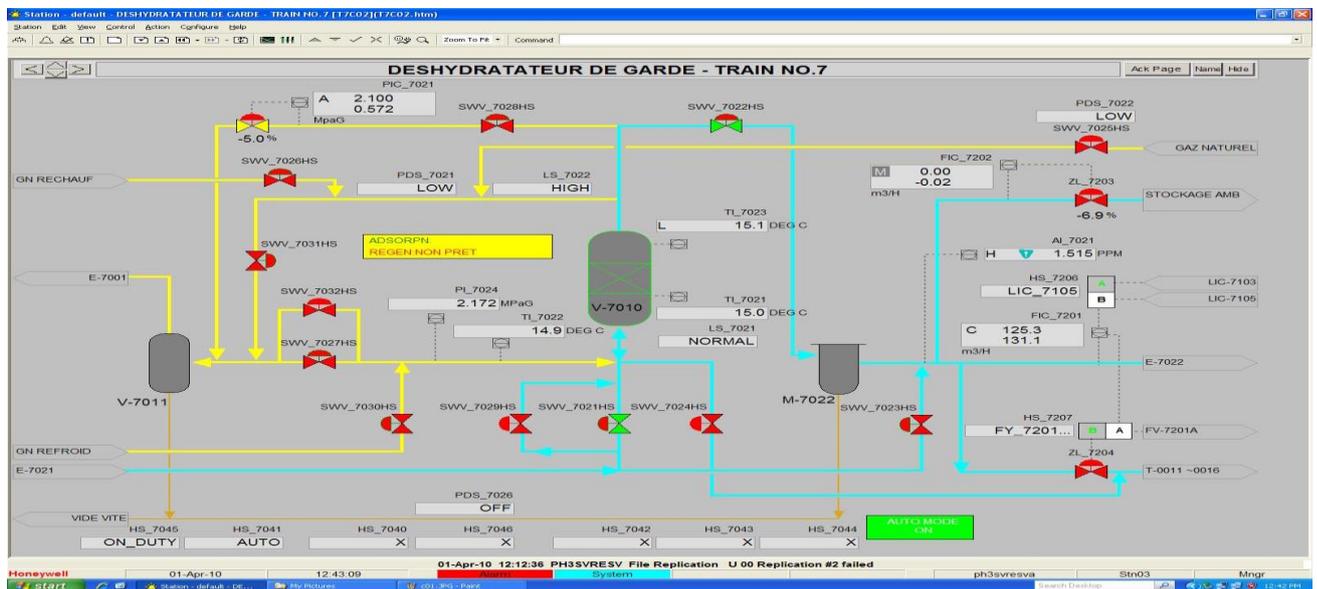


Figure IV.13 : PFD déshydrateur de garde

Le but de cette section est de refroidir les produits finis à leur température de stockage (-38 ~ -42°C pour le propane et -8 ~ -10°C pour le butane). Les produits passent par un deuxième

déshydrateur appelé déshydrateur de garde, qui réduit la teneur en eau de 5 ppm à 1 ppm, ensuite réfrigérés par trois (03) échangeurs suivant un cycle fermé formant une boucle de réfrigération, le fluide utilisé comme réfrigérant est le propane pur. Ce dernier est évaporé dans les échangeurs de chaleur. Cette évaporation provoque l'abaissement de température du produit à réfrigérer. Une partie du propane réfrigéré sera comprimée et envoyée au déethaniseur comme réfrigérant de tête de colonne. Les vapeurs de propane générées sont comprimées par un compresseur centrifuge à trois (03) étages entraîné par une turbine à gaz, ensuite condensées dans les condenseurs de type aéroréfrigérants.

Les produits finis sont ensuite canalisés vers les bacs de stockage.

IV.6.7 Section d'huile chaude:

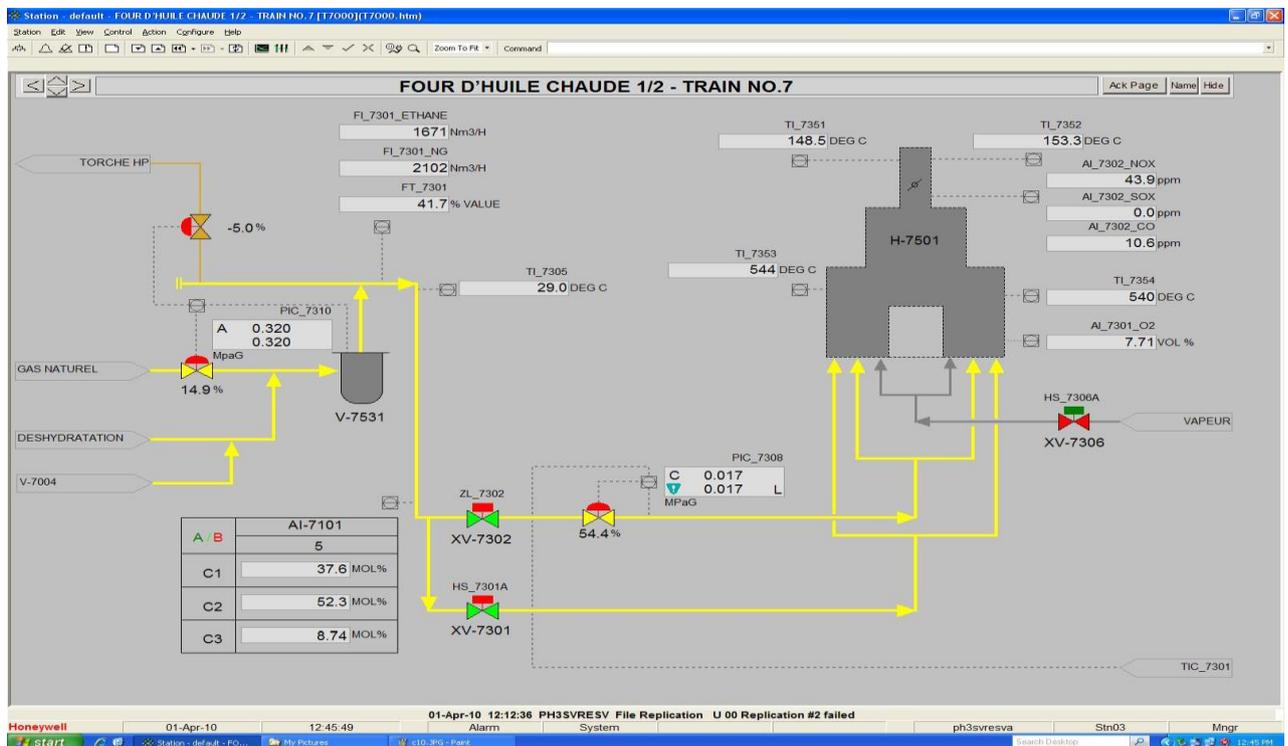


Figure IV.14 : Section d'huile chaude 1/2

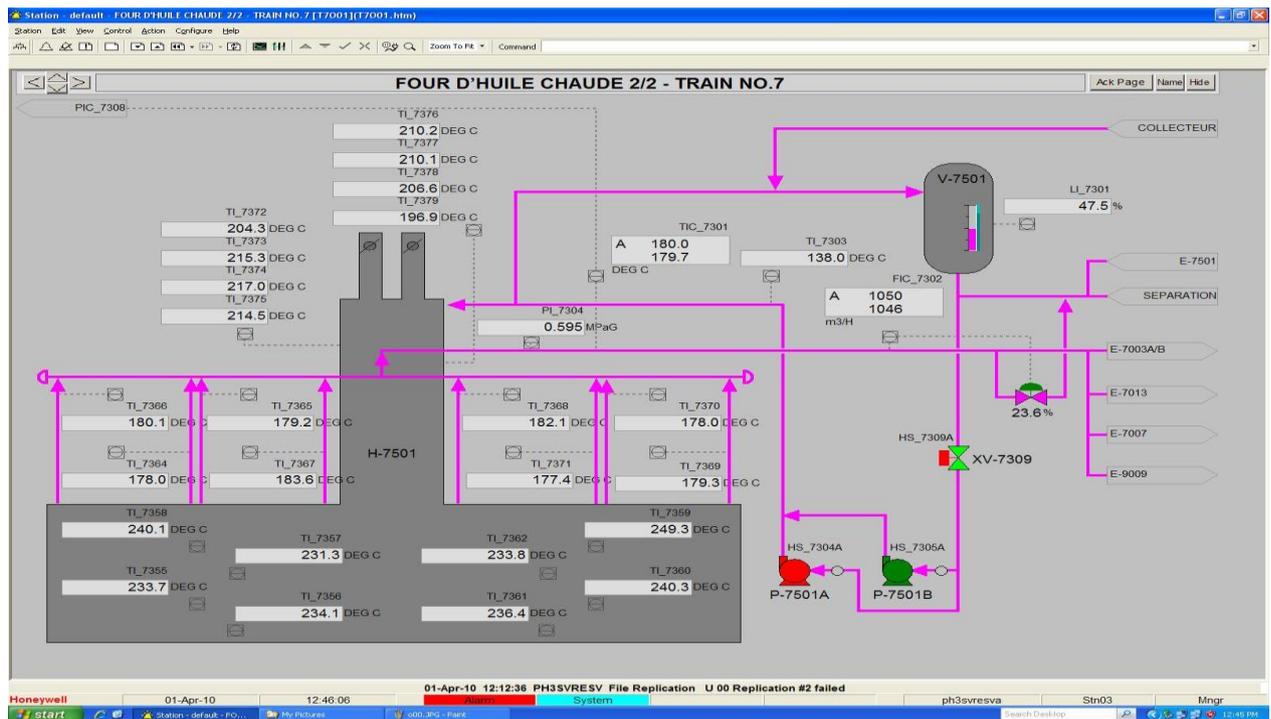


Figure IV 15 : Section d'huile chaude 2/2

Cette section d'huile caloporteur est utilisée comme source de chaleur pour les équipements suivants :

Le troisième préchauffeur (E-7013)

Les rebouilleurs de la section séparation :(E-7013A/B, E-7007, E-7009).

Le gaz naturel de régénération de la section déshydratation.

Le circuit de l'huile est aussi une boucle fermée, les pompes en circulation aspirent l'huile du ballon d'expansion et le refoulent vers le four. Au niveau du four l'huile est chauffée premièrement par convection puis radiation jusqu'à 180°C ensuite elle est dirigée vers les différents utilisateurs, à son retour l'huile est refroidie à 130°C.

IV.6.7 Zone des utilités :

Elle alimente les divers zones de production en :

Fuel (gaz naturel) : utilisé comme combustible.

Air : elle est divisée en deux :

Air instrument : C'est de l'air séché après enlèvement de l'humidité, destiné à la manipulation des boucles de régulation (vanne pneumatique).

Air service : sert au nettoyage et entretien des équipements.

Vapeur : elle est produite au niveau de la chaudière, à partir de l'eau de mer distillée, à 10 kg/cm², elle est utilisée dans les échangeurs de chaleur.

Eau : Production de l'eau distillée, l'eau de refroidissement utilisée pour les équipements (pompe) et l'eau potable.

Méthanol : utilisé pour le dégivrage.

Gasoil : utilisé pour les générateurs de secours.

Azote : Stocké dans un ballon et distribué suivant les circuits :

- Circuit Gazeux (HELIOS) ;
- Circuit d'azote liquide (COGIZ).

Un générateur électrique de secours : d'une capacité de 25.617 KW.

Un système de sécurité **vide-vite** (**Blow-down**)

Les torches : deux hautes pressions et une basse pression sert à brûler la quantité de gaz provoquée par un dysfonctionnement des trains.

IV.6.8 Section stockage et expédition :

Elle s'occupe de stockage des produits finis et l'expédition par navires et camions. On distingue deux types de stockage :

Section de stockage à basse température : (marché international)

Trois (4) bacs pour le Propane de **70000** m³ chacun.

Trois (3) bacs pour le Butane de **70000** m³ chacun.

Un (1) bac BuPro de **70000** m³.

Section de stockage à température ambiante : (marché national)

Une sphère (1) pour le Propane de **500** m³.

Trois sphères (3) pour le Butane de **500** m³ chacune.

Une sphère (1) pour le pentane de **500** m³ chacune.

Le service Stockage et Expédition gère les trois zones suivantes:

IV.6.9 Section BOG (Boil- Off- Gas)

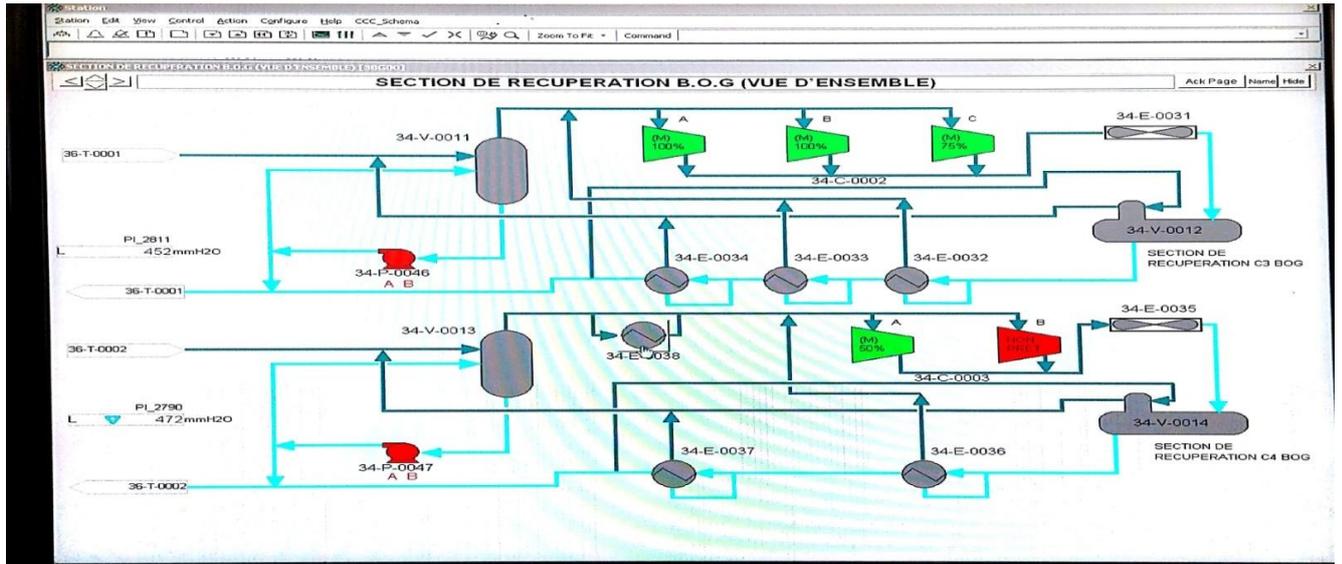


Figure IV. 16 : La section de reliquéfaction des vapeurs (BOG),

La section de reliquéfaction des vapeurs (BOG), a pour but le contrôle de la pression dans les réservoirs de stockage à basse température, aussi bien pendant le stockage que pendant les opérations de chargement les vapeurs excédentaires récupérées sont comprimées pour qu'elle puissent être reliquéfiées sous forme de condensats réfrigérés aux réservoirs à basse température, le contrôle est assuré par deux salles :

LCR (Local Control Room) : s'occupe de la gestion des opérations de stockage des produits finis, section récupération BOG (gaz évaporé).

JCR (Jetty Control Room) : s'occupe de la supervision des opérations de chargement par navire.

Section jetée (CN) :

S'occupe des enlèvements par navire, il y'a deux jetées :

- D1 : concernant les petits navires.
- M6 : concernant les grands navires.

Section Chargement par Camion (CC) :

S'occupe de la gestion des enlèvements par camion au niveau de la rampe de chargement par camion (NAFTAL et les opérateurs privés). La section est dotée de 5 réservoirs sphériques, des pompes et des bras de chargement. Ces installations sont conçues de manière à permettre le chargement simultané du propane, pentane et butane.

**Chapitre V Partie Pratique : Etude du temps
d'échauffement du matériau ignifuge du
complexe GP1/Z.**

V.1 Introduction

Le complexe GP/1Z dispose d'un système de protection passive contre l'incendie conçu pour protéger les supports des échangeurs de chaleurs. Le matériau utilisé est la Fendolite dont la composition est un mélange de ciment portland et de vermiculite qui joue le rôle d'un retardateur de flamme.

Dans ce chapitre, une étude cinétique a été réalisée afin d'estimer le temps d'échauffement du support lorsqu'il est exposé aux hautes températures.

V.2 Caractéristiques des produits ignifuges utilisés

Le produit est un matériau résistant au feu appliqué par pulvérisation (SFRM) à base de vermiculite, un type de mica, et de ciment Portland, ainsi que de calcaire broyé. Il est spécifiquement développé pour une application par pulvérisation sur des colonnes et des poutres structurelles dans des environnements extérieurs et des situations intérieures où des niveaux plus élevés de résistance à l'abrasion et de dureté sont nécessaires.

Bien que le produit utilisé « Fendolite » soit 1/3 de la densité du béton ordinaire, réduisant ainsi considérablement la charge permanente, il est également très durable et résistant à la fissuration sous impact mécanique. Certaines propriétés physiques et chimiques sont:

- ✚ Densité apparente : 732 Kg/m³.
- ✚ Conductivité thermique : 0.19w/mKà24°C ou bien 1.32BTU/hr ft²°Fà 75°F.
- ✚ Résistance à la compression : 3,778 kPas ou bien 78,912 psf
- ✚ Adhésion/cohésion : 568 kPas ou bien 11,870 psf.

Le produit ignifuge « Fendolite » contient une grande quantité de ciment, au maximum 60% de ciment, et les autres composés sont souvent des matériaux isolants comme le mica et des granulats comme le calcaire broyé qui permettent d'isoler sans alourdir sensiblement la structure.

Le mica est ajouté afin d'augmenter les propriétés isolantes sans augmenter le poids, car le mica est un minéral léger. Le matériau présente un comportement tel que observé dans un ciment et la présence de pores remplis d'air améliore sa résistance aux hautes températures et lui confère la propriété d'une barrière d'isolation thermique.

Plusieurs réactions ont lieu pendant le processus de chauffage : libération d'eau, élimination des groupements hydroxyle (OH⁻) ou déshydroxylation et décarbonatation, donc du CO₂

libéré. Lorsqu'il est chauffé, il n'y a pas de comportement intumescent, donc il n'y a pas de variation de volume importante.

Tableau V.1 : Propriétés physiques de la Fendolite.

Propriété physique	ASTM méthode	Performances testé
Combustion de surface	E84	Flamme : 0 Fumé : 0
Combustibilité	E135	Non combustible
Densité	E605	18 pcf (288kg/m ³)
Cohésion /Adhésion	E736	16.154 psf (773.5 kPa)
Déviation	E759	Pas de fissures, d'écaillage ou de décollement
Effet obligatoire	E760	Pas de fissures, d'écaillage ou de décollement
Résistance a la compression	E761	79.211 psf (3.7926 kPa)
Erosion atmosphérique	E759	0.000 g/ft ² (0.000 g/m ²)
Résistance a la corrosion	E937	Ne favorise pas a la corrosion de l'acier
Résistance fongique	G21	Pas de croissance après 28 jours
Résistance thermique valeur R/pouce	C518	0.76
Absorption acoustique	C423	0.30 NRC 1/2" (13mm) sur le pont et la poutre
VOC	EPA méthode 24	0

Le ciment étant un produit bon marché, le matériau obtenu est une bonne alternative puisqu'il donne une réponse appropriée au feu sans augmenter le prix.

Tableau V.2 : Composition de la Fendolite.

Nom du produit	Pourcentage
Vermiculite	< 30
Ciment Portland	40-60
Cendres volatiles	< 20
Poussière de fabrication du clinker à ciment	<5
Silice cristalline quartz	<2
Cristobalite	< 0,1

V.3 Qualification Du Système Ignifuge

Le système ignifuge est certifié par un laboratoire indépendant pour une résistance de 120min contre un feu d'hydrocarbure, tels que défini dans le standard UL 1709, lorsque ce dernier est appliqué à une épaisseur de 33.4 mm

V.4 Mode d'application du produit ignifuge

La procédure d'application se composera des étapes détaillées suivante pour :

1- Préparation de surface :

- a- Démolition totale du mortier Ignifuge de la charpente existante à l'aide d'un burin pneumatique
- b- Toute la préparation des surfaces en acier se confirme aux plus récentes révisions des spécifications relatives à la préparation des surfaces.
- c- Sablage de toute la charpente métallique à ignifuger.
- d- Fourniture de produit de colmatage à froid et réparation des crevasses des parties dégradées de la tôle des charpentes métalliques si nécessaire.

2- La couche primaire :

- Sera appliqué aux surface après nettoyage et avant l'apparition de la moindre tâche de rouille (si de la rouille se forme après nettoyage la surface sera de nouveau à nettoyer avant peinture)
 - Application d'une couche primaire d'épaisseur 60 microns de protection anti corrosion sur les parties sablées
- 3-** Application d'une couche de peinture d'accrochage sur toutes les zones d'ignifugeage a une épaisseur de film humide de 100 à 150 microns.
- 4-** Les surfaces d'acier a ignifuger seront nettoyées a l'aide des moyennes appropriées pour qu'elle soient exempté d'huile , poussière, humidité, écaille et toutes autres particules qui pourraient empêcher le produit protecteur d'adhérer a la surface à ignifuger.
- 5-** Treillage : Mise en place de grillage de renforcement galvanisé à la maille de 50*50 fixé aux branches sur la membrane à ignifuger conformément aux spécifications de travail.
- 6-** La surface des conduites, équipements et appareils voisins des membranes à ignifuger sera protégée contre les projections de produit moyen de bâche ou de papier épais afin de limiter les travaux de nettoyage après mise en œuvre.
- 7-** Pulvérisation du produit ignifuge à base de mortier à l'épaisseur requis au moyen d'une machine de projection et sera fini pour donner une texture ferme et lisse.

L'application du mortier léger se fera à l'aide d'une machine de projection muni d'un rotor métallique/stator souple, de type PUTZMEISTER avec une vitesse de pompe comprise entre 100 et 600 tr/min.

FENDOLITE MII peut être appliqué lorsque les températures du substrat et de l'air sont supérieures à 2 °C, mais il est conseillé de l'appliquer lorsque les températures du substrat ou de l'air sont supérieures à 4,4° et inférieures à 45°.

La température du substrat doit être d'au moins 2 °C au-dessus du point de rosée.

Un contrôle du point de rosée sera effectué régulièrement et sera consigné sur une fiche contrôle/qualité qui sera remis au M.O

Il nécessite l'ajout de 15 à 19 litres d'eau potable par sac de 20KG. Le temps de mélange avec le mortier FENDOLITE MII est de 3 minutes pour assurer les bonnes propriétés du mélange Eau potable/Mortier.

L'eau utilisée pour le gâchage du mortier léger FENDOLITE MII sera stockée dans des citernes. Elle sera propre de qualité potable.

Pour calculer la densité mouillée, un échantillon du produit mélangé sera prélevé manuellement dans la trémie de la machine, à hauteur d'un litre de produit qui sera versé dans un sac plastique et pesé à l'aide d'une balance avec afficheur électronique, la densité doit se situer entre 690 et 840 kg/m³ comme stipulé dans la fiche technique et la méthode d'application du produit FENDOLITE MII.

V.5 Etude cinétique du matériau ignifuge

Comme déjà décrit au chapitre II, le matériau ignifuge doit posséder des propriétés thermiques et mécaniques qui lui confèrent les caractéristiques d'un isolant thermique. Parmi ces propriétés les plus intéressantes c'est sans doute sa capacité à retenir le flux de chaleur d'un incendie pendant une durée de deux heures. De ce fait, une étude cinétique a été entamée afin d'évaluer le temps de résistance de l'ignifuge utilisé au complexe GP1Z. Cette étude inclus aussi le cas de la structure métallique non protégée.

Comportement de l'acier du support non protégé au feu

L'augmentation incrémentale de la température d'une section d'acier non protégé et uniformément chauffée dans l'intervalle de temps δt est donnée à partir de la relation :

$$\delta T_s = \frac{\alpha_c + \alpha_r}{C_s \rho_s} \frac{H_p}{A} \cdot (T_f - T_s) \delta t \quad (1)$$

D'où :

C_s, ρ_s sont respectivement la chaleur spécifique et la densité de l'acier.

T_f est la température du feu à l'instant t.

T_s la température de la section en acier, (°C) qui est supposée être uniforme, au temps t.

H_p/A est le facteur de section (m⁻¹).

α_c est le coefficient de transfert de chaleur par convection, normalement pris comme une constante de 25 W/m² .°C.

α_r est le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement, calculé à partir de la relation :

$$\alpha_r = \frac{5.67 \varepsilon}{T_f - T_s} [(T_f + 273)^4 - (T_s + 273)^4] \times 10^{-8} \quad (2)$$

Le paramètre ε est l'émissivité résultante, représente le rayonnement transmis entre le feu et la surface métallique et sa valeur dépend du degré d'exposition directe de l'élément au feu. Les éléments qui sont partiellement protégés des effets radiants de la chaleur du feu auraient une valeur inférieure à ε . Par prudence, ε peut être pris égal à 0,5.

Le facteur de section

Le paramètre de contrôle qui détermine l'élévation de température dans un élément en acier est le rapport entre le périmètre chauffé H_p et l'aire de la section transversale A de l'élément. Ce rapport H_p/A est normalement présenté en unités de m^{-1} et est appelé "facteur de section". Les valeurs du facteur de section sont comprises entre 100 et 250 m^{-1} pour la taille normale des profilés laminés à chaud.

La définition du périmètre chauffé d'un élément non protégé est relativement simple. Pour une section I entièrement exposée (Figure VI.1) :

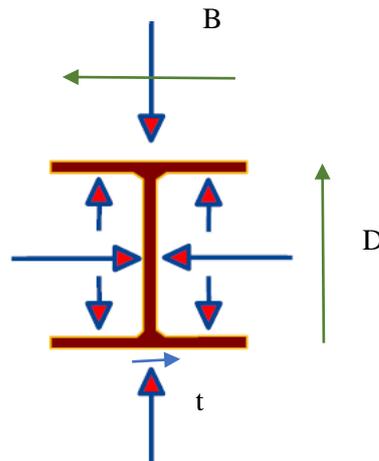


Figure V.1 : Structure en acier de forme I non protégés.

Le facteur de section H_p est égale à :

$$H_p = 4B + 2D - 2t$$

Où B et D sont la largeur et la profondeur de la section et t est l'épaisseur.

V.6 Etude du cas du support de l'échangeur de chaleur

Le support métallique de l'échangeur de chaleur au niveau du complexe GP1Z (Figure IV.1) est en acier dont la hauteur varie entre 2 à 5 m et la longueur est de 10 cm. Le support est

revêtu d'une couche de matériau ignifuge qui le protège de l'incendie d'une épaisseur de 3,4 cm.



(a)



(b)

Figure V.02 : a) échangeur de chaleur b) support métallique.

V.7 Calcul du temps de l'échauffement du support

Calcul du facteur de section du support

Le support métallique possède une forme « L » dont les dimensions sont illustrées sur la Figure V.3.

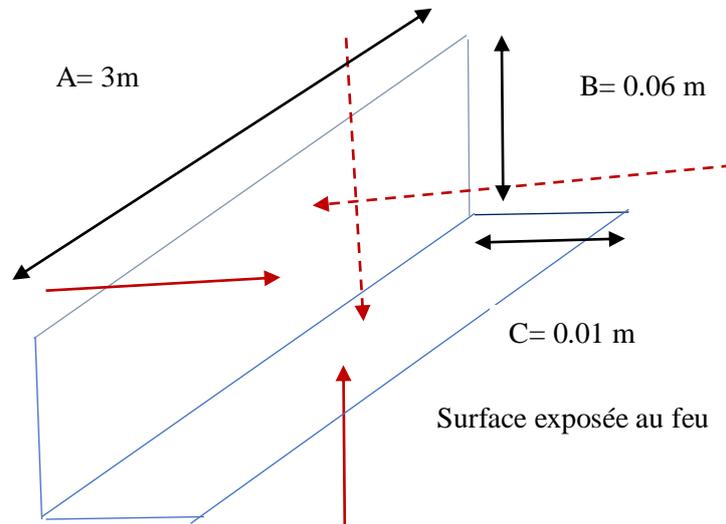


Figure V.03 : la forme du support étudié.

Le facteur de section : $H_p/A = \frac{2(2A+2B)+2(2B+2C)}{(A.B)+(B.C)} = 134,66 \text{ m}^{-1}$.

En utilisant l'équation (2), nous avons calculé la durée de l'échauffement du support métallique non protégé pour une température T_f égale à 600°C . le tableau V. Donne les différents paramètres nécessaires pour le calcul.

Tableau V.3 : Les paramètres utilisés pour le calcul du temps

Les paramètres de la relation (1)	Les valeurs
C_{ps}	520 J/Kg.C
ρ_s	7850 Kg/m ³
α_c	25 Watt/m ² .C
α_r	47,91 Watt/m ² .C
H_p/A	134,66 m ⁻¹
T_s	20°C

La résolution de la relation (1) se fait par « intégration incrémentée ». En faisant varier le temps Δt_1 de 5°C, nous avons calculé la première itération du ΔT_1 ensuite on augmente le Δt_2 de 5°C et on calcul ΔT_2 et ainsi de suite jusqu'à la température requise.

Les itérations sont effectuées à l'aide de l'EXCEL, quelques résultats sont illustrés sur le Tableau V.3 :

Tableau V.4 : Solution de l'équation (1) après itération.

Temps (s)	Température (°C)
5	24,073
30	50,08
60	79,33
90	107,72
120	134,24
180	185,65
220	220,59
280	266,92
320	295,72
380	335,75
420	360,32
460	383,20
500	404,48
520	414,43
580	442,05
620	458,55
680	480,62
800	516,05
850	527,82
900	538,07
950	546,96
1050	561,29
1200	576,08
1800	596,95

La figure V.5 montre l'évolution de la température de l'acier sans protection avec le temps. On remarque que la température augmente progressivement jusqu'à un temps de **1500s**, qui correspond à **25min** dans ce cas la température est d'environ 591°C ensuite l'évolution reste constante.

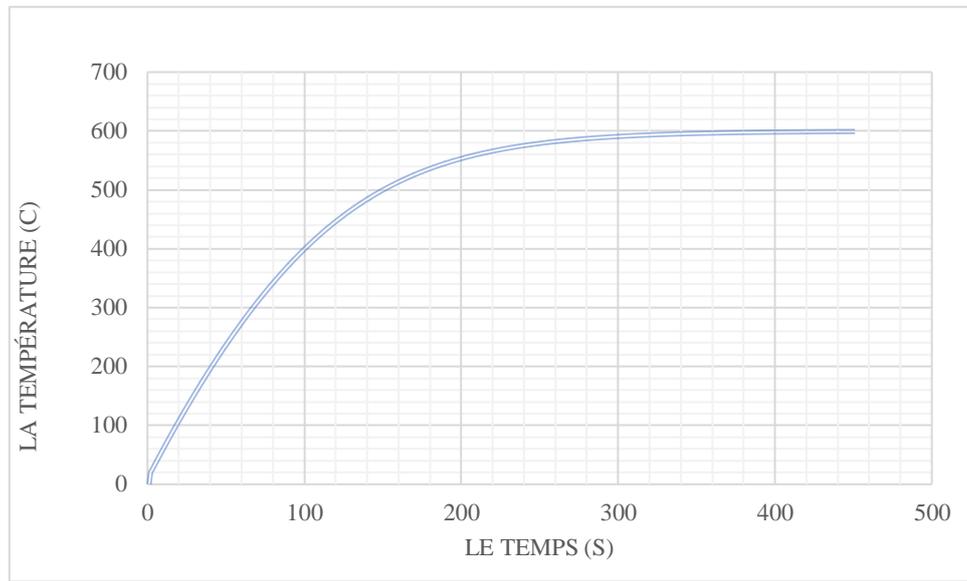


Figure V.04 : Evolution de la température en fonction du temps structure non protégée..

V.8 Calcul du temps de l'échauffement du support protégé par la Fendolite

Le passage unidimensionnel de la chaleur à travers un matériau mince de protection contre le feu dans une section en acier est défini par l'équation suivante en référence à l'équation (1) :

$$\delta\theta_s = \frac{H_p k_i}{A C_s \rho_s d_i} \cdot \frac{1}{(1 + \xi)} \cdot (\theta_f - \theta_s) \delta t \quad (3)$$

K_i : la conductivité thermique de l'ignifuge (Fendolite) (0,19 Watt/m.°C).

d_i : l'épaisseur de l'ignifuge.(0,0034 m)

$$\zeta = \frac{d_i \cdot \rho_i}{\rho_s} \cdot \frac{H_p}{A} \quad (4)$$

ρ_i : la masse volumique du matériau Fendolite : 732 Kg/m³.

On prenant la même température T_f égale à 600°C, les résultats des itérations en procédant de la même manière que dans la section IV.4.3.1 avec un pas de 5°C sont montrés sur le Tableau V.5 :

Tableau V.5 : Solution de l'équation (3) par itérations.

Temps (min)	Température (°C)
0,083	20,37
18,58	100,42
10,11	200
14,43	262
17,45	300
18,75	320
26,51	380
27,81	400
42,05	408
43	491
58,43	539,72
75,26	565,29
89	580,9
102	588
116,6	593,7
145,15	597
158	598
176,21	599,80

L'évolution de la température avec le temps pour la structure protégée par la Fendolite est montrée sur la Figure V.6.

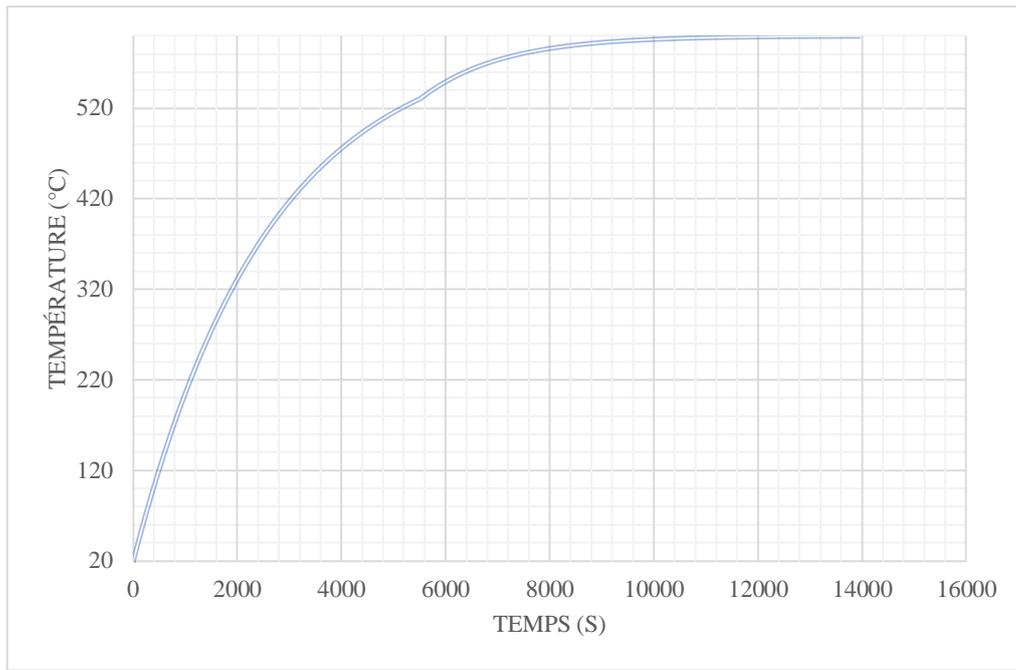


Figure V.5 : L'évolution de la température en fonction du temps pour la structure protégée par la Fendolite.

La variation de la température avec le temps dans le cas d'une structure protégée par la Fendolite est nettement plus lente que dans le premier cas grâce à la protection du matériau ignifuge. Par conséquent, pour une température d'exposition de 600°C le temps nécessaire pour l'échauffement de la structure est de **3h 10min.**

Conclusion générale

Conclusion générale :

Par opposition à la protection active contre l'incendie, destinée à secourir les victimes et à éteindre rapidement le feu, la protection passive est surtout préventive. Elle se traduit notamment par un ensemble de mesures applicables lors de la construction, et concrétisées au travers d'une réglementation bien définie. Son rôle principal est de retarder la propagation de l'incendie afin de permettre l'évacuation et laisser le temps aux secours d'intervenir sans risques d'effondrement du bâtiment.

Le complexe GP1/Z est muni d'un système de retardateur de flamme en particulier pour les structures en acier, notamment les supports des échangeurs de chaleur. Cependant, il faut que la température des structures métalliques ne dépassent pas 500°C et ne subissent pas par conséquent, de déformation dans la zone potentiellement touchée par un incendie.

Le matériau ignifuge utilisé dans le complexe GP1/Z est de type ciment portland/vermiculite, mélangé avec une portion bien définie d'eau et étalé sur la structure métallique par pulvérisation sur une épaisseur d'environ 3,4 cm. Bien que le ciment possède des propriétés isolantes, l'addition de la vermiculite diminue d'avantage sa conductivité thermique et améliore ainsi sa résistance aux hautes températures pour une durée déterminée.

La durée de protection du matériau ciment portland/vermiculite est de deux heures selon le fournisseur du produit. A cet effet une étude cinétique a été entamée pour déterminer le temps de résistance du matériau, la relation adoptée dans ce but, est une équation différentielle de la température en fonction du temps. La résolution de cette équation se fait par intégration incrémentée.

Les résultats obtenus montre clairement l'efficacité du matériau ignifuge ciment portland /vermiculite. Plus de 2H 30 min pour que la structure atteint 600°C. Cependant l'équation néglige certains facteurs bénéfiques :

Premièrement, il existe une certaine composante de transfert de chaleur par convection et rayonnement entre le feu et la surface extérieure de la protection.

Deuxièmement, les matériaux isolants plus épais et plus lourds ont une certaine capacité thermique (ils stockent la chaleur).

Troisièmement, la plupart des matériaux de protection ont une certaine teneur en humidité naturelle et une certaine quantité de chaleur est nécessaire pour vaporiser cette humidité. Cela provoque, un ralentissement dans l'élévation de température à environ 100°C.

Pour toutes ces raisons, il est recommandé de faire une autre étude comparative faisant intervenir la méthode des éléments finis pour la résolution numérique des équations aux dérivés partielles, le logiciel « CFD » ou le « ANSYS » sont les outils appropriés dans ce but.

Référence bibliographique

- [1] L. SCHOONBAERT. Fire safety engineering une solution pour le futur.
- [2] Cours de protection contre l'incendie destiné aux préventionnistes incendie,
<http://www.aresu.be/>, Helid Aresu de Seui.
- [3] So bane. Fiche 1 d'observation le triangle du feu et les principes d'extinction 2004.
- [4] thèse SEKKIOU SOUMAYA. Etude de comportement des poteaux mixte (acier-béton) compte tenu d'une exigence au feu.
- [5] L.G. Cajot, M. Haller & M. Pierre Projet DIFISEK Partie 1 : Actions thermiques et mécaniques PROFILARBED S.A, Esch/Alzette, Grand Duché du Luxembourg
- [6] Loïc Thomas Guy Archambault .sécurité incendie Collection Mémentos acier .Nouvelle édition 2005.
- [7] Euro code 1. Bases du calcul.et actions sur les structures Partie 2-2 : Actions sur les structures
—Actions sur les structures exposées au feu. Décembre 1997.
- [8] Ir Jean-François Denoël. Sécurité incendie et constructions en béton Choix du béton,
- [9] Timothy Mark Jennings .UT Fire a Preprocessor for SAFIR2007, for Analysis of Heat Transfer for Structural Members Exposed to Fire. The University of Texas at Austin
December
- [10] Mróz K, Hager K, Korniejenko K. Material solutions for passive fire protection of buildings and structures and their performances testing. Procedia Engineering 151 (2016)
284 – 291.
- [11] Kumar D, Alam A Zou P, Sanjayan G, Memon R. Comparative analysis of building insulation material properties and performance. Renewable and Sustainable Energy Reviews
131 (2020) 110038.

- [12] Abu-Jdayil B, Mourad A-H, Hittini W, Hassan M, Hameedi S. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials : an overview. *Construct Build Mater* 2019 ;214 :709–35.
- [13] Villa smil W, Fischer LJ, Worlitschek J. A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2019 ;103 :71–84
- [14] Gao H, et al. A novel inorganic thermal insulation material utilizing perlite tailings. *Energy Build* 2019 ;190 :25–33.
- [15] Asdrubali F, D'Alessandro F, Schiavoni S. A review of un conventional sustainable Building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies* 2015 ;4 :1–17.
- [16] Asdrubali F, Schiavoni S, Horoshenkov KV. A review of sustainable materials for Acoustic applications. *Build A coust* 2012 ;19(4) :283–312.
- [17] Schiavoni S, D 'Alessandro F, Bianchi F, A sdrubali F. Insulation materials for the Building sector : a review and comparative analysis. *Renew Sustain Energy Rev* 2016 ;62 :988–1011.
- [18] Zhao C, Wang P, Wang L, Liu D. Reducing railway noise with porous sound absorbing Concretes labs. *Advances in Materials Science and Engineering* 2014 : 1–11.
- [19] Zhang P, Wang K, Li Q, Wang J, Ling Y. Fabrication and engineering properties of concretes based on geo polymers/alkali-activated binders – A review. *Journal of Cleaner Production* 258 (2020) 120896.
- [20] David ovits J. Properties of geo polymer cements. In : *Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Kiev, Ukraine. 1994a.
- [21] Pnias D, Balomenos E, Sakkas K. The fire resistance of alkali-activated cement-based concrete binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, 2015 ;423–461.

- [22] Haper C. Handbook of building materials for fire protection. Mc Graw Hill. 2004.
- [23] Zybina O. Gravt M. Intumescent coatings for fire protection of building structures and materials. Spring. 2020.
- [24] R. Connolly, The Spalling of Concrete in Fires. PhD Thesis, The University of Aston in Birmingham, 1995.
- [25] C. Han, Y. Hwang, S. Yang, N. Go wri palan, Performance of spalling resistance of high performance concrete with poly propylene fiber contents and lateral confinement, Cement Concrete Res. 35 (2005) 1747–1753.
- [26] I. Hager T. Zdeb K. K rzemie, The impact of the amount of polypropylene fibres on spalling behaviour and residual mechanical properties of Reactive Powder Concrete, MATEC Web of Conferences 6 (2013).
- [27] P. Conroy, U. So rathia, Fire proof barrier system for composite structure, US5270105 A patent, 1993.
- [28] EN 1363-1 :201, Fire resistance tests – Part 1 : General Requirements, CEN, 2012.
- [29] Norme AFNOR, « NF EN 1366-8 Essai de résistance au feu des installations de service, conduits d'extraction de fumées, » 2005.
- [30] Norme AFNOR, « NF EN 1366-1 Essai de résistance au feu des installations techniques, conduits, » 2000.
- [31] Norme AFNOR, « NF EN 1363-1, Essais de résistance au feu, » 2000.
- [32] C. Langlais and S. Klarsfeld, « Isolation thermique à température ambiante. Classification des isolants, » Techniques de l'ingénieur, vol. C3370, 2004, pp. 1-12.
- [33] Norme AFNOR, « NF B12 302, plâtres à mouler pour staff, » 1982.
- [34]: Fire Resistant Design of Steel Structures-A Handbook to BS 5950 : Part 8. The Steel Construction Institute 1990.
- [35]: Technical note on fire resistant design of offshore topside structures. The Steel Construction Institute 1993.