



Efectis France

Espace technologique
L'orme des merisiers – Bâtiment Apollo
F-91913 Saint-Aubin
Tél : 33 (0)1 60 13 83 80/ Fax : 33 (0)1 60 13 70 80
www.effectis.com



LNE
Le progrès, une passion à partager
Laboratoire national de métrologie et d'essais

ZA de Trappes-Élancourt
29 avenue Roger Hennequin
F-78197 Trappes Cedex
Tél : 33 (0)1 30 69 10 00 / Fax : 33 (0)1 30 69 12 34
www.lne.fr

Service Ingénierie Incendie
Tél : +33 (0)1 60 13 83 82 / Fax : +33 (0)1 60 13 70 80
E-Mail : gildas.auguin@effectis.com

N/Réf. :
Aff. 06-070
E – ING – 07/564b– GA/AR

CEMATE - Division Comportement au Feu
Tél : +33 (0)1 30 69 12 48 / Fax : +33 (0)1 30 69 12 34
E-mail : eric.guillaume@lne.fr

N/Réf :
G100178/C672X08

Client demandeur

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE
DIRECTION DE LA PREVENTION, DE LA POLLUTION ET DES RISQUES
Service de l'environnement industriel
Bureau des risques technologiques et des industries chimiques et pétrolières

Références et date du marché

Marché 0600164 du 13 décembre 2006

PLAN DE PRÉVENTION DES RISQUES TECHNOLOGIQUES

Caractérisation et réduction de la vulnérabilité du bâti face à un phénomène dangereux technologique thermique

Date : Juillet 2008

Indice de révision : B

Nombre de pages : 189

Auteurs :

Gildas Auguin (Efectis France)

Arnaud Rabilloud (Efectis France)

Eric Guillaume (LNE)

Tableau de révision

Version	Date	Modifications
A	Novembre 2007	Version originale
B	Juillet 2008	Intégration remarques INERIS

SOMMAIRE

1	Objet.....	8
2	Les phénomènes dangereux et les effets thermiques associés.....	9
2.1	Phénomènes instantanés.....	9
2.1.1	UVCE.....	9
2.1.2	BLEVE.....	10
2.1.3	Boil Over.....	10
2.2	Phénomènes continus.....	11
2.2.1	Feu de torche.....	11
2.2.2	Feu de nappe.....	12
2.2.3	Feu de stockage de solides.....	12
2.3	Caractéristiques des phénomènes dangereux.....	13
2.4	Effets thermiques des phénomènes dangereux.....	14
2.4.1	Conséquences sur les personnes.....	14
2.4.2	Conséquences sur les matériaux.....	16
2.5	Conclusion.....	17
3	Performances des produits de construction au sens de La « Directive Produits de Construction » (DPC).....	18
3.1	Réaction au feu des matériaux de construction et d'aménagement.....	18
3.1.1	Notion et définition.....	18
3.1.2	Le système français (le classement "M").....	18
3.1.3	L'approche européenne.....	19
3.1.4	Méthodes d'essais et critères de classement.....	20
3.2	Performance des couvertures de toiture.....	21
3.2.1	Notion et définition.....	21
3.2.2	Le système français.....	21
3.2.3	L'approche européenne.....	22
3.3	Résistance au feu des produits de construction.....	22
3.3.1	Notion et définition.....	22
3.3.2	Le système français.....	22
3.3.3	L'approche européenne.....	22
3.3.4	Critères de classement.....	23
3.3.5	Méthodes d'essais.....	25
3.3.6	Modes de justification.....	25
4	Analyse des typologies de construction et de bâtiment.....	27
4.1	Réglementation de la construction en France.....	27
4.1.1	Architecture de la réglementation en France.....	27
4.1.2	Synthèse des exigences réglementaires en terme de réaction et résistance au feu de l'enveloppe externe des bâtiments.....	28
4.2	Caractérisation des typologies de construction les plus courantes.....	30
4.2.1	Éléments de la structure principale.....	30
4.2.2	Façades.....	31
4.2.3	Couverture et toiture.....	36
4.2.4	Éléments de menuiserie extérieure.....	37
4.3	Systèmes constructifs et destination du bâtiment.....	38
4.4	systèmes constructifs étudiés.....	40
5	Caractérisation de la performance des bâtis en fonction du niveau d'aléa thermique.....	43
5.1	Méthodologie.....	43
5.2	Critères retenus.....	43
5.3	Hypothèses.....	44
5.4	Caractérisation des matériaux.....	45
5.5	Caractérisation des éléments de la structure principale.....	49
5.6	Caractérisation des façades opaques lourdes.....	50
5.7	Caractérisation des façades opaques légères.....	53
5.8	Caractérisation des toitures et couvertures.....	56
5.9	Caractérisation des menuiseries extérieures.....	56
5.10	Caractérisation vis-à-vis de phénomènes instantanés.....	61
6	Propositions de protection et de renforcement du bâti vis-à-vis de l'aléa thermique.....	62
6.1	Solutions de protection et de renforcement du bâti face à un aléa technologique thermique.....	62

6.1.1	Solutions pour les structures.....	62
6.1.2	Solutions pour les façades opaques lourdes	66
6.1.3	Solutions pour les façades opaques légères	68
6.1.4	Solutions pour les couvertures de toitures et toitures	68
6.1.5	Solutions pour les menuiseries extérieures	71
6.2	Analyse des propositions vis-à-vis des phénomènes combinés	77
6.2.1	Les phénomènes combinés	77
6.2.2	Dispositions techniques particulières	82
7	Références	84
7.1	Documents réglementaires et législatifs.....	84
7.2	Documents techniques et normatifs	84
7.3	Documents scientifiques	86
ANNEXE A	Phénomènes dangereux	88
ANNEXE B	Effets thermiques sur les personnes	112
ANNEXE C	Méthodes de classement en matière de réaction au feu et performance des matériaux de construction 119	
ANNEXE D	Performances d'éléments de construction courants en matière de résistance au feu 135	
ANNEXE E	Classification des constructions par destination du bâtiment.....	138
ANNEXE F	Typologie de construction.....	154
ANNEXE G	Étude relative à la définition des seuils critiques d'effets thermiques pour les éléments de structures en acier	164
ANNEXE H	Étude relative à l'inflammation des matériaux en fonction du flux.....	174
ANNEXE I	Étude relative aux solutions d'atténuation du flux thermique.....	185

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Conditions limites de tenabilité (chaleur) pour les personnes en cas d'exposition prolongée	16
Figure 3-1 : Représentation schématique des fours conçus pour l'essai des planchers et toits (a), des murs et cloisons (b) et des poteaux structuraux (c)	25
Figure 3-2 : Courbe température-temps de l'incendie conventionnel (courbe ISO R834)	25
Figure 4-1 : Représentation schématique des relations entre les Ministères de tutelle, les Codes et les types d'ouvrages	27
Figure 4-2 : Schématisation des murs simples et composite	33
Figure 4-3 : Schématisation des murs doubles	33
Figure 4-4 : Schématisation des types de façades opaques légères	35
Figure 4-5 : Schéma des types de couvertures	36
Figure 4-6 : Schématisation d'une toiture	37
Figure 5-1 : Courbes d'inflammation des matériaux combustibles	46
Figure 5-2 : Épaisseur d'enrobage minimale pour différents temps d'exposition à des flux radiatifs dans le béton	49
Figure 5-3 : Bardage simple peau devant une façade opaque lourde (façade-rideau)	54
Figure 5-4 : Transferts radiatifs sur une surface vitrée	57
Figure 5-5 : Coefficient de transmission du verre clair et flux spectraux émis et transmis pour différentes températures de flamme issue d'un phénomène dangereux	57
Figure 6-1 : Écran thermique de réduction de flux incident	66
Figure 6-2 : Couverture isolée par l'intérieur	69
Figure 6-3 : Schéma de principe d'une sur couverture	69
Figure 6-4 : Couverture isolée par l'extérieur (sarking)	69
Figure 6-5 : Taux de transmission en fonction du spectre de longueur d'onde de produits verriers	74
Figure 6-6 : Principe de protection des aérations (entrée d'air)	76
Figure 6-7 : Flux incident sur lanterneaux zénithal	77
Figure A-1 : Spirale d'augmentation des effets d'un UVCE (Source : INERIS)	89
Figure A-2 : Longueur de flamme fonction de la puissance du feu torche (API RP 521, 1997).[84]	107
Figure B-3 : Effet du rayonnement thermique sur les personnes	113
Figure B-4 : Effet de la température sur les personnes– données US Navy	115
Figure B-5 : Effet incapacitant de la température sur les personnes	116
Figure E-6 : Article CO 6 : Isolement par rapport aux tiers	145
Figure 7-7 : Simulation 1-a (Exposition sur une face, selon l'axe faible)	164
Figure 7-8 : Simulation 1-b (Exposition sur 4 faces)	164

Figure G-9 : Exposition de l'axe fort	164
Figure G-10 : Exposition du parement acier	165
Figure G-11 : Exposition du bardage double peau laine de roche	165
Figure G-12 : Simulation 1 - Température maximale d'un profilé HEA 200 non protégé, exposé à un flux stationnaire de 16 kW/m ²	166
Figure G-13 : Simulation 1-a Échauffement d'un profilé HEA 200 non protégé, exposé sur 3 faces à un flux stationnaire de 16 kW/m ²	167
Figure G-14 : Simulation 1-b Échauffement d'un profilé HEA 200 non protégé exposé, sur 4 faces à un flux stationnaire de 16 kW/m ²	167
Figure G-15 : Simulation 2 - échauffement d'un profilé HEA 200 non protégé, exposé sur 1 faces (axe fort) à un flux stationnaire de 16 kW/m ²	167
Figure G-16 : Simulation 2 - Échauffement d'un profilé HEA 200 exposé sur 1 face (axe fort) à un flux stationnaire de 16 kW/m ²	168
Figure G-17 : Simulations 1, 3 et 4 : Température maximale d'un profilé HEA 200 protégé, exposé à un flux stationnaire de 16 kW/m ²	169
Figure G-18 : Simulation 3 -Échauffement d'un profilé HEA 200 protégé par un parement acier (16 kW/m ²)	169
Figure G-19 : Simulation 4-a Échauffement d'un profilé HEA 200 protégé par 40 mm de laine de roche (16 kW/m ²)	169
Figure G-20 : Simulation 4-b Echauffement d'un profilé HEA 200 protégé par 80 mm de laine de roche (16 kW/m ²)	170
Figure G-21 : Simulation 1b - Température maximale d'un profilé HEA 200 exposé sur les 4 faces à un flux stationnaire variant de 16 à 25 kW/m ²	171
Figure G-22 : Température maximale de la semelle d'un profilé HEA 200 protégé par un simple parement acier exposé à un flux stationnaire variant de 16 kW/m ² à 50 kW/m ² .	171
Figure G-23 : Simulation 4a - Température maximale de la semelle d'un profilé HEA 200 protégé par un bardage double peau (40 mm de laine de roche) exposé à un flux stationnaire variant entre 16 kW/m ² à 150 kW/m ²	172
Figure G-24 : Simulation 4a - Température maximale de la semelle d'un profilé HEA 200 protégé par un bardage double peau (80 mm de laine de roche) exposé à un flux stationnaire variant entre 16 kW/m ² à 50 kW/m ²	172

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Synthèse des caractéristiques des phénomènes dangereux susceptibles de conduire à un aléa thermique	13
Tableau 2-2 : Émittances moyennes de certains liquides inflammables	13
Tableau 2-3 : Conditions limites lors d'une exposition de la peau aux flux radiatifs	14
Tableau 2-4 : Valeurs seuils des doses thermiques	15
Tableau 3-1 : Classement M en matière de réaction au feu	18
Tableau 3-2 : Correspondance entre le classement M et les Euroclasses	20
Tableau 3-3 : Méthodes d'essais harmonisées pour la définition des Euroclasses	20
Tableau 3-4 : critères de résistance au feu, définis dans l'arrêté du 22 mars 2004	24
Tableau 3-5 : Équivalences aux notations françaises	24
Tableau 4-1 : Exigences réglementaires incendie pour les ERP	28
Tableau 4-2 : Exigences réglementaires incendie pour les bâtiments d'habitations	28
Tableau 4-3 : Exigences réglementaires incendie pour les IGH	28
Tableau 4-4 : Exigences réglementaires incendie pour les établissements industriels	29
Tableau 4-5 : Découpage des constructions par partie d'ouvrages	30
Tableau 4-6 : Épaisseurs les plus courantes et maximales des façades opaques lourdes et de leur doublage isolant en fonction de la nature du matériau	34
Tableau 4-7 : Épaisseurs des façades opaques légères et isolants associés	36
Tableau 4-8 : Dimensions de vitrage les plus courantes	38
Tableau 4-9 : Synthèse des typologies de constructions les plus courantes pour l'habitation	39
Tableau 4-10 : Synthèse des typologies de constructions les plus courantes pour les établissements recevant du public et les constructions industrielles	40
Tableau 4-11 : Systèmes constructifs étudiés pour les façades opaques lourdes	41
Tableau 4-12 : Systèmes constructifs étudiés pour les façades opaques légères	41
Tableau 4-13 : Systèmes constructifs étudiés pour les couvertures/toitures	42
Tableau 4-14 : Systèmes constructifs étudiés pour les menuiseries extérieures	42
Tableau 5-1 : Coefficients considérés pour les transferts thermiques	45

Tableau 5-2 : Caractéristiques des courbes d'inflammation en fonction de la famille du combustible (CHF : flux critique d'inflammation, TRP : Température de réponse)	46
Tableau 5-3 : Température et flux de dégradation mécanique et d'inflammation des familles de matériaux combustibles	48
Tableau 5-4 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour une façade opaque en pierre naturelle	50
Tableau 5-5 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour une façade opaque en briques pleines ou perforées	51
Tableau 5-6 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour une façade opaque en briques creuses	51
Tableau 5-7 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour une façade opaque en bloc de terre cuite	51
Tableau 5-8 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour une façade opaque en béton banché ou bloc de béton plein et perforés.	52
Tableau 5-9 : Flux radiatif incident maximal pour le critère de température de 60°C pour une façade opaque en bloc de béton creux.	52
Tableau 5-10 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour une façade opaque en bloc de béton cellulaire	52
Tableau 5-11 : Délai minimum d'atteinte d'un critère pour les épaisseurs les plus courantes	53
Tableau 5-12 : Température et flux pour un bardage simple peau	54
Tableau 5-13 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour les murs de bardage bois (feuillus et résineux) avec doublage isolant	55
Tableau 5-14 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour les bardages double peau en fonction de la nature de l'âme isolante et de son épaisseur	55
Tableau 5-15 : Performance d'une couverture en charpente bois en fonction de la nature de l'isolant (NA : critères non atteints, A : critères atteints)	56
Tableau 5-16 : Caractéristiques en face non exposée à l'aléa thermique en fonction du flux incident (ou dose thermique incidente) et du type de vitrage.	58
Tableau 5-17 : Seuil critique d'effets thermiques pour les éléments verriers [76]	59
Tableau 5-18 : Performance des différents types de vitrage en fonction du flux incident (A : acquise ; NA : non acquise)	59
Tableau 5-19 : Flux radiatif incident maximal pour des portes en bois	60
Tableau 6-1 : Configuration de bardage double et simple peau en tant qu'écran thermique	67
Tableau 6-2 : Avantages et limites des solutions proposées pour le renforcement des façades opaques lourdes	68
Tableau 6-3 : Avantages et limites des solutions proposées pour le renforcement des couvertures de toitures	70
Tableau 6-4 : Avantages et limites des solutions proposées pour le renforcement des couvertures de toitures	71
Tableau 6-5 : Avantages et limites des solutions proposées pour le renforcement des châssis vitrés mobiles ou fixes	76
Tableau 7-1 : <i>Résultats d'essais effectués sur des réservoirs de propane</i>	94
Tableau 7-2 : Cinétique post-accidentelle des phénomènes dangereux (source INERIS)	110
Tableau 7-3 : Dynamique post-accidentelle des phénomènes dangereux (source INERIS)	111
Tableau 7-4 : Effets du flux thermique radiatif	112
Tableau 7-5 : Effets de la température sur les personnes – données US Navy	114
Tableau 7-6 : Effets du flux thermique radiatif sur les biens selon l'arrêté du 29 sept. 2005	117
Tableau 7-7 : Effets du flux thermique radiatif sur les personnes selon l'arrêté du 29 sept. 2005	117
Tableau 7-8 : Méthodes d'essais harmonisés	119
Tableau 7-9 : Essais à effectuer et critères pour le classement des produits à l'exception des sols.	124
Tableau 7-10 : Essais à effectuer et critères pour le classement des produits de revêtement de sols.	125
Tableau 7-11 : Référence des principaux textes en vigueur par types d'ouvrages	138
Tableau 7-12 : Article CO 12 : Résistance au feu des structures et planchers.	145
Tableau 7-13 : Article CO 16 : Protection de la couverture par rapport à un feu extérieur.	146
Tableau 7-14 : Article CO 24 : Caractéristiques des parois verticales et des portes.	147
Tableau 7-15 : conductivité thermique de la laine de roche (100 kg/m ³) en fonction de la température	165
Tableau 7-16 : Chaleur spécifique de la laine de roche (100 kg/m ³) en fonction de la température	165
Tableau 7-17 : Conditions aux limites utilisées pour un feu extérieur où la cible est située en dehors des flammes (faibles échanges convectifs)	166

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photo 2-1 : photographies représentant des phénomènes dangereux instantanés	9
Photo 2-2 : Photographies représentant des phénomènes dangereux continus	11
Photo A-1 : L'explosion d'une nappe de vapeurs inflammables suivie d'un important incendie dans un dépôt d'hydrocarbures (source : http://aria.ecologie.gouv.fr/barpi)	88
Photo A-2 : <i>Boil-over</i> à port <i>Edouard Herriot (Rhône)</i> le 2 juin 1987	97
Photo A-3 : entrepôt d'archives de la société INTRADIS à ROYE (80) a brûlé le 28 janvier 2002 [Source : http://www.drire.gouv.fr/picardie]	108

1 OBJET

Le présent document constitue en l'étude de la caractérisation et la réduction de la vulnérabilité du bâti face à un aléa technologique thermique, sur lequel s'appuiera le guide de prescriptions techniques de renforcement du bâti qui seront retenues dans le règlement du plan de prévention des risques technologiques (PPRT), ou qui seront imposées par les services de secours.

Cette étude a été réalisée conjointement par Efectis France¹ laboratoire agréé en résistance au feu par le Ministère de l'Intérieur et le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais² (LNE) agréé en réaction au feu par le Ministère de l'Intérieur.

Elle s'articule autour de différentes parties :

- Dans la première partie, une caractérisation des phénomènes dangereux et des conséquences sur les personnes et les matériaux est effectuée afin de dégager les paramètres importants pour l'étude ;
- On décrit dans une deuxième partie les critères de performances en matière de réaction au feu et de résistance au feu des matériaux et éléments de construction au sens de la DPC ;
- La description des systèmes constructifs les plus courants est faite dans une troisième partie ;
- Dans la quatrième partie, la caractérisation de la performance de ces systèmes constructifs en terme de mise en sécurité des personnes est réalisée ;
- Des propositions de renforcement et protection de ces systèmes constructifs pour les aléas thermiques sont indiquées en dernière partie ;

¹ www.effectis.com/fr

² www.lne.fr

2 LES PHÉNOMÈNES DANGEREUX ET LES EFFETS THERMIQUES ASSOCIÉS

Ce point présente une synthèse des différents phénomènes dangereux susceptibles de conduire à des effets thermiques, ainsi que leurs impacts potentiels sur les bâtis.

Une description plus détaillée est fournie en annexe du présent guide (ANNEXE A) où pour chaque type de phénomènes dangereux, sont caractérisés l'intensité du phénomène, la cinétique de développement, la durée du phénomène, les conditions initiales, les phénomènes combinés, l'impact sur le bâti.

Toutes ces informations sont des synthèses de documents déjà produits, notamment par l'Ineris (réf. [80] à [85]), et vers lesquels le lecteur devra se reporter pour plus de précision et de détails.

L'aléa technologique thermique peut être classé en deux grandes familles selon la durée des phénomènes :

- Les phénomènes instantanés, dont la durée est au maximum de quelques secondes ;
- Les phénomènes continus, dont la durée peut varier de quelques minutes à plusieurs heures, voire jours.

2.1 PHÉNOMÈNES INSTANTANÉS

Les phénomènes dangereux susceptibles de produire d'importants effets thermiques et dont la durée est considérée comme instantanée sont les suivants :

- UVCE (Unconfined Vapour cloud Explosion) ;
- BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) ;
- Boil Over.



UVCE
(BARPI)



BLEVE
Crescent City (1970)



BOIL OVER
Port Edouard Herriot (juin 1987)

Photo 2-1 : photographies représentant des phénomènes dangereux instantanés

2.1.1 UVCE

Description du phénomène :

Suite à une fuite de gaz combustible dans un environnement non confiné, un nuage formé d'un mélange d'air et de gaz combustible se forme. Lorsque ce mélange atteint les critères d'explosibilité (teneurs en combustible et en oxygène comprises dans le domaine d'inflammabilité) et rencontre une source d'allumage, il explose. Un front de flamme se propage associé à l'expansion des gaz brûlés qui agissent sur les gaz frais environnant à la manière d'un piston pouvant donner lieu à une onde de pression aérienne (déflagration).

Origines :

- Fuite d'un gaz combustible liquéfié ;
- Évaporation d'une flaque de liquide inflammable.

Une très faible énergie suffit pour initier l'explosion. Par ailleurs, l'allumage peut être différé dans le temps et par conséquent se produire à une certaine distance du lieu de la fuite.

Un UVCE génère plusieurs effets :

- Une boule de feu qui consume ou endommage ce qui se trouve à l'intérieur ;
- Un rayonnement thermique sur le voisinage immédiat de la boule de feu ;
- Des effets de pression plus ou moins importants suivant l'encombrement du lieu de l'accident.

Les conséquences de l'UVCE dépendent de :

- La masse de gaz combustible concerné, c'est à dire du volume du nuage ;
- La composition du nuage de gaz ;
- L'encombrement de l'espace.

De manière générale, l'effet thermique d'un UVCE sur les structures se limite à des dégâts superficiels (déformation des plastiques, décollement des peintures, ...), et, éventuellement, à une fragilisation possible de certaines structures métalliques légères. En revanche, l'UVCE peut être initiateur d'un incendie, ou être suivi d'un feu-torche, dont les effets thermiques sont à redouter.

2.1.2 BLEVE**Description du phénomène :**

Un BLEVE correspond à la libération brutale d'une masse de gaz liquéfié en état d'ébullition sous pression, suite à l'éclatement ou la perforation d'une enveloppe de stockage suivi d'une inflammation générale immédiate. Il s'agit d'une explosion dont les effets dominants sont les effets de rayonnement thermique plus que de surpression.

Origines :

- Corrosion ;
- Dommages ou fatigues mécaniques ;
- Hautes températures (incendie).

Un BLEVE génère plusieurs effets :

- Une boule de feu : qui consume ou endommage ce qui se trouve à l'intérieur ;
- Un rayonnement thermique sur le voisinage immédiat de la boule de feu. Ainsi les émittances de ce front de flamme peuvent atteindre des valeurs de plusieurs centaines de kW/m^2 ;
- Une Onde de pression choc (détonation) : Le BLEVE est une explosion, il va donc générer une onde de choc (détonation), un important déplacement d'air qui va affecter l'environnement proche du réservoir ;
- Projection de débris : Des débris sont propulsés majoritairement vers les extrémités du réservoir. Cette projection est donc imprévisible et peu parfois atteindre des proportions énormes, à plus d'un kilomètre de diamètre de la source.

2.1.3 Boil Over**Description du phénomène :**

Un Boil Over est un phénomène de moussage de grande ampleur impliquant des réservoirs aériens et résultant de la vaporisation d'eau liquide contenue dans des réservoirs atmosphériques

d'hydrocarbures en feu. Ce phénomène est à l'origine de violentes projections de liquide enflammé et de la formation d'une boule de feu.

Origines :

- Présence d'eau dans le réservoir (teneur en eau de l'hydrocarbure, pénétration de l'eau de pluie au travers des événements, condensation sur les parois internes, introduction d'eaux d'extinction)
- Incendie prolongé en partie supérieure ;
- Propagation d'une onde de chaleur ;
- Vaporisation de l'eau (1 m³ d'eau ~ 1600 à 2000 m³ de vapeur).

Un Boil Over génère plusieurs effets :

- Une explosion (rupture de la capacité) ;
- Une éjection de liquide en émulsion et en feu. (extension de l'incendie) ;
- Une boule de feu avec ses retombées (effets thermiques).

2.2 PHÉNOMÈNES CONTINUS

Contrairement aux phénomènes décrits ci-dessus, certains phénomènes sont caractérisés par une durée pouvant aller de quelques minutes à quelques heures, voire plusieurs jours dans certains cas :

- Feu torche ;
- Feu de nappe ;
- Feu de matériaux solide (stockage en entrepôt ou externe).



Feu de torche



Feu de nappe



Feu de matériaux solides

Photo 2-2 : Photographies représentant des phénomènes dangereux continus

2.2.1 Feu de torche

Description du phénomène :

Dans l'environnement industriel, les feux de torche appelés également feux chalumeau peuvent survenir suite à des fuites accidentelles de fluides inflammables ou à des évacuations intentionnelles de sous-produits par l'intermédiaire de torchères.

Origines :

Le phénomène de feu de torche a pour origine un rejet de fluides combustibles, généralement à l'état gazeux, qui s'enflamme :

- Spontanément si sa température est suffisamment élevée ;
- En raison de points chauds ;
- Par démarrage d'un véhicule situé à proximité (étincelle) ;

- Par action de la foudre.

Afin de se prémunir de tels évènements, il est important de pouvoir prévoir et évaluer les conséquences associées aux feux torche. Pour ce faire, il est notamment nécessaire d'estimer les caractéristiques géométriques de la flamme et de déterminer le flux radiatif émis par la flamme pouvant aller jusqu'à 300 kW/m².

Les conséquences d'un feu torche :

Parmi les conséquences les plus critiques, il convient de citer des pertes humaines (ouvriers, conducteurs de camions...) et matérielles (effets dominos) pouvant entraîner également une perte de production, et plus grave une propagation à d'autres installations.

Par ailleurs, quelques éléments observés donnent une idée qualitative des conséquences des feux torche :

- Les débits de fuite qui représentent des quantités importantes de combustibles rejetés (toxicité) ;
- L'orientation de la flamme qui peut avoir une influence déterminante sur l'occurrence d'effets dominos (thermique) ;
- Les hauteurs de flamme de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres (thermique) ;

2.2.2 Feu de nappe

Description du phénomène :

Le feu de nappe résulte de la présence simultanée d'une nappe de liquide inflammable portée à une température supérieure à son point éclair et d'un point chaud (étincelle, flamme nue, métal incandescent, etc.).

Origines :

La nappe de liquide inflammable résulte fréquemment d'une fuite, plus ou moins importante. Il est à noter que le point chaud, s'il est maintenu suffisamment longtemps, peut initier l'incendie d'un liquide dont la température est inférieure au point éclair : le point chaud en lui-même peut porter localement le liquide à une température supérieure à son point éclair, démarrer l'incendie qui se généralise ensuite à toute la nappe.

Les conséquences d'un feu de nappe :

L'impact d'un feu de nappe dépend de la taille de la surface en feu, du produit qui se consume et de la durée de l'incendie.

De manière générale, les principales conséquences observées de manière récurrente sont la pollution des eaux de surface ainsi que la contamination des sols, voire des eaux souterraines, plus rarement, des blessés ou des morts. Les effets thermiques observés dépendront de la taille de la nappe ainsi que du combustible.

2.2.3 Feu de stockage de solides

Description du phénomène :

Les feux de solide ont généralement la particularité de commencer à l'intérieur d'un bâtiment, en milieu relativement confiné avec une toiture et des murs, excepté pour les stockages extérieurs. Les effets sont donc dans un premier temps limités au bâtiment (voire compartiment) d'origine. Ensuite, au fur et à mesure que l'incendie se développe, se propage puis se généralise dans l'entrepôt, les effets de l'incendie d'entrepôt sont perceptibles à l'extérieur du bâtiment. Leur effet est alors similaire à celui d'un feu extérieur (tel que stockage de palettes ou de pneus)

Origines :

Les origines des feux d'entrepôts sont les suivantes :

- Étincelle, défaut électrique ;
- Point chaud ;
- Malveillance ;
- Foudre.

Les conséquences d'un feu d'entrepôt :

Les effets d'un incendie d'entrepôt sur l'environnement sont d'ordre thermique (dû aux flammes) et d'ordre toxique (dû aux fumées). Des problèmes de visibilité gênant pour la circulation et l'acheminement des secours peuvent aussi avoir lieu. Aucun effet direct de pression n'est lié au feu d'entrepôt.

2.3 CARACTÉRISTIQUES DES PHÉNOMÈNES DANGEREUX

Le tableau suivant récapitule les caractéristiques des phénomènes présentés ci-dessus :

Phénomène dangereux	Délai d'occurrence	Durée de montée en puissance jusqu'à son état stationnaire	Effets recherchés (Pression, THermique, TOXique, Missile)	Émissivité de la source (ordre de grandeur)
UVCE	Plusieurs secondes à 2 - 3 minutes (formation du nuage à la LIE)	Quelques millisecondes (inflammation du nuage)	P, TH	150 kW/m ² à 300 kW/m ²
BLEVE "chaud"	immédiat dès la rupture de la citerne	Plusieurs secondes (expansion de la boule de feu et combustion de la boule de feu)	TH, P, M	180 kW/m ² à 350 kW/m ²
BOIL-OVER	immédiat dès que l'eau s'évapore	Plusieurs secondes (expansion de la boule de feu et combustion de la boule de feu)	TH, TOX	100 kW/m ² à 150 kW/m ²
Feu de Torche	immédiat dès l'inflammation du produit	Plusieurs minutes à heures	TH, TOX	150 kW/m ² à 300 kW/m ²
Feu de nappe	immédiat dès l'inflammation du produit	Plusieurs minutes à heures	TH, TOX	25 à 200 kW/m ² Note 1*
Incendie de solides	immédiat dès l'inflammation du produit	Plusieurs minutes à heures	TH, TOX	30 kW/m ² à 100 kW/m ²

Tableau 2-1 : Synthèse des caractéristiques des phénomènes dangereux susceptibles de conduire à un aléa thermique

(Note 1*) : Voir tableau ci-dessous pour l'émittance moyenne en fonction des combustibles. Il est à noter également que l'émissivité varie également en fonction du diamètre du foyer et que les valeurs ci-dessous n'incluent pas des valeurs pour des foyers de diamètre inférieurs à 3m.

Combustible	Émittances moyenne (kW/m ²)
GNL	120 à 160
GPL	50 à 80
Kérosène	35 à 130
Pétrole brut	25 à 60

Tableau 2-2 : Émittances moyennes de certains liquides inflammables

2.4 EFFETS THERMIQUES DES PHÉNOMÈNES DANGEREUX

Ce paragraphe consiste à réaliser une synthèse des effets thermiques sur les personnes, les matériaux et les éléments de construction.

2.4.1 Conséquences sur les personnes

Les effets thermiques du feu sur les personnes¹ ont trois principales origines :

- Un débordement de la thermorégulation qui engendre une élévation de la température corporelle. Comme la fièvre, cette élévation engendre des maux de tête et peut entraîner la mort au-dessus de 42 °C. L'évacuation de la chaleur par thermorégulation étant basée sur le principe de l'évaporation de la sueur, l'humidité ambiante est primordiale ;
- Une atteinte des voies respiratoires, caractérisée par un dessèchement ou des brûlures à différents niveaux : gorge, trachée et bronches, alvéoles pulmonaires ;
- Un effet direct sur la peau qui peut être d'origine radiative (flux radiatif incident), ou conductive.

Ces atteintes peuvent être caractérisées par deux grandeurs : le flux thermique incident et la température ambiante. Ces grandeurs peuvent correspondre à deux niveaux de sollicitation :

- Le niveau de sollicitation thermique suffisant pour brûler la peau et les poumons. Il est comparable à un effet suraigu, c'est à dire aux expositions uniques fortes, mais de courte durée ;
- L'exposition pour laquelle l'hyperthermie est suffisante pour causer une dégradation des capacités mentales, diminuant la capacité d'évacuation et de survie. Ce niveau est comparable à un effet subaigu, c'est à dire à une exposition unique moyenne, mais prolongée.

L'effet thermique peut résulter de trois modes de transmission :

- Convective, chaleur transmise par circulation d'air chaud par exemple ;
- Radiative, chaleur transmise par rayonnement ;
- Conductive, chaleur transmise par contact.

2.4.1.1 Effets du flux thermique radiatif

Selon la norme ISO/TS 13571 [17], la limite d'exposition de la peau à l'éclairement est approximativement de 2,5 kW/m². La norme mentionne qu'au-dessous de ce niveau de flux de chaleur radiative incident, l'exposition peut être tolérée pendant 30 minutes ou plus longtemps sans affecter la mobilité et donc l'évacuation des personnes. Au-dessus de cette valeur seuil, le temps disponible avant la brûlure de la peau due à l'éclairement diminue rapidement selon l'équation suivante :

$$t_{\text{Irad}} = 4q^{-1.35}$$

Avec

- t_{Irad} : temps en minutes ;
- q : éclairement énergétique en kW/m².

On indique dans le Tableau 2-1, les valeurs limites de flux radiatifs pour différents temps d'exposition avant brûlures :

Flux radiatifs reçus	Temps d'exposition limite
≤ 2,4 kW/m ²	supérieur à une demi-heure
2,5 kW/m ²	de l'ordre de la minute
10 kW/m ²	quelques secondes

Tableau 2-3 : Conditions limites lors d'une exposition de la peau aux flux radiatifs

¹ Un état de l'art des effets thermiques sur les personnes est fourni en annexe du présent rapport (Cf. ANNEXE B).

Comme pour les gaz toxiques, un occupant exposé à un flux thermique peut être amené à accumuler une dose de chaleur radiative sur une certaine période de temps. Il est constaté que pour un effet constant, le flux thermique et temps se trouvent liés par une relation du type :

$$\phi^n \cdot t = C^{\text{ste}}$$

Dans une représentation $\log(\Phi)=\text{Log}(t)$, les droites $\phi^n \cdot t = C^{\text{ste}}$ tendent vers une asymptote parallèle à l'axe des abscisses (un flux très faible, même pendant un temps infini n'est pas dangereux). Pour des expositions qui perdurent, les seuils d'effets, en termes de flux thermique, ne dépendent pratiquement plus du temps. On se réfère alors aux seuils des effets thermiques de 2,5 kW/m² pour les brûlures.

Lors d'un phénomène dangereux transitoire, il est évidemment nécessaire d'intégrer les flux thermiques pour chaque pas de temps, soit :

$$D = \int_{t_0}^{t_1} \phi^{4/3} dt$$

Les seuils d'effets de la dose reçue par une personne varient bien évidemment selon son âge ainsi qu'en fonction de son état de santé ou de ses facultés d'accoutumance.

L'arrêté du 29 septembre 2005, relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation [16], retient les valeurs suivantes :

Dose thermique([kW/m ²] ^{4/3} .s)	Effets sur les personnes
600	irréversibles
1 000	létaux
1 800	Létaux significatif

Tableau 2-4 : Valeurs seuils des doses thermiques

2.4.1.2 Effets de la chaleur convective

L'exposition d'une personne à un flux de chaleur convectif intense peut provoquer les phénomènes suivants :

- Le coup de chaleur (hyperthermie) ;
- La douleur et les brûlures de la peau ;
- La douleur et les brûlures de la région respiratoire ;

Les brûlures thermiques de la région respiratoire par l'air contenant moins de 10% de vapeur d'eau par volume ne se produisent pas en l'absence des brûlures faciales de la peau. Par conséquent, les limites de tenabilité en ce qui concerne la douleur ou les brûlures de la peau sont normalement inférieures à celles considérées pour les brûlures thermiques de la région respiratoire. Cependant, dans une atmosphère saturée en vapeur d'eau, les brûlures thermiques de la région respiratoire peuvent se produire sur l'inhalation de l'air au-dessus de 60°C.

Pour des expositions jusqu'à deux heures, de la peau à un flux de chaleur convectif, dont l'air contient moins de 10% de vapeur d'eau par volume, le temps (minimum) menant à une incapacité est calculé à partir de l'équation ci-dessous :

Avec

- t_{conv} : temps en minutes ;
- T : température en °C.

La Figure 2-1 suivante résume les limites de tenabilité aux effets de flux convectifs et radiatifs en fonction du temps d'exposition.

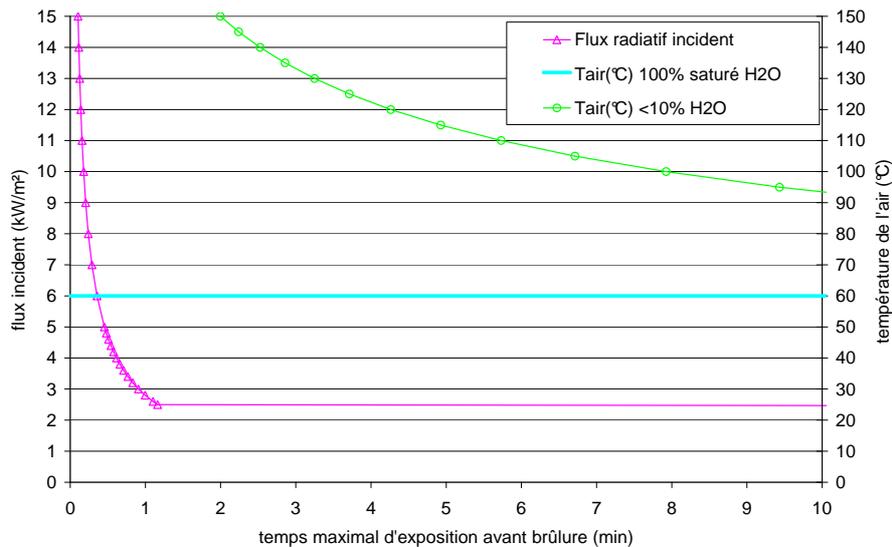


Figure 2-1 : Conditions limites de tenabilité (chaleur) pour les personnes en cas d'exposition prolongée

Concernant la peau non protégée, une température de l'air supérieure à 120°C peut engendrer rapidement (quelques minutes) des douleurs graves. En dessous de cette température, et en fonction de la durée d'exposition, des troubles liés à une hyperthermie peuvent apparaître.

2.4.1.3 Effet du transfert de chaleur par conduction

Le phénomène de conduction est physiologiquement important seulement lorsque la peau est en contact direct avec les surfaces chaudes (poignées de porte, etc.). Un contact d'une seconde avec le métal à 60°C peut causer des brûlures.

2.4.2 Conséquences sur les matériaux

Ce paragraphe consiste à réaliser une synthèse des effets thermiques sur les matériaux et les éléments de construction.

2.4.2.1 Effets du flux thermique radiatif

Le flux thermique incident, de nature radiative, conduit à l'échauffement du matériau. Lors de celui-ci, trois seuils peuvent être mis en évidence :

- ❑ Premièrement, au-delà d'une certaine température, les propriétés mécaniques du produit considéré peuvent chuter. Par exemple, les thermoplastiques se ramollissent, comme les PVC dès 75°C ;
- ❑ Ensuite, au fur et à mesure que la température s'élève, le matériau commence à se dégrader et à produire différentes espèces. Ce point est détaillé dans le paragraphe relatif aux effets combinés thermique / toxique ;
- ❑ A un certain niveau, le matériau s'enflamme. Le feed-back radiatif et convectif de la flamme vers le matériau permet alors de maintenir l'inflammation.

2.4.2.2 Effet du transfert de chaleur par conduction

D'une manière identique à l'effet de l'éclairement énergétique qui conduit à échauffer la surface du matériau exposé et de surcroît à une éventuelle inflammation, une élévation de température d'un matériau due à l'effet indirect de l'éclairement énergétique, principalement par transfert conductif, peut conduire à une dégradation des matériaux.

Cette dégradation peut se présenter sous la forme de :

- Fusion du matériau pouvant conduire à le mettre en contact avec une surface chaude et donc à une inflammation ;
- Carbonisation ou pyrolyse du matériau pouvant conduire à une propagation des gaz inflammables émis vers une surface chaude ;
- Perte de résistance et ainsi chute de matériau ou de structure ;
- Émission de produits toxiques.

Les valeurs limites d'élévation de température pouvant engendrer une dégradation dépendant de chaque matériau.

2.5 CONCLUSION

La description de la phénoménologie des phénomènes dangereux et des effets qui leur sont associés a mis en évidence les critères importants à retenir pour la caractérisation de la vulnérabilité. La cinétique du phénomène doit lui aussi être pris en compte.

Dans le cadre des PPRT, il convient de considérer que chacun des phénomènes décrits dans cette section peut en générer un ou plusieurs autres. En particulier, des phénomènes générant une surpression ou une projection de missiles peuvent entraîner des fuites, déformations ou destructions nécessaires à un autre phénomène. De même, tout incendie ou flux thermique peut fournir l'énergie nécessaire à l'activation d'un autre phénomène dangereux susceptible de conduire à des effets thermiques durant plusieurs heures, voir plusieurs jours comme le récent incendie de la raffinerie de Buncefield, près de Londres.

Par conséquent, il apparaît indispensable de considérer pour le cas de phénomènes dangereux continus :

- d'une part, un aléa thermique limité dans le temps imposant une mise en protection du bâtiment pour une certaine durée ;
- et d'autre part un aléa thermique susceptible de durer plusieurs jours pour une mise en protection permanente du bâtiment.

Le cas des phénomènes instantanés où l'impact est plus intense mais de très courte durée, sera traité à partir d'une analyse de la durée d'atteinte des critères définis pour la caractérisation du bâti dans le cas de phénomènes continus.

3 PERFORMANCES DES PRODUITS DE CONSTRUCTION AU SENS DE LA « DIRECTIVE PRODUITS DE CONSTRUCTION » (DPC)

Ce chapitre s'attache à décrire les notions de réaction au feu et de résistance au feu des matériaux et éléments de construction au sens de la DPC. Cela comprend notamment, la présentation des méthodes d'essais et critères de performance retenus pour le classement des matériaux et éléments de construction.

Une revue exhaustive des performances des matériaux et des produits de construction en matière de réaction et résistance au feu est annexée. Cette liste inclut l'intégralité des produits ou systèmes sous couvert de la directive « Produits de Construction », complétée par les bases de données internes dont le LNE dispose sur les produits d'aménagement, d'ameublement et de décoration.

3.1 RÉACTION AU FEU DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION ET D'AMÉNAGEMENT

3.1.1 Notion et définition

La réaction au feu est un mode d'évaluation conventionnel du pouvoir contributif d'un matériau lors du développement d'un incendie. Cette évaluation passe par la détermination de la propension d'un produit ou d'un matériau à s'enflammer et à brûler avec plus au moins de vigueur, de propagation de surface et de durée de combustion. On exprime cette caractéristique par l'usage de critère ou d'indices hiérarchisés représentatifs du niveau de performance du produit ou du matériau soumis à un essai conventionnel.

3.1.2 Le système français (le classement "M")

Au niveau national et jusqu'en 2002, le système de hiérarchisation de performance utilisé, en particulier pour les établissements recevant du public, donnait lieu à une classification dite "classement M" davantage orienté matière que matériau et produit. Cette détermination obtenue par l'usage de matériels d'essais basés sur le rayonnement d'une source IR peut s'exprimer en six niveaux de classement :

Classement	Intitulé	Description
M0	Non combustible	Élément considéré comme ne participant pas au développement du feu
M1	Non inflammable	Élément ne participant que très peu au développement du feu dans la mesure où leur combustion se déroule généralement sans flamme de surface ou avec une flamme localisée.
M2	Peu inflammable	Élément participant modérément au développement du feu dans la mesure où leur combustion cesse dès la suppression de la source principale du foyer
M3	Moyennement inflammable	La combustion d'un tel élément le rend notablement participatif car elle se poursuit longuement après la disparition de la source principale du foyer avec le risque de communiquer le feu à l'environnement sensible. A noter que lorsqu'il est isolé, l'extinction de cet élément se produit avant sa destruction complète.
M4	Facilement inflammable	Élément dont la combustion se poursuit jusqu'à la destruction complète, fortement participatif il peut constituer le foyer principal ou se substituer à lui et propager le feu à distance.
-	Non classé	Élément n'ayant pas subi d'essai de réaction au feu ou situé hors des catégories précédentes.

Tableau 3-1 : Classement M en matière de réaction au feu

Remarque : les produits d'aménagement d'ameublement et de décoration sont une partie intégrante du système antérieur à 2002 présenté ci-dessus. Pour ceux-ci, le classement M s'applique toujours sous certaines conditions et en fonction des applications.

3.1.3 L'approche européenne

Dans le système européen, pour qu'un produit de construction puisse circuler et être distribué librement, il est nécessaire qu'il présente des caractéristiques lui permettant de répondre aux six exigences essentielles de la directive "Produits de la construction" lors de sa mise en œuvre dans les ouvrages

Cette directive couvre les produits et éléments suivants :

- Produits de murs et de plafonds y compris les produits de finition ;
- Éléments de construction ;
- Produits intégrés aux éléments de construction ;
- Produits de façade et de murs extérieurs, incluant les couches isolantes ;
- Systèmes de revêtement de sol.

Une dizaine d'année a été nécessaire à la mise en place du système européen de réaction au feu désigné sous l'appellation "Euroclasse". La décision 2000/147/CE de février 2000 [4] classe les produits ou familles de produits en sept classes de réaction au feu de A à F. Un indice "ff" (pour "floor") est ajouté quand il s'agit de revêtement de sol. Deux autres classements supplémentaires permettent de définir la production de fumée et la production de gouttelettes ou de particules enflammées.

Classement « s » pour la production de fumées

- s1 dégagement de fumées limité ;
- s2 dégagement de fumées limité ;
- s3 matériau ne répondant ni aux critères s1 ni au critère s2.

Classement « d » pour la production de gouttelettes (particules enflammées)

- d0 pas de gouttelette ;
- d1 dégagement de gouttelettes persistant pendant au plus 10 s ;
- d2 matériau ne répondant ni au critère d0 ni au critère d1.

Le Tableau 3-1 présente la transposition des Euroclasses (A1 à D) vers les classements M. Attention les correspondances présentées dans le tableau ne signifient pas performances égales (les critères et les essais sont différents). L'équivalence est reprise dans l'arrêté du 21 novembre 2002 [13].

Classes selon NF EN 13501-1					Exigences
Produits de construction hors revêtements de sol			Produits de revêtements de sol		
A1	-	-	A1 fl	-	Incombustible
A2	s1	d0	A2 fl	s1	M0
A2	s1	d1 (a)			M1
A2	s1 s2	d0 d1 (a)			
B	s1 s2 s3	d0 d1 (a)			
C	s1 (b) (c) s2 (c) s3 (c)	d0 d1 (a)			
D	s1 (b) s2 s3	d0 d1 (a)	A2 fl	s2	M3
			B fl	s1	
			C fl	s2	
Toutes classes (b) autres que E-d2 et F			D fl	s1 (b) s2	M4 (non gouttant) M4

a. le niveau de performance d1 est accepté uniquement pour les produits qui ne sont pas thermofusibles dans les conditions de l'essai.

b. Le niveau de performance s1 dispense de fournir les informations prévues par l'arrêté du 4 novembre 1975 modifié portant réglementation de l'utilisation de certains matériaux et produits dans les établissements recevant du public et l'instruction du 1^{er} décembre 1976 s'y rapportant.

c. Admissible pour M1 si non substantiel au sens de la définition de l'annexe 1 (arrêté du 21 novembre 2002)

Tableau 3-2 : Correspondance entre le classement M et les Euroclasses

3.1.4 Méthodes d'essais et critères de classement

Les essais de réaction au feu sont au nombre de cinq comme résumé dans le tableau ci-dessous. Une présentation détaillée des critères de classement et des méthodes d'essais est fournie en ANNEXE D.

Méthodes d'essais harmonisées	

Tableau 3-3 : Méthodes d'essais harmonisées pour la définition des Euroclasses

On notera que les essais sont réalisés après conditionnement des éprouvettes selon la norme EN 13238 et que l'on ne procède à un essai d'un niveau donné que si le produit a passé avec succès l'essai de niveau inférieur :

- Les produits de classe A1 et A2 sont identifiés par l'essai de non-combustibilité selon NF EN ISO 1182 et par le pouvoir calorifique supérieur selon NF EN ISO 1716. Les produits en classe A2 doivent ensuite être soumis à l'essai SBI selon NF EN 13823 ;
- Les produits de classe B, C et D doivent en premier lieu satisfaire à l'essai à la petite flamme selon NF EN ISO 11925-2. Ils sont ensuite qualifiés par l'essai SBI selon NF EN 13823 ;
- Les produits de classe E sont ceux pour lesquels le test SBI donne un résultat négatif. Ils sont seulement caractérisés par l'essai à la petite flamme selon la norme NF EN ISO 11925-2 ;
- Pour la classe F aucun critère n'est défini. Les produits sont classés F lorsqu'ils ont subi l'essai à la petite flamme et n'ont pas obtenu le classement E ou par défaut d'essai.

3.2 PERFORMANCE DES COUVERTURES DE TOITURE

3.2.1 Notion et définition

En matière d'incendie, la performance des éléments de couverture traduit leur aptitude à limiter la propagation d'un incendie à l'intérieur d'un bâtiment vis-à-vis d'un feu extérieur.

3.2.2 Le système français

La réglementation actuelle sur l'utilisation de matériaux combustibles est basée sur l'attaque d'un feu extérieur, c'est-à-dire provenant de l'incendie d'un immeuble voisin.

Afin d'empêcher la propagation par la couverture à l'immeuble voisin, plusieurs solutions peuvent être proposées quant au classement des matériaux utilisés :

- M0 : tuiles, bacs acier, etc. ;
- M1 à M3 posé sur support continu en matériau M0, bois ou matériau autorisé par le CECMI ;
- M1 à M3 non posé dans les conditions précédentes, ou M4 : Dans ces conditions la couverture doit alors présenter les caractéristiques minimales de classe et d'indice de propagation du feu.

Les critères de classement sont les suivants :

- Pénétration du feu : apparition, sur la face inférieure de l'élément d'essai, de flammes soutenues ou d'une incandescence due à la combustion, incluant la chute de gouttes enflammées provenant de la face inférieure ;
- Propagation extérieure du feu : progression et étendue des flammes soutenues sur la surface exposée de l'élément d'essai.

La classe de couverture T indique le temps de passage du feu à travers l'élément par un brandon incandescent mis en place sur l'éprouvette :

- T 30 si le temps de passage est supérieur à une demi-heure ;
- T 15 si le temps de passage est supérieur à un quart d'heure ;
- T 5 si le temps de passage est compris entre 5 minutes et un quart d'heure.

L'Indice de propagation du feu indique le temps de propagation du feu en surface de la couverture par un brandon incandescent mis en place sur l'éprouvette :

- Indice 1 lorsque le temps de propagation est supérieur à une demi-heure ;
- Indice 2 lorsque le temps de propagation est compris entre 10 minutes et une demi-heure ;
- Indice 3 lorsque le temps de propagation est inférieur à 10 minutes.

3.2.3 L'approche européenne

L'arrêté du 14 février 2003 du Ministère de l'Intérieur [6] a mis en application une méthodologie harmonisée selon la nouvelle norme européenne ENV 1187 pour évaluer la performance des couvertures de toiture exposées à un feu extérieur. Ce nouvel arrêté abroge les méthodes françaises qui étaient définies dans l'Arrêté du 10 septembre 1970.

La partie 3 de la norme ENV 1187 est inspirée de la méthode française abrogée. Toutefois, elle en diffère essentiellement par la vitesse de l'air, les dimensions de l'éprouvette (largeur de 1200 au lieu de 1500 pour la méthode française), et le positionnement des joints des différentes couches de l'élément.

Toutefois une nouvelle classification est apparue, comme explicité ci-dessous :

- B_{Roof} (t3) : Temps : T > 30 min (classe T 30)
Indice : durée > 30 min (indice 1)
- C_{Roof} (t3) : 15 min < T < 30 min (classe T 15)
10 min < D < 30 min (indice 2)
- D_{Roof} (t3) : T < 15 min (classe T 5)
D < 10 min (indice 3)

3.3 RÉSISTANCE AU FEU DES PRODUITS DE CONSTRUCTION

3.3.1 Notion et définition

La résistance au feu est le temps pendant lequel un élément de construction peut jouer le rôle qui lui est dévolu, malgré l'action de l'incendie. Le classement en résistance au feu s'exprime en « degré » en fonction du temps pendant lequel l'élément satisfait aux différents critères.

Quatre catégories d'éléments ou produits de construction sont concernées :

- Éléments de structure : planchers, plafonds, poteaux, poutres ;
- Éléments de second œuvre : cloisons, portes, vitrages, verrières ;
- Protection : Flocages, plaques, calfeutrements, peintures ;
- Équipement de sécurité : ventilateurs, clapets, conduits, exutoires, trappes ;

3.3.2 Le système français

L'arrêté du 3 août 1999 du Ministère de l'Intérieur [7] définit les méthodes d'essais et les classements en matière de résistance au feu des produits et éléments de construction.

Les essais de résistance au feu sont réalisés selon une méthode conventionnelle dans les laboratoires officiels agréés par le ministère de l'intérieur (CSTB, Efectis France). Ces laboratoires délivrent les procès verbaux, les extensions de classement, des analogies et des avis de chantiers.

Cet arrêté distingue trois classifications, à savoir :

- « Stable au feu » (SF) ;
- « Pare flamme » (PF) ;
- « Coupe feu » (CF).

3.3.3 L'approche européenne

La publication de l'Arrêté du 22 mars 2004 du Ministère de l'Intérieur [8] met en application une méthodologie harmonisée selon la nouvelle norme européenne EN 13501 [42] pour le classement de

résistance au feu des produits et des éléments de construction. Ce nouvel arrêté abroge les méthodes françaises qui étaient définies dans l'Arrêté du 3 août 1999 [7].

Désormais, la résistance au feu des produits de construction est évaluée selon le nouveau système harmonisé européen. Le système de classification français Stable au feu, Pare flammes et Coupe-Feu (CF) est abandonné pour les critères européens de classification R, E, I et W. Pour certains éléments de construction des critères supplémentaires peuvent être demandés :

- Classement W : rayonnement limité ;
- Classement M : résistance aux chocs ;
- Classement C : fermeture automatique ;
- Classement S : étanchéité aux fumées.

3.3.4 Critères de classement

Trois critères sont utilisés pour l'évaluation des divers degrés de résistance au feu :

- La résistance mécanique (R) en ce qui concerne la stabilité de l'élément : le critère est défini par la perte de la fonction porteuse de l'élément (notion de capacité d'un élément à supporter la charge qui lui est appliquée) :
 - Pour les éléments de structure horizontaux, ce critère est réputé satisfait si la flèche atteinte ne dépasse le $1/30^{\text{ème}}$ de la portée ou si la vitesse de déformation ne dépasse pas 3 mm/min par mètre de portée ;
 - Pour les éléments de structure verticaux, si la vitesse d'effondrement ne dépasse pas 3 mm/min par mètre de hauteur ou si l'affaissement ne dépasse pas le $1/300^{\text{ème}}$ de la hauteur.
- L'étanchéité aux flammes et aux gaz chauds et la non émission de gaz combustibles (E). Ce critère n'est plus satisfait quand on observe :
 - Une inflammation pendant une durée supérieure à 20 secondes d'une nappe de coton hydrophile (dimensions $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$) placée à 25 mm de l'élément ;
 - Une inflammation pendant plus de 20 secondes des gaz émis en face non exposée à l'approche d'une flamme pilote ;
 - Un passage ou production de flammes soutenues en face non exposée (ouverture supérieure à 45 cm^2).
- L'isolation thermique (I). Ce critère est réputé satisfaisant lorsque le réchauffement de la surface non exposée au feu ne dépasse pas 140°C en moyenne ou 180°C en un point par rapport à la température initiale de la face non exposée.

Les principaux critères de résistance au feu, définis dans l'arrêté du 22 mars 2004 [8], sont résumés dans le tableau ci-après.

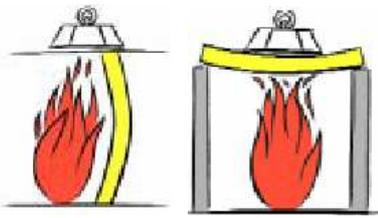
Critères et définitions	Classement Français	Schémas explicatifs
<p>Résistance mécanique (R) : Aptitude à résister à l'attaque thermique d'un incendie sans perte de stabilité structurelle</p>	Stable au Feu (SF)	
<p>Étanchéité au feu (E) : Aptitude à empêcher le passage de flammes et de gaz chauds</p>	Pare – Flammes (PF)	
<p>Isolation thermique (I) : Aptitude à empêcher l'élévation de la température de la face non exposée à l'incendie</p>	Coupe – Feu (CF)	
<p>Rayonnement thermique (W) Aptitude à ne pas émettre un rayonnement thermique supérieur à 15 kW/m²</p>	<i>Ce dernier critère n'est pas utilisé en France</i>	

Tableau 3-4 : critères de résistance au feu, définis dans l'arrêté du 22 mars 2004

Ainsi, les équivalences aux notations françaises sont issues des combinaisons des trois principaux critères R, E et I :

Classement français	Classification européenne
Stable au Feu (SF)	R
Pare-Flamme d'un élément porteur (PF)	RE
Pare-Flamme d'un élément non porteur (PF)	E
Coupe-Feu d'un élément porteur (CF)	REI
Coupe-Feu d'un élément non porteur (CF)	EI

Tableau 3-5 : Équivalences aux notations françaises

Le classement des éléments de construction dans chacune de ces catégories s'exprime en degrés, correspondant à la durée pendant laquelle ces éléments satisfont aux conditions requises, à savoir: degrés 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180 minutes, etc.

3.3.5 Méthodes d'essais

Depuis le début des années vingt, la méthode traditionnelle utilisée pour déterminer la résistance au feu consiste à faire un **essai normalisé de tenue au feu sur un échantillon représentatif de l'ensemble de la construction**. Les essais de résistance au feu des produits de la construction sont effectués dans des fours spécifiques dans lesquels les produits sont soumis à un programme thermique donné (cf. Figure 3-1) :

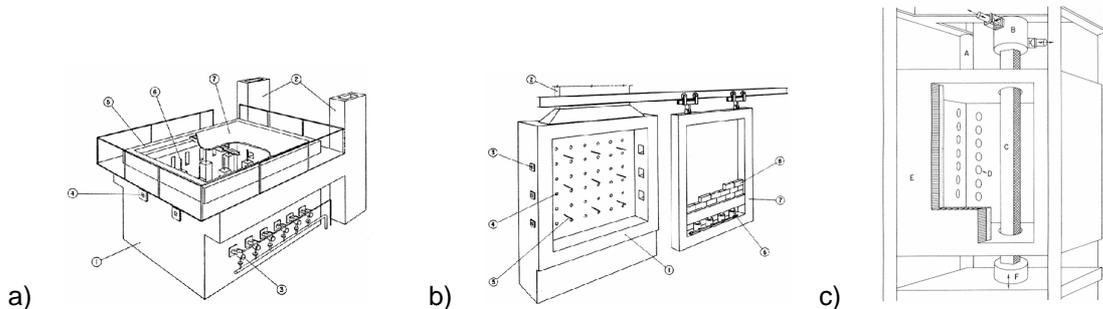


Figure 3-1 : Représentation schématique des fours conçus pour l'essai des planchers et toits (a), des murs et cloisons (b) et des poteaux structuraux (c)

La variation de température en fonction de temps lors d'un incendie est modélisée d'après les exigences réglementaires actuelles par la courbe ISO R834 dite d'incendie conventionnel. Cette courbe logarithmique est utilisée pour les essais en laboratoire. Contrairement au feu réel, elle présente l'avantage d'être unique et facilite la reproductibilité et la comparaison des résultats d'essais. Toutefois, certaines exigences spécifiques doivent également être respectées lors des essais, en particulier des exigences de pression dans le four. Ces exigences peuvent être différentes selon les produits.

L'élévation de température du four par rapport à la température ambiante est conduite suivant le programme thermique conventionnel représenté par la fonction :

$$T = T_0 + 345 \text{ Log}_{10} (8t+1)$$

où t : temps (min)

T : température du four à l'instant t (°C)

T_0 : température ambiante initiale (°C)

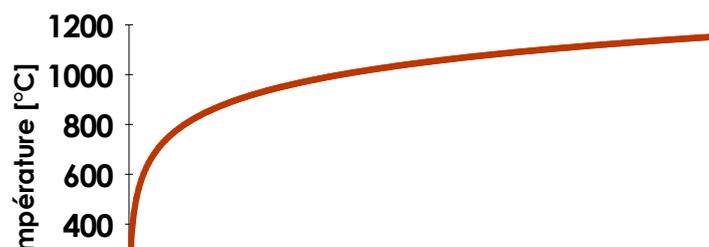


Figure 3-2 : Courbe température-temps de l'incendie conventionnel (courbe ISO R834)

Une revue exhaustive des performances des matériaux et des produits de construction en matière de résistance au feu testé sous feu conventionnel est présentée en ANNEXE D.

3.3.6 Modes de justification

Pour démontrer ou justifier le comportement au feu d'un élément ou d'un produit de construction, il faut avoir recours à des essais ou, dans certains cas, à des calculs.

Les essais font l'objet de normes définissant les méthodes et les moyens expérimentaux à mettre en œuvre en fonction du comportement à observer. Ces essais doivent être effectués par des laboratoires agréés qui délivrent ensuite une pièce justificative. En dehors du marquage CE, le tableau suivant fournit les différents documents justifiant des performances en résistance au feu des produits de la construction.

CINQ JUSTIFICATIFS DE COMPORTEMENT AU FEU DES OUVRAGES				
DÉNOMINATION	OUVRAGES CONCERNÉS	DÉTENTEURS (*)	VALIDITÉ	OBSERVATIONS
Note de calculs	Ouvrages traditionnels	Maître d'œuvre BET Entreprise	Non limitée	Établie sur la base des règles en vigueur (arrêté du 22 mars 2002)
Procès-verbal (PV) de caractérisation de protection (béton et acier)	Produits de protection (plâtre incendie, fibres, peintures, encoffrement produits pâteux)	Industriel ou entreprise (détenteur du procédé)	5 ans	Après essai en laboratoire, établissement d'abaques indiquant les épaisseurs de protection en fonction des caractéristiques de la structure et de la durée de stabilité au feu requise
Procès-verbal (PV) de classement de résistance au feu	Montages non concernés précédemment : ouvrages en plaques de plâtre, portes, vitrages, conduits aérauliques,...	Industriel ou entreprise (détenteur du procédé)	5 ans	Justification de la résistance au feu du montage testé et précision des domaines de validité
Extensions de classement	Modifications de montage de portée générale (hauteur, portée, composition) et exploitables comme le PV de classement correspondant	Industriel ou entreprise (détenteur du procédé)	5 ans	Extension des domaines d'emploi de montages ayant fait l'objet d'un PV de classement
Avis de chantier	Montages spécifiques sur un chantier pour lesquels il n'existe pas de procédures d'essais	Maître d'ouvrage Concepteur Entreprise	Chantier visé	Pour un chantier donné justification de la résistance au feu de l'ouvrage projeté.

(*) Le détenteur est l'entité qui produit ou fait la demande d'obtention d'une pièce justificative Les pièces justificatives ne sont délivrées que par les laboratoires agréés, à l'exception de la note de calculs.

L'ingénierie de la sécurité incendie est une approche nouvelle basée sur des objectifs à atteindre, notamment grâce aux méthodes décrites dans les parties « Feu » des principaux Eurocodes. Cette démarche prend en compte la capitalisation des expériences et des connaissances actuelles en matière de comportement et de développement du feu. La notion de « feux réels » remplace alors la référence normalisée de l'incendie conventionnel (courbe ISO R834).

4 ANALYSE DES TYPOLOGIES DE CONSTRUCTION ET DE BATIMENT

Ce chapitre a pour objet l'établissement des typologies de constructions, classées par parties d'ouvrages et ventilées selon une liste variée de destinations de bâtiments.

L'établissement objectif de ces typologies, présenté sous forme de tableaux, présente succinctement les caractéristiques techniques et l'estimation qualitative de la représentativité des différents procédés en fonction des destinations.

La liste des systèmes et/ou produits correspondant à un état de l'art des constructions fondé sur une observation du bâti, des bases de données produits et une sélection de textes de référence en matière de construction sont fournies. La liste des systèmes et produits est aussi représentative que possible des dispositions constructives courantes, en particulier dans le champ des bâtiments existants, sans pour autant prétendre être exhaustive.

Chaque produit ou système est aussi répertorié et ventilé selon six familles de parties d'ouvrages. Enfin, pour chacun, leur représentativité est renseignée au regard de chacune des destinations retenues. Au préalable, on rappelle les exigences réglementaires de la construction en France.

4.1 RÉGLEMENTATION DE LA CONSTRUCTION EN FRANCE

4.1.1 Architecture de la réglementation en France

En France, les bases de la réglementation en matière de sécurité incendie sont associées d'une part à la destination du bâtiment et aux activités qui s'y déroulent, et d'autre part aux dimensions géométriques de l'ouvrage et de son environnement.

L'évolution des textes est permanente et consécutive notamment à l'harmonisation européenne, ces dernières années. Mais l'architecture d'ensemble des textes réglementaires respecte toujours les principes généraux applicables en Droit français, résumé dans la figure présentée ci-dessous :

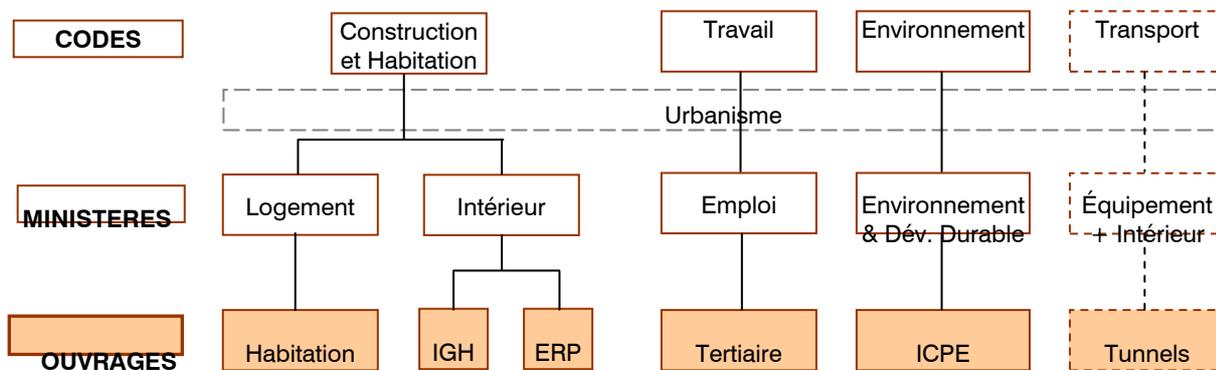


Figure 4-1 : Représentation schématique des relations entre les Ministères de tutelle, les Codes et les types d'ouvrages

Pour la construction, la grande majorité des informations et obligations réglementaires se trouvent dans le Code de l'Habitation et de la Construction, le Code du Travail et/ou le Code de l'Environnement.

La destination des bâtiments a permis de créer aussi un classement en cinq catégories d'établissement :

- Les établissements recevant du public ;
- Les bâtiments industriels ou tertiaires ;
- Les immeubles de grande hauteur ;
- Les bâtiments d'habitation ;
- Les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement.

4.1.2 Synthèse des exigences réglementaires en terme de réaction et résistance au feu de l'enveloppe externe des bâtiments

Ce chapitre présente succinctement les exigences réglementaires en terme de résistance et réaction au feu de l'enveloppe externe des différents types de bâtis. Un récolement réglementaire pour chaque type de bâtis est fourni en annexe de ce guide (cf. ANNEXE F).

Établissements Recevant du Public

Les indications données dans les tableaux sont générales à tous les types d'ERP. Il convient de s'assurer que les dispositions particulières à un type d'ERP ne viennent pas en aggravation ou en dérogation de celles-ci.

Type de bâtiment	Catégories	Hauteurs (I)	Structures (II)	Revêtement de façade et menuiserie (III)	Couverture (IV)
ERP	1-2-3-4	RdC	R30	M2 ou M3	M0 à M4
	2-3-4	< 8 m	R30	M2 ou M3 avec C+D	M0 à M4
	1	< 8 m	R60	M2 ou M3 avec C+D	M0 à M4
	2-3-4	De 8 à 28 m	R60	M2 ou M3 avec C+D	M0 à M4
	1	De 8 à 28 m	R90	M2 ou M3 avec C+D	M0 à M4

Tableau 4-1 : Exigences réglementaires incendie pour les ERP

- (I) hauteur : distance entre le plancher bas du niveau le plus haut
 (II) sauf exceptions prévues aux articles CO13 à 15 (arrêté du 25/6/80 modifié)
 (III) M3 avec respect de la règle du C+D (CO 21) ;
 (IV) M4 avec respect du CO16 (protection de la couverture par rapport à un feu extérieur).

Bâtiments d'habitation

Le tableau ci-dessous présente les exigences en terme de résistance et réaction au feu de l'enveloppe externe des bâtiments d'habitation en fonction de leur famille.

Type de bâtiment	Famille	Structure	Revêtement de façade et menuiseries	Couverture
Habitations	1 ^{ère} famille	R15	M2 à M4	T5
	2 ^{ème} famille	R30	M2 à M3	T15
	3 ^{ème} famille	R60	M2 à M3	T30
	4 ^{ème} famille	R90	M2 à M3	-

Tableau 4-2 : Exigences réglementaires incendie pour les bâtiments d'habitations

Immeubles de Grande Hauteur

Le tableau ci-dessous présente les exigences en terme de résistance et réaction au feu de l'enveloppe externe des IGH.

Type de bâtiment	Structure	Revêtement de façade et menuiseries	Couverture
IGH	R120	M0 (V)	M0

Tableau 4-3 : Exigences réglementaires incendie pour les IGH

- (V) Les menuiseries en façade peuvent être M3

□ Établissements Industriels et commerciaux

Le tableau ci-dessous présente les exigences en terme de résistance et réaction au feu de l'enveloppe externe des bâtiments industriels et commerciaux.

Type de bâtiment	Hauteur	Structure	Revêtement de façade et menuiseries	Couverture
EIC	< 8 m	-	M2 à M3	M0 à M4
	>8 m	R60	M2 à M3	M0 à M4

Tableau 4-4 : Exigences réglementaires incendie pour les établissements industriels

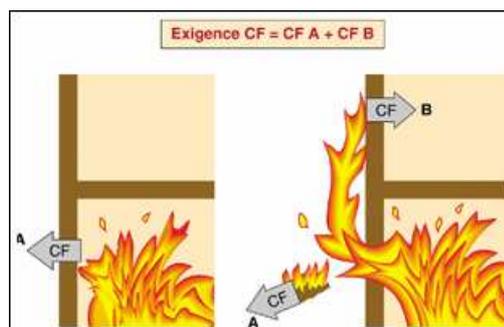
L'analyse des exigences réglementaires en matière de réaction et de résistance au feu applicables aux différents types de bâtiments permet de constater qu'aucune exigence en terme de résistance au feu n'est formulée pour les façades, excepté dans les cas :

- D'isolement d'un bâtiment avec un tiers ou des exigences de degré pare flamme et coupe feu sont définies pour les ERP et bâtiments d'habitation.
- De parois d'enveloppe extérieure opaques, la performance à atteindre est un coupe-feu obtenu à partir des degrés coupe-feu de chacune des parois ($CF\ a + CF\ b = CF$) :
 - Exigence pour les bâtiments d'habitation :

1^{ère} et 2^{ème} Famille : **REI 30**
3^{ème} et 4^{ème} Famille : **REI 60**

- Exigence pour les ERP du 1^{er} groupe :

ERP < 8 m : **REI 30**
ERP > 8 m : **REI 60**



Les revêtements de façades et les menuiseries extérieures peuvent présenter un classement de réaction au feu soit M2, soit M3. Ces matériaux présentent donc un risque d'inflammation de l'enveloppe externe en cas d'exposition prolongée à un rayonnement thermique.

Concernant les couvertures de toitures et toitures, l'article 15 de l'arrêté du 31 janvier 1986 relatif à l'habitation [9] et les articles CO 16 à CO 18 de l'arrêté du 25 juin 1980 modifié des ERP [10] définissent des exigences de protection de la couverture vis-à-vis d'un feu extérieur pouvant aller des classe T5 à T30. Toutefois ces exigences réglementaires ne garantissent en rien la non propagation du feu à l'intérieur d'un bâtiment en cas d'exposition prolongée à un rayonnement thermique. Aucune exigence réglementaire n'est définie pour les couvertures des bâtiments industriels et commerciaux.

Au regard de ces constats, il apparaît difficile de dégager un niveau de protection des différents types de bâti vis-à-vis d'une action thermique externe, sur la base des exigences réglementaires actuelles.

4.2 CARACTÉRISATION DES TYPOLOGIES DE CONSTRUCTION LES PLUS COURANTES

Pour étudier les caractéristiques des systèmes constructifs, le parc des constructions est à considérer dans son ensemble, tant en terme de localisation qu'en terme d'ancienneté de la construction. Il est donc important de préciser que, sur la base des chiffres du marché de la construction des dernières années, la France réalise environ 300 000 à 320 000 logements neufs (individuel et collectif) par an et que l'ensemble des constructions réalisées annuellement représente environ 1% seulement du parc immobilier total.

La description exhaustive de l'ensemble des procédés et matériaux utilisés dans le parc immobilier construit et à venir paraît sinon impossible, pour le moins peu pertinente.

Il semble plus significatif de dégager des tendances fortes en fonction d'une part des matériaux et des destinations, mais aussi de considérer les particularismes géographiques et historiques.

L'approche que nous suggérons prend appui sur un diagnostic réalisé par un technicien du bâtiment avec une identification visuelle sans sondage destructif possible et avec un accès restrictif et aléatoire des bâtiments étudiés. L'appréciation ne peut alors être valablement fondée que sur une partie d'empirisme et de dispositions sécuritaires, selon l'objet du diagnostic à réaliser.

Nous proposons le découpage suivant pour cette approche analytique :

Éléments de structure	Façade	Couverture et toiture	Menuiseries Extérieures
<ul style="list-style-type: none"> • Extérieurs • Indirectement exposés 	<ul style="list-style-type: none"> • Opaque lourde, • Opaque légère, • Vitrée ou translucide 	<ul style="list-style-type: none"> • En pente (lourde ou légère), • Toiture-terrasse (lourde ou légère) • Éléments vitrés ou translucides) 	<ul style="list-style-type: none"> • Opaques (mobiles ou fixes), • Vitrées (mobiles ou fixes), • Systèmes d'Occultation (mobiles ou fixes)

Tableau 4-5 : Découpage des constructions par partie d'ouvrages

On effectue ci-après la description de ces parties d'ouvrages en dégagant les matériaux les plus couramment employés, les dimensions courantes et les techniques de mise en œuvre dans la mesure où elles peuvent devenir des éléments importants pour notre analyse des effets thermiques sur le bâtiment.

4.2.1 Éléments de la structure principale

Historiquement, la structure principale d'un bâtiment est le plus souvent formée d'éléments de bois et du matériau utilisé en façade opaque. La technique de construction la plus ancienne est l'empilement de bois massif en rondins ou madriers. Puis, la technique du colombage a été développée. Elle consistait à utiliser des éléments de bois verticaux et des traverses horizontales de fortes sections entre lesquels on mettait en œuvre un remplissage à base de terre ou de chaux. Depuis, cette technique a évolué pour devenir la technique de construction à ossature bois avec des éléments de section plus faibles.

Par extension, c'est le même schéma constructif utilisé avec le béton et ses dérivés. La révolution industrielle a permis d'utiliser la fonte puis l'acier pour réaliser la structure de bâtiments de grande taille et/ou de grande portée. A cette image, le procédé « poteaux-poutres » a été décliné de manière plus ou moins complexe par chaque filière de matériaux.

Selon la configuration de la construction considérée, un ou plusieurs éléments de la structure principale peuvent ainsi être exposés à l'extérieur et donc soumis à un aléa naturel ou technologique. Béton, acier, bois sont donc les matériaux qui dominent en matière d'ossature d'une construction.

4.2.2 Façades

4.2.2.1 Généralités

La façade est le plus souvent une association de parois opaques et de parois translucides. C'est la partie de l'ouvrage, visible en totalité ou en partie, qui assure le plus de fonctions : protection des occupants contre les variations climatiques et de température, contre les intrusions depuis l'extérieur, contre le bruit. L'histoire des matériaux utilisés a naturellement conduit au fait que la façade contribue également à la stabilité de l'édifice.

Ces fonctions se retrouvent dans les exigences essentielles de la Directive Européenne sur les Produits de Constructions (DPC 89/106/CEE). Par ailleurs, l'esthétique et le confort ont nécessité de créer des parois translucides pour amener la lumière naturelle vers l'intérieur du bâtiment. Par extension, ces ouvertures ont ensuite été équipées de dispositifs d'occultation ou de contrevents.

Historiquement, les matériaux de construction des parois sont des matériaux disponibles à l'état naturel ou issus d'une exploitation souvent locale : essences de bois, terre cuite, carrières de pierres, gypse,...

Le développement de la métallurgie d'abord, puis l'essor de nouvelles technologies après la seconde guerre mondiale ont permis d'élargir la zone de distribution des produits et la variété des systèmes. C'est l'apparition de produits industriels plus minces et plus légers.

Les parois opaques en façade peuvent être classées en différentes catégories suivant leur fonction, leur constitution et leur mode de fabrication. L'annexe du DTU 23-1 définit quatre types principaux de murs (Type I, II, III et IV) en fonction du niveau d'étanchéité de la paroi.

Les parois opaques peuvent être porteuses, c'est-à-dire qu'elles servent d'appuis aux planchers et aux charpentes, ou non. Les façades opaques non porteuses sont généralement des façades en matériaux légers ou en maçonnerie de faible épaisseur (<15cm).

Les parois vitrées ou translucides ne sont pas porteuses. Elles sont réalisées à l'aide d'éléments lourds (verre) ou légers (produits de synthèses translucides).

Les murs en façade peuvent être revêtus d'un parement de faible épaisseur, appelé vêture, qui se fixe directement sur le support. Dans le cas où un isolant est ajouté on obtient une vêtiture, le système étant toujours fixé directement sur les parties porteuses. Dans le cas où ce système de parement est fixé sur une ossature secondaire, avec ou sans isolant, on parle alors de bardage.

Dans ce document on choisit alors de définir le type « façades opaques lourdes » comme celui comprenant tous les murs en maçonnerie et en béton de toutes épaisseurs, et un type de façades légères pour les façades possédant en partie visible un bardage ou une vêtiture. Les cas de bardage ou vêtiture situés devant un mur opaque devront être décrite comme une façade opaque légère.

Pour les façades translucides ou vitrées, on se référera au point développé dans ce document sur les éléments de menuiserie en façade.

4.2.2.2 Matériaux de façade

Pour la grande majorité des constructions d'avant 1940, les matériaux de base pour la façade sont des produits lourds et massifs :

- La pierre naturelle (calcaire, grès, volcanique), taillée ou non ;
- La brique pleine de terre cuite (notamment dans le Nord de la France, la Normandie et la région toulousaine) ;
- La terre crue pour une part de la région Rhône-Alpes ;
- Le torchis, en particulier dans les bâtiments anciens à ossature bois ;

Après la seconde guerre mondiale, la reconstruction et l'industrialisation ont conduit au développement de nouveaux produits déclinés des précédents :

- Le bloc de béton creux (aggloméré) ou plein ;
- Le bloc de béton cellulaire ;
- La paroi de béton banché ;
- La brique creuse de terre cuite ;
- La pierre reconstituée (poussière de pierre et résidus de carrière + résine) ;

Ces matériaux bruts peuvent être revêtus sur leur face extérieure soit d'un enduit (multicouche ou monocouche) dérivé du ciment, d'un parement rapporté de type bardage, vêlage ou vêtue.

Outre ces matériaux lourds, il existe des procédés légers, à base de bois puis plus récemment avec des panneaux minces en béton ou pierre. Ces systèmes de parement extérieur sont soit associés à une ossature porteuse de type poteaux – poutres, soit mis en œuvre pour protéger un mur tel que ceux décrits précédemment.

Enfin, les murs et parois opaques ainsi réalisées sont accompagnés, en particulier dans le cas des bâtiments d'habitation ou de bureaux, d'une couche de finition intérieure à base de plâtre ou de chaux. Depuis une trentaine d'années, une ou plusieurs couches d'isolant sont intercalées entre la maçonnerie et la couche intérieure.

Les matériaux isolants courants sont le polystyrène expansé et la laine de verre. La laine de roche et le polyuréthane se trouvent généralement dans les bâtiments industriels ou les ERP.

Les parois translucides sont essentiellement constituées de produits verriers sous forme de blocs, de panneaux ou de feuilles. Depuis une soixantaine d'années, les progrès technologiques ont permis d'améliorer considérablement les performances et les compositions de ces produits. Dans le même temps, les produits dérivés du pétrole ont aussi apporté des réponses intéressantes aux besoins de la construction, notamment dans le domaine des produits translucides.

4.2.2.3 Façades opaques lourdes

Dans le cas de façades opaques lourdes, trois types de mur peuvent se dégager : les murs simples, les murs composites et les murs doubles (cf. Figure 4-2 et Figure 4-3).

Les murs simples sont constitués d'un seul matériau principal autoporteur avec la possibilité d'un enduit léger en façade extérieure et/ou intérieure, voire un doublage isolant en façade intérieure.

Les murs composites sont constitués, dans le sens de l'épaisseur, de plusieurs matériaux principaux solidarisés. Comme le mur simple, des enduits ou un doublage isolant peuvent être présents

Les murs à double paroi comportent deux parois distinctes qui peuvent être d'épaisseurs inégales et séparées soit par une lame d'air d'au moins 2cm d'épaisseur soit par un isolant. Le mur se situant du côté intérieur peut posséder un doublage isolant (cf. Figure 4-3).

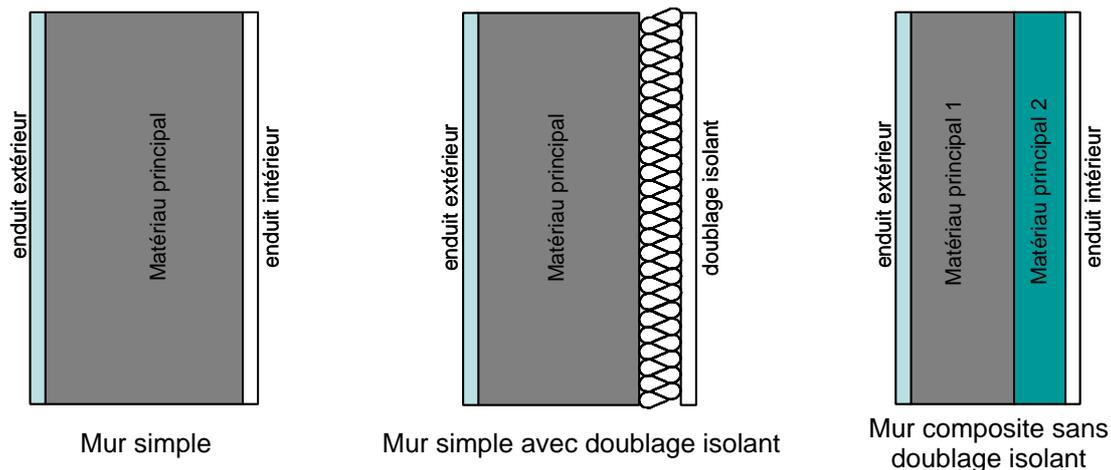


Figure 4-2 : Schématisation des murs simples et composite

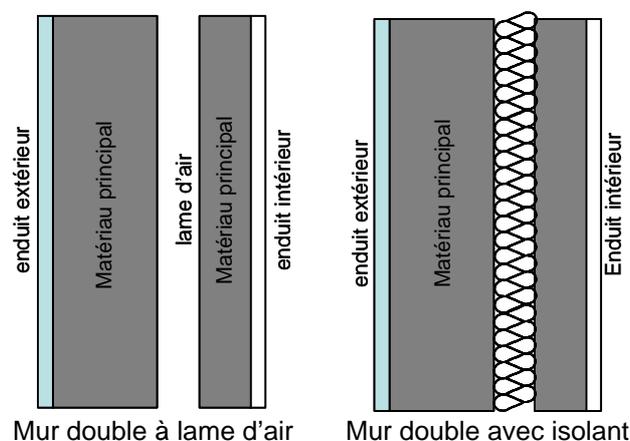


Figure 4-3 : Schématisation des murs doubles

Les matériaux considérés pour ces façades sont la pierre naturelle, les blocs en béton pleins, perforés, creux et cellulaire, le béton à bancher, les briques pleines, perforées et creuses en terre cuite et les blocs de terre cuite, mais aussi le bois et le métal.

Pour les façades en pierre, on distingue le moellon qui est un élément équarri ou non, de forme quelconque et de dimensions variables, dont la face de parement est brute ou travaillée, et la pierre dimensionnée et travaillée sur toutes les faces. Les épaisseurs les plus courantes vont de 20 à 50 cm, et jusqu'à 100 cm. La nature des pierres diffère significativement selon les régions : on retiendra les pierres de meulières, calcaires et granit.

Les blocs de béton ont généralement un poids et des dimensions conçues pour faciliter la manutention lors de leur mise en œuvre. Les blocs de béton perforés sont des blocs de béton pleins évidés alors que les blocs de béton creux, appelé communément « agglos », sont fabriqués en créant des rangées d'alvéoles. Le bloc de béton creux commun possède deux rangées de trois alvéoles. Les blocs de béton de granulats sont généralement classés en fonction de leur masse volumique supérieure ou inférieure à $1\,700\text{ kg/m}^3$ pour obtenir soit un bloc courant, soit un bloc léger. Leurs épaisseurs varient de 7,5cm à 35cm, mais les plus usitées sont des blocs de 10, 15 et 20 cm.

Le béton cellulaire est un élément homogène de faible masse volumique ($< 800\text{ kg/m}^3$), les épaisseurs des blocs de béton cellulaire peuvent être plus réduites (5 cm), mais dans ce cas il ne peut alors être employé en tant qu'élément porteur.

Les façades en béton à bancher sont des ouvrages verticaux, coulés dans des coffrages (ou banches). Les épaisseurs de ces murs en béton varient en fonction de leur emploi et de leur rôle structural, mais des épaisseurs identiques à celles des blocs de béton pleins peuvent être considérées en version de base puis étendues à des épaisseurs plus importantes pour certains ouvrages (en sous-sol, IGH,...).

Les produits de terre cuite sont employés traditionnellement dans certaines régions et de façon aléatoire sur le reste du territoire. La brique pleine et perforée est un produit de terre cuite utilisé comme élément de construction des murs et pour la maçonnerie de parement. La brique perforée est une brique dont les évidements correspondent à plus de 20% du volume total. Les épaisseurs de mur en briques pleines ou perforés varient entre 11 et 22 cm selon l'appareillage (mise en place des briques) pouvant atteindre jusqu'à 34 cm en simple mur.

Les briques creuses sont employées uniquement en maçonnerie et accusent des dimensions plus importantes que les briques pleines. Néanmoins l'épaisseur de mur en briques creuses varie généralement de 15 à 25 cm pour les murs les plus courants.

Depuis la nouvelle réglementation thermique est apparu le bloc de terre cuite employé pour des raisons de confort thermique car il présente des caractéristiques répondant aux exigences de la RT 2000 puis RT 2005. Il s'agit d'un élément présentant de nombreuses alvéoles permettant de réduire les déperditions énergétiques. L'épaisseur minimum d'un bloc de terre cuite est de 15 cm. Il peut être monté en mur double avec une lame d'air ou d'isolant, l'ensemble atteignant ainsi une épaisseur de 37 cm.

Pour l'ensemble de ces façades, des doublages isolants peuvent être mis en œuvre, et l'on considérera ici les deux types d'isolant les plus employés pour les murs de façades : la laine de verre et le polystyrène. La laine minérale et les matériaux synthétiques plastiques (polyuréthane) sont plus souvent présents dans le segment des bâtiments industriels. Les épaisseurs courantes de laine de verre varient de 40 à 100 mm avec l'ajout d'un panneau de plâtre (BA13) de 1,25 cm d'épaisseur. Dans le cas du polystyrène il s'agit le plus souvent de panneaux préfabriqués comprenant l'isolant collé sur une plaque de plâtre ou un panneau indépendant de 10 mm. N'oublions pas la possibilité d'un simple enduit de plâtre à l'intérieur qui varie de 10 à 30 mm d'épaisseur.

On indique ci-après dans le tableau 4.1, les épaisseurs les plus courantes et maximales des façades opaques lourdes et de leur doublage isolant.

Nature du matériau	Épaisseurs courantes (cm)	Épaisseurs max. (cm)
Matériau principal		
Pierre naturelle	20 à 50	Jusqu'à 80
Bloc de béton plein ou perforé	10 – 15 - 20 ou 25	27,5
Bloc de béton creux	10 – 15 - 20 ou 25	27,5
Bloc de béton cellulaire	5 - 10 – 15 - 20 ou 25	33
Béton à bancher	10 – 20 ou 25	35
Brique pleine ou perforée	11 ou 22 (selon appareillage)	jusqu'à 34
Brique creuse	15 – 20 - 22 - 25 (selon appareillage)	jusqu'à 33
Bloc de terre cuite	15	37
Doublage isolant		
Enduit intérieur (plâtre)	10 à 30	50
Polystyrène (+ plâtre)	4 à 9 (1)	12 (3)
Laine de Verre (+ plâtre)	4 à 10 (1,2)	14 ou 2 x 10 (3,6)

Tableau 4-6 : Épaisseurs les plus courantes et maximales des façades opaques lourdes et de leur doublage isolant en fonction de la nature du matériau

4.2.2.4 Façades opaques légères

Dans le cas des façades légères opaques on considère (cf. Figure 4-4) :

- ❑ Le parement ou vêtage : éléments directement fixés sur le mur ;
- ❑ La vêtture : éléments de vêtage avec un isolant fixé sur le mur,
- ❑ Les bardages : éléments avec ou sans isolant fixé sur une ossature porteuse.

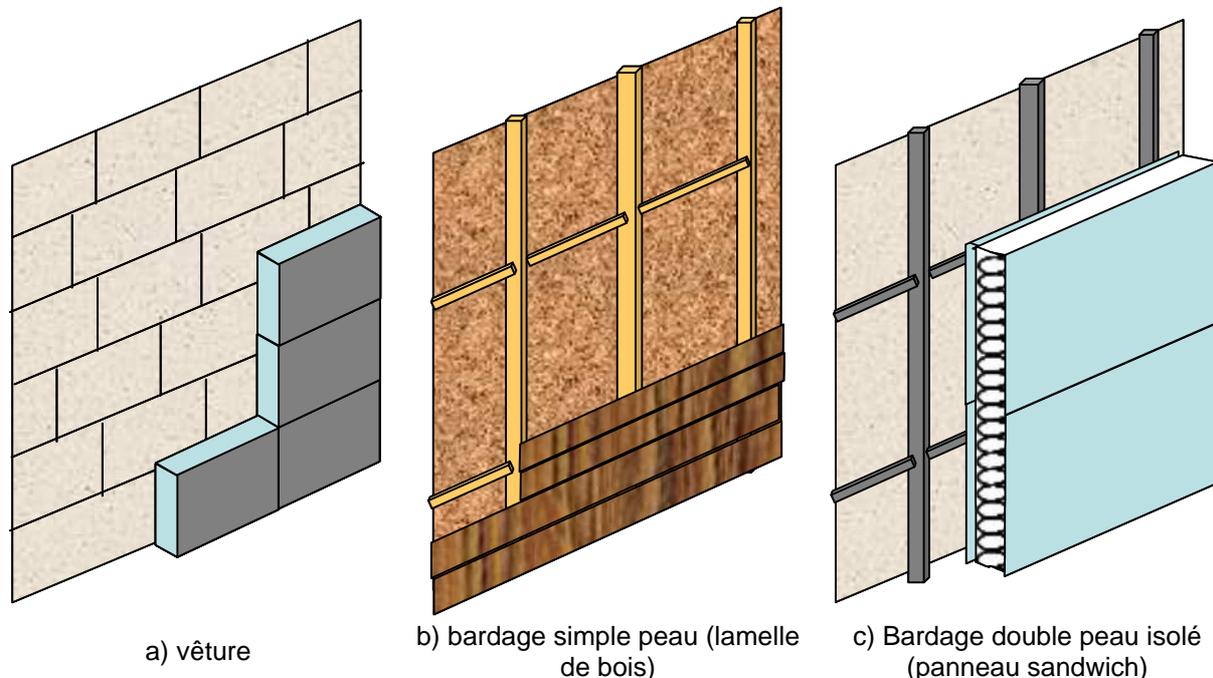


Figure 4-4 : Schématisation des types de façades opaques légères

Le vêtage ou parement est donc un élément de construction étanche et résistant aux intempéries. Il peut être en acier, aluminium, plaque de pierre, ciment, plastique... et de faible épaisseur (≤ 3 cm). Cet élément est fixé par clouage, agrafage, griffes ou collage sur un mur autoporteur. Il s'agit d'un simple habillage.

Si on ajoute à ce parement un isolant, on obtient une vêtture. L'isolant est généralement du polystyrène ou bien de la laine de roche ou de verre.

Le bardage est constitué d'une peau extérieure étanche et résistante aux intempéries en acier, aluminium, plaque de pierre, ciment... L'épaisseur est très faible (< 3 cm). A l'arrière de cette peau, une âme isolante est placée en remplissage et est composée d'un isolant standard polystyrène, laine de verre et laine de roche, voire du polyuréthane pour compenser la faible inertie de la façade en termes d'isolation thermique. Les épaisseurs d'isolant varient de 3 à 14 cm selon la destination du bâtiment et le matériau. Enfin, une nouvelle peau peut apparaître en face non exposée aux intempéries.

Le système double peau et âme isolante est préfabriqué en usine et les différents éléments sont assemblés sur site. Il existe également des produits finis : le panneau sandwich, formé d'une couche isolante prise entre deux parements métalliques.

Dans le cas des constructions en bois, il est possible de fixer des panneaux, des lamelles (clins) ou des tuiles de bois sur l'ossature du bâtiment. En France, on peut retenir deux familles de bois employées en façade : le feuillu et le résineux. Des procédés de préfabrication d'éléments en bois comme le lamellé-collé et l'aggloméré sont aussi à considérer. L'épaisseur de ces éléments de façade est comprise entre 1,5 et 2,2 cm. Si une isolation est nécessaire, des panneaux rigides d'isolant sont placés en face intérieure en ménageant une lame d'air d'au moins 1 cm.

Nature peau extérieure	Épaisseur (cm)	
	Bardage	Vêtire
Métal/ Alu	0,06 à 0,15	0,06 à 0,15
PVC	0,06 à 0,15	0,06 à 0,15
Pierre	0,3	
Bois	1,2	33
Terre cuite, fibres ciment, ardoise,...	0,3 – 0,75	

Nature isolant	Bardage	Vêtire
Polystyrène	3 à 14	3 à 10
Laine de verre	3 à 14	
Laine de roche	3 à 14	3 à 14
Polyuréthane	3 à 14	

Tableau 4-7 : Épaisseurs des façades opaques légères et isolants associés

4.2.3 Couverture et toiture

Les couvertures sont des ouvrages en pente nécessitant une ossature support du complexe de couverture. Cette ossature est appelée charpente et comprend la ferme (ensemble de pièces principales en bois disposé dans le sens transversal aux façades principales) sur laquelle viennent prendre appui les pannes (éléments longitudinaux).

Le complexe de couverture s'appuie sur les pannes de la charpente et est composé de l'intérieur vers l'extérieur de chevrons, de liteaux et d'un parement extérieur. Dans certains cas (couverture en zinc par exemple), un platelage en bois peut être mis en œuvre entre chevrons et liteaux.

Les charpentes et ses éléments sont généralement en bois ou en acier, parfois en béton sur les bâtiments de grande portée.

En France, le parement extérieur de la couverture est fait :

- de petits éléments : tuile de terre cuite, tuile de béton, tuile bois, ardoise, tuile de verre ;
- de grands éléments : feuilles ou plaques métalliques (zinc, plomb, acier, cuivre, inox), plaques de ciment fibré, panneaux de méthacrylate ou polyester.

A l'échelle locale ou régionale, il convient de citer des modes constructifs basés sur des produits naturels comme le chaume ou la pierre volcanique mince (lauze par exemple).

L'épaisseur de ces parements extérieurs est de l'ordre de quelques centimètres.

On montre Figure 4-5 les trois types de couvertures rencontrées :



a) sans isolation

b) avec isolation intérieure

c) avec isolation extérieure

Figure 4-5 : Schéma des types de couvertures

Dans le cas où les combles ne sont pas aménagés, une isolation par rouleau peut être présente sur le plancher. Dans le cas où ils sont aménagés en pièces d'habitation, un complexe isolant réalisé à partir des mêmes produits que pour la façade est présent. Une première technique consiste à effectuer une isolation par l'intérieur entre les pannes et sous les chevrons. Le parement intérieur est assuré par des plaques de plâtre ou de bois. Une seconde technique consiste à isoler par l'extérieur en plaçant

l'isolant sur les chevrons (« sarking »). Accessoirement on peut trouver la présence d'un pare-vapeur entre la charpente et l'isolant.

Les toitures désignent les éléments d'ouvrage, à faible pente et placés au sommet de bâtiments de toute nature. Leur rôle est en particulier d'assurer l'étanchéité à l'eau de la construction. Il peut s'agir d'un plancher haut en béton, bois ou acier ou bien d'un dispositif léger comme les supports d'étanchéité en acier.

Le complexe de toiture est composé de l'intérieur vers l'extérieur (cf. Figure 4-6) :

- D'un élément porteur qui peut être constitué d'une charpente en métal, bois ou béton ;
- D'un isolant thermique de même nature que ceux appliqués en façade ;
- D'un écran imperméable garantissant l'étanchéité. Autrefois réalisé en plomb, ces revêtements sont désormais du type bitume ou asphalte ;
- Éventuellement d'une protection mécanique pour limiter les effets climatiques sur l'étanchéité et permettre l'accès piéton. Elle est réalisée soit avec un produit meuble (gravillons, végétalisation) ou dure (dalle). Son épaisseur est de quelques centimètres.

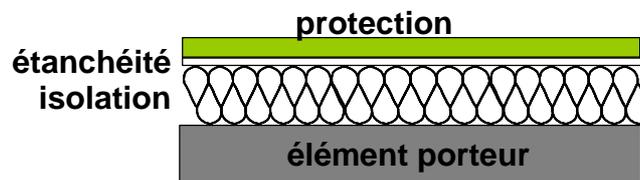


Figure 4-6 : Schématisation d'une toiture

4.2.4 Éléments de menuiserie extérieure

Pour décrire l'ensemble des menuiseries extérieures, il convient de considérer les produits de façades vitrées ou translucides et l'ensemble des matériaux qui forment les portes et les dispositifs d'occultation et contre-vents (volets, persiennes, jalousies,...). On inclut aussi dans ces éléments de menuiseries extérieures les façades-rideaux en verre qui sont placées sur les parois d'un bâtiment. Le matériau de base qui forme le châssis des menuiseries extérieures est le bois. L'acier est apparu au 19^{ème} siècle. Désormais on trouve aussi l'aluminium et le PVC.

De façon générale, les châssis vitrés sont en bois, en PVC ou en aluminium. Les baies vitrées coulissantes sont en métal.

Les portes sont généralement en bois et/ou avec un habillage en PVC ou métal. Un isolant pour le confort thermique et une plaque d'acier pour la protection mécanique sont communément présents. L'épaisseur courante des portes extérieures varie de 3 à 6 cm. Les portes anciennes en bois massif peuvent atteindre 12 cm. Les portes peuvent comporter un élément vitré : imposte, oculus,...

Le produit translucide le plus courant est le verre clair. Depuis une trentaine d'années, le verre est installé en deux ou trois couches dans le châssis de la menuiserie avec une lame d'air plus ou moins importante pour le confort thermique et acoustique. Néanmoins, de nombreux logements possèdent encore de simples vitrages.

La composition des doubles vitrages est donnée par 3 valeurs (en mm) :

- L'épaisseur de la feuille de verre extérieure ;
- L'épaisseur de la lame d'air ;
- L'épaisseur de la feuille de verre intérieure.

Le double vitrage assure un aspect neutre en réflexion et une grande transparence. L'évolution de la réglementation thermique a fait apparaître certains gaz neutres comme « matériau » de remplissage en lieu et place de la couche d'air.

A partir du double vitrage des améliorations sont encore possibles afin d'augmenter ses performances thermiques tout en conservant des propriétés lumineuses comme les vitrages à basse émissivité et à

haute ou basse transmission. Il s'agit de réduire les pertes de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur tout en conservant les pouvoirs de transparence. Ces procédés sont récents et encore peu implantés.

Nature	Épaisseur (mm)		
	Vitre 1	Lame d'air	Vitre 2
Simple vitrage	4		
Double vitrage standard	4	6	4
Double vitrage isolant	4	12	4

Tableau 4-8 : Dimensions de vitrage les plus courantes

Il existe aussi des verres à haute résistance mécanique et/ou thermique, il s'agit du :

- Verre trempé** : le verre fortement chauffé est refroidi brusquement par pulsion d'air. Ce verre a une très bonne résistance aux chocs thermiques (gradient de température de 200°C). Il se brise en morceaux très petits aux arêtes émoussées, limitant le risque de blessure ;
- Verre feuilleté** : c'est un assemblage constitué d'au moins deux feuilles de verre, liés intimement sur toute leur surface par un intercalaire qui est généralement un film plastique en butyral de polyvinyle (PVB). En cas de bris, l'adhérence verre-PVB permet aux fragments du vitrage cassé de rester en place pendant un certain temps ;
- Verre armé** : verre dans lequel ont été incorporés, au moment de la fabrication, des fils métalliques destinés à retenir les morceaux de verre en cas de bris mais ne participant pas à la résistance mécanique car le treillis réduit la résistance intrinsèque du verre.

Le verre trempé et le verre feuilleté ont des caractéristiques lumineuses identiques au verre clair, mais le verre feuilleté a une moindre résistance à la température du fait de la feuille PVB combustible.

Ces vitrages peuvent être montés en double vitrage avec un verre classique ou présentant des propriétés de réflexion ou d'absorption. Ils peuvent prendre place dans un système équipé d'une couche basse émissivité ou de gaz acoustique.

4.3 SYSTÈMES CONSTRUCTIFS ET DESTINATION DU BÂTIMENT

Comme indiqué dans l'introduction du §3.2, il apparaît peu réaliste de pouvoir répertorier l'ensemble des systèmes constructifs présents en France. De la même façon, il apparaît très difficile de dégager un système constructif type en fonction de la destination du bâtiment : habitation individuelle, collective, établissement recevant du public (ERP), bâtiment relevant du Code du Travail ou du Code de l'Environnement...

On tente de dégager ici les systèmes constructifs les plus rencontrés par type de bâtiment. Il ne s'agit nullement d'un répertoire exhaustif et caractéristique, mais bien d'une aide au technicien chargé du futur diagnostic des bâtiments.

On fournit en Annexe G un tableau qui estime la présence d'un produit ou d'un matériau, selon les critères de destination du bâtiment.

Pour les habitations, les innovations de la réglementation thermique ont beaucoup influencé le mode d'isolation. Une classification de l'habitation en fonction des périodes successives est possible, à savoir :

- La période avant la fin des années 60 ;
- Une période du début des règles en terme de confort thermique (de 1973 à 1977) ;
- La période des premières réglementations thermiques peu complexes et peu contraignantes (1977 puis 1988) ;
- La période des nouvelles réglementations issues de l'harmonisation européenne : RT 2000 puis RT 2005.

En analysant partie d'ouvrages par parties d'ouvrages, on remarque que pour la façade opaque le bloc de béton creux est prépondérant dans le résidentiel, alors qu'en ERP on emploie plus du béton banché ou des panneaux préfabriqués. Le secteur industriel, notamment en grand volume, privilégie les façades en parois légères avec des bardages simples et double peau. En résidentiel, le bardage en bois (panneau, clins ou tuile) est bien employé dans certaines régions. La couverture est une configuration d'ouvrage dominante dans le secteur de l'habitation alors qu'en ERP et Industrie, on utilise plutôt des toitures-terrasses. Les revêtements de terre cuite sont les plus courants en couverture. Pour les éléments de menuiserie, le choix du matériau est conduit par les capacités portantes du produit, ses caractéristiques thermiques et acoustiques, le système d'ouverture de la baie (les coulissants sont en métal), le contexte du projet (proximité d'un monument historique, par exemple) et enfin le prix. Au final, le bois et le PVC dominent le secteur résidentiel où l'on trouve également de l'aluminium. Ce dernier et le PVC sont fréquents dans le secteur tertiaire. Enfin, l'acier, plus performant mais plus onéreux est plutôt présent dans les projets pour lesquels on recherche des caractéristiques spécifiques, souvent des ERP ou des constructions industrielles.

Les tableaux ci-dessous les systèmes constructifs les plus courants rencontrés pour les bâtiments d'habitation, les ERP et les constructions industrielles.

HABITATION	Neuve et Récente (> 1990)	Semi-récente (> 1975)	Ancienne (< 1975)
Ossature porteuse	Bois, béton, acier	Bois, Béton	Bois
Façade opaque lourde	Enveloppe		
	Bloc de béton creux / briques creuse	Bloc de béton creux	Pierre, Bois, Terre
	Isolation		
	Laine de verre ou polystyrène	Polystyrène ou enduit plâtre	Enduit ou rien
Façade opaque légère	Enveloppe		
	Bois, pierre, terre cuite	Bois, fibre ciment	-
	Isolation		
	Laine de verre / polystyrène	Polystyrène	-
Couverture/Toiture	Charpente		
	Bois, métal	bois	Bois
	Isolation		
	laine de verre et polystyrène sous/sur chevrons	laine de verre sur plancher	-
	Revêtement		
	Terre cuite, ardoise	Terre cuite, ardoise	Terre cuite, ardoise
Menuiserie extérieure	Châssis		
	Bois, PVC, aluminium	Bois, PVC, aluminium	Bois
	Vitrage		
	Double/triple	Simple/double	Simple
	Porte		
	Bois, PVC, aluminium	Bois	Bois
Volet	Volet		
	Bois, PVC	Bois	Bois

Tableau 4-9 : Synthèse des typologies de constructions les plus courantes pour l'habitation

	ERP	Industrie
Ossature porteuse	Béton	Béton
Façade opaque lourde	Enveloppe	
	Béton Banché	Béton Banché
	Isolation	
	Laine de roche, Polystyrène	Laine de verre, Polystyrène
Façade opaque légère	Enveloppe	
	Béton, Bois	Acier
	Isolation	
	Polystyrène	Laine de verre, polystyrène
Couverture/Toiture	Charpente	
	Béton	Béton
	Isolation	
	Laine de roche, Polystyrène	Laine de roche, Polystyrène
	Revêtement	
	Zinc	Zinc
Menuiserie extérieure	Châssis	
	Acier, Aluminium, Bois	Acier, Aluminium, PVC
	Vitrage	
	Simple, Double	Simple
	Porte	
	Bois, PVC, aluminium	PVC, métal
	Volet	
	Bois, PVC, aluminium	

Tableau 4-10 : Synthèse des typologies de constructions les plus courantes pour les établissements recevant du public et les constructions industrielles

4.4 SYSTÈMES CONSTRUCTIFS ÉTUDIÉS

Avec l'ensemble de l'analyse des systèmes constructifs et des bâtiments, on dégage pour chaque partie d'ouvrages les systèmes qui seront étudiés et qui permettront d'effectuer une caractérisation globale des effets thermiques sur l'enveloppe des bâtiments.

Plusieurs hypothèses et choix ont été faits afin de réduire le champ d'investigation, le balayage exhaustif de l'ensemble des systèmes constructifs existants n'étant pas réaliste.

Pour les façades opaques lourdes, nous avons considéré que pour les pierres, une caractérisation de la pierre naturelle calcaire largement présente sur une grande partie du territoire permettait de correspondre à une part significative des constructions rencontrées.

Les dimensions retenues pour les blocs de béton plein seront aussi retenues pour les murs en béton, banchés et préfabriqués.

Pour le doublage isolant, nous avons considéré, le cas du polystyrène et de la laine de verre avec les épaisseurs les plus courantes. Notons que ces isolants s'accompagnent d'une plaque de plâtre pour rigidifier et maintenir l'ensemble.

Pour les façades opaques légères, seuls les bardages ont été pris en compte. Les parements ou vêtements ne sont pas considérés comme suffisamment isolants pour être une barrière au flux thermique du fait de leur faible épaisseur probable. Même hypothèse pour les enduits où seul l'aspect réaction au feu sera regardé.

Comme pour les façades lourdes, les isolants précédemment cités sont considérés. Dans le cas des façades légères viennent s'ajouter notamment la laine de roche et le polyuréthane.

Pour les couvertures, les deux modes d'isolation (intérieur et extérieur) sont étudiés avec les épaisseurs les plus communes.

Pour les éléments de menuiseries, il faut noter que seuls les vitrages simples et doubles sans performance thermique particulière seront examinés. L'emploi de vitrage performant est encore trop peu répandu et les données concernant leurs caractéristiques thermiques et lumineuses sont difficilement vérifiables.

L'ensemble de ces données est regroupé dans les tableaux ci-après.

		Épaisseurs étudiées (cm)										
Façade opaque lourde	Maçonnerie en pierre naturelle	Pierre calcaire	20	25	30	40	50	60	70	80		
	Maçonnerie en terre cuite	Brique pleine/perforée	9	12	15	19	23	25	28	34		
		Brique creuse	15	18	20	23	25	28				
		Bloc de terre cuite	15	20	22	25	30	33	35	37		
	Maçonnerie en béton	Bloc plein/perforée	20	23	25	28	30	35				
		Bloc creux	20	23	25	27,5						
		Bloc cellulaire	5	7	10	15	20	25	28	30	33	
	Mur en béton	Banché/Préfabriqué	20	23	25	28	30	35				
	Doublage isolant	Enduit plâtré	1									
		Polystyrène (+ plâtre)	4 (1)					8 (1)				
Laine de verre (+ plâtre)		4 (1,3)		6 (1,3)		8 (1,3)		10 (1,3)				

Tableau 4-11 : Systèmes constructifs étudiés pour les façades opaques lourdes

		Épaisseurs étudiées (cm)										
Façade opaque légère	Bardage simple peau	Acier	0,065									
		PVC	0,065									
		Bois	1,5					1,9				
		Pierre	0,5									
		Béton	0,5									
		Terre cuite	0,5					9				
	Bardage double peau	Acier	0,065									
		PVC	0,065									
	Âme isolante	Polystyrène	3	4	5	6	8	10	12	14		
		Laine de verre	3	4	5	6	8	10	12	14		
Laine de roche		3	4	5	6	8	10	12	14			
Polyuréthane		3	4	5	6	8	10	12	14			

Tableau 4-12 : Systèmes constructifs étudiés pour les façades opaques légères

		Épaisseurs étudiées (cm)				
Couverture/Toiture	Charpente	Bois	-			
		Métal	-			
	Revêtement	Terre cuite	1,2			
		Ardoise	1,2			
		Zinc	0,5			
	Doublage isolant intérieur	Polystyrène (+ plâtre)	10 (1,3)	12 (1,3)	14 (1,3)	16 (1,3)
		Laine de verre (+ plâtre)	10 (1,3)	12 (1,3)	14 (1,3)	16 (1,3)
		Laine de roche (+ plâtre)	10 (1,3)	12 (1,3)	14 (1,3)	16 (1,3)
		Polyuréthane (+ plâtre)	10 (1,3)	12 (1,3)	14 (1,3)	16 (1,3)
	Doublage isolant extérieur	Polystyrène (+ plâtre)	6 (1)	8 (1)	10 (1)	12 (1)
		Laine de verre (+ plâtre)	6 (1)	8 (1)	10 (1)	12 (1)
		Laine de roche (+ plâtre)	6 (1)	8 (1)	10 (1)	12 (1)
		Polyuréthane (+ plâtre)	6 (1)	8 (1)	10 (1)	12 (1)

Tableau 4-13 : Systèmes constructifs étudiés pour les couvertures/toitures

		Épaisseurs étudiées (cm)				
Menuiserie extérieure	Châssis	Bois	-			
		PVC	-			
		Aluminium	-			
	Vitrage	Simple vitrage	0,4			
		Double vitrage	0,4/0,6/0,4		0,4/1,2/0,4	
	Porte	Bois	3	4	5	6
		PVC	3	4	5	6
		Métal	3		4	
	Occultation / contrevent	Bois	-			
		PVC	-			
Métal		-				

Tableau 4-14 : Systèmes constructifs étudiés pour les menuiseries extérieures

5 CARACTÉRISATION DE LA PERFORMANCE DES BÂTIS EN FONCTION DU NIVEAU D'ALÉA THERMIQUE

On se propose d'évaluer la vulnérabilité spécifique des systèmes constructifs les plus couramment utilisés en fonction du niveau de l'aléa thermique et de sa cinétique.

5.1 MÉTHODOLOGIE

Cette caractérisation est réalisée en tenant compte des systèmes constructifs qui ont été dégagés dans le chapitre précédent, des critères retenus pour la sécurité des personnes et de l'échelle de flux thermique de référence retenue dans le cadre de cette étude.

Pour cela dans un premier point, on définit les critères qui permettent de caractériser les performances d'un système constructif vis-à-vis de la sécurité des personnes.

Ensuite, on précise les hypothèses faites sur les actions thermiques, les caractéristiques des matériaux et la modélisation pour réaliser la caractérisation de la performance des systèmes constructifs.

Enfin, on effectue l'évaluation proprement dite de la performance des parties d'ouvrages vis-à-vis de ces critères soumis aux niveaux d'intensité thermiques définis dans le guide méthodologique des PPRT.

On détermine ainsi le seuil critique d'effet thermique en dessous duquel le système ne présente pas un risque pour les personnes situées à l'intérieur pour un régime stationnaire de la sollicitation.

Néanmoins pour les façades opaques lourdes, qui constituent la partie la plus importante de l'enveloppe extérieure, il sera déterminé :

- d'une part, le seuil critique d'effet thermique en dessous duquel le système ne présente pas un risque pour les personnes situées à l'intérieur pour une durée de sollicitation de 2 h ;
- et d'autre part, le délai à partir duquel le système constructif n'assure plus la sécurité des personnes.

Enfin, on aborde l'effet des phénomènes instantanés sur l'enveloppe extérieur.

5.2 CRITÈRES RETENUS

A partir de l'étude bibliographique effectuée au chapitre 2, les effets d'un aléa thermique sur les personnes sont de trois types :

- Les effets du transfert de chaleur par conduction** : il est physiologiquement important seulement lorsque la peau est en contact direct avec les surfaces chaudes (poignées de porte, mur, etc.). Un contact d'une seconde avec le métal à 60°C peut causer des brûlures.
- Les effets du flux de chaleur convectif** : l'exposition d'une personne à un flux de chaleur convectif intense, de manière indirecte par l'intermédiaire des matériaux exposés peut provoquer des brûlures de la peau et des régions respiratoires. Le critère de tenabilité à retenir pour les effets indirects dépend principalement de l'hygrométrie de l'atmosphère. Lors d'une exposition prolongée notamment en cas de confinement du personnel, il est proposé de retenir une température de 60°C comme seuil limite d'exposition
- Les effets du flux de chaleur radiatif** : comme pour les gaz toxiques, un occupant exposé à un flux thermique peut être amené à accumuler une dose de chaleur radiative sur une certaine période de temps. Les seuils réglementaires de 3 et 5 kW/m² retenus pour les vies humaines sont adaptés pour une exposition de l'ordre de quelques minutes. Lors d'une exposition prolongée notamment en cas de confinement, il est proposé de retenir la valeur de

2,5 kW/m² comme seuil limite d'exposition. Pour les phénomènes à cinétique rapide, de l'ordre de la minute, on retiendra la valeur de dose 600 [kW/m²]^{4/3}.s pour les personnes.

On se propose alors de retenir comme critère une température de 60°C comme seuil limite d'exposition. Cette température ne devra pas être atteinte par les parois intérieures des locaux. A l'équilibre thermodynamique d'un local dont une des parois émet une température de 60°C, cette température sera atteinte par l'air ambiant. Cependant, cet équilibre peut prendre des heures en fonction de la surface de la paroi chaude et du volume de la pièce. On ne l'appliquera pas pour les éléments de menuiserie extérieure. Les façades translucides et vitrées ne représentant pas toujours une surface importante. La température de 60°C est en corrélation avec la température critique des effets conductifs.

Pour les effets du flux de chaleur radiatif, on retiendra la valeur de 2,5 kW/m² comme seuil limite d'exposition pour une période prolongée (supérieur à la minute). Une paroi opaque à 60°C ne pourra émettre un flux radiatif supérieur à 1 kW/m². Ce critère de flux radiatif s'applique aux flux radiatifs transmis au travers des éléments vitrés. Pour ces éléments vitrés et/ou translucides, on considèrera aussi la valeur de dose de 600 [kW/m²]^{4/3}.s pour les phénomènes instantanés.

Mais les effets directs de l'aléa thermique sur les biens entraînant un effet indirect sur les personnes sont aussi à prendre en considération. Ils sont de deux ordres :

- La non-propagation du feu** : la non inflammation des produits combustibles doit elle être vérifiée. On s'aidera pour cela de la base de données de réaction au feu des matériaux proposés en annexe. Ce critère ne s'appliquera qu'aux produits de façades légères incombustibles. Afin de préserver le critère de température en face non exposée inférieure à 60°C, il faut aussi considérer les températures pour lesquelles les produits isolants se dégradent fortement pouvant laisser le passage direct du flux émis par les phénomènes dangereux. De la même façon, on se réfère à la base de données matériaux en annexe.
- La non-ruine du bâtiment** : il concerne les éléments de la structure porteuse. Ces éléments étant généralement protégés par l'enveloppe extérieure, il s'agit de vérifier que l'échauffement ne puisse provoquer une perte des capacités porteuses. Des valeurs critiques sont donc employées. Pour les structures en bois la température d'auto inflammation de 300°C est retenue. Pour les structures métalliques comme pour les structures béton comprenant une armature métallique, on vérifie que température critique de 500°C de l'acier (des armatures) n'est pas atteinte.

En conclusion, les seuils des effets thermiques à retenir pour les bâtiments sont :

- La non-inflammation des matériaux combustibles en façade ;
- Une température en face non exposée de la façade inférieure à 60°C ;
- Un flux radiatif traversant les éléments translucides inférieure à 2,5 kW/m² pour les phénomènes à cinétique lente ;
- Une dose thermique de 600 [kW/m²]^{4/3}.s pour les phénomènes à cinétique rapide pour les éléments translucides ;
- La non-dégradation significative des matériaux isolants ;
- Des températures critiques des éléments porteurs non atteintes.

D'autres critères intéressants pour l'évaluation de la performance des systèmes constructifs pourront apparaître au cours de la caractérisation.

5.3 HYPOTHÈSES

Les critères retenus dans cette caractérisation sont de type thermique. Il est donc fait appel à un modèle de transfert thermique résolvant l'équation générale de conduction pour un matériau isotropique :

avec λ : conductivité thermique (W/m²/K)
 C_p : chaleur spécifique (J/kg/K)
 Q : transfert de chaleur (W)

ρ : masse volumique (kg/m³)

Dans le contexte d'une analyse monodimensionnelle, l'équation à résoudre se limite à :

$$\rho(T).C_p(T). \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{d\lambda}{dT} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + Q$$

Le modèle doit tenir compte de la variation des propriétés thermiques des matériaux en fonction de la température pour tenir compte de leur modification à différentes températures.

Certains matériaux sont déjà connus et normalisés. Bien qu'il existe une certaine variation de leurs propriétés, il s'avèrera judicieux de retenir les propriétés citées dans les normes. Ainsi pour l'acier, on emploiera les propriétés thermiques en fonction de la température données par l'Eurocode 3 partie 1.3 et pour le béton, celles données par l'Eurocode 2 partie 1.2.

Les propriétés des autres matériaux seront issues de la bibliographie et des bases de données du LNE et d'Efectis France dans le cadre de leur activité de laboratoire.

Le modèle doit tenir compte des conditions aux limites de type radiatives et convectives.

Les flux radiatifs de 3, 5 et 8 kW/m² correspondant aux premiers niveaux d'aléas thermiques défini dans le guide des PPRT seront appliquées instantanément et pour un régime permanent jusqu'à obtention d'une température d'équilibre dans le matériau. Des flux plus importants de 12, 16, 20 et 32 peuvent aussi être examinés.

Les flux seront appliqués en face exposée avec un coefficient d'échange convectif relativement modéré de 10 W/m².K car les phénomènes rencontrés impliquent principalement des échanges par rayonnement. Des coefficients d'absorption et d'émissivité de 1 sont choisis de manière sécuritaire. Tout le flux incident est absorbé par l'enveloppe.

Sur la face non exposée, une condition de température à 20°C est fixée avec une condition d'échange prenant en compte la perte d'énergie par rayonnement en milieu ouvert. De façon sécuritaire, un coefficient d'émissivité de 1 est pris : la paroi rayonne comme un corps noir à la température atteinte.

	Absorption (-)	Émissivité (-)	Convection (W/m ² .K)
Face exposée	1	1	10
Face non exposée	-	1	4

Tableau 5-1 : Coefficients considérés pour les transferts thermiques

5.4 CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

Du fait de la grande variété des produits de construction, ces différents seuils sont très variables en fonction des produits et il n'est pas possible d'obtenir une relation unique entre le délai d'inflammation et le flux thermique. De plus, ce type de relation, éventuellement définissable par famille de produit, est valable pour les flux élevés.

Pour des flux faibles, au-dessous de 10 kW/m², l'occurrence de l'inflammation est souvent limitée par les pertes thermiques. Elle considère en plus une surface infiniment exposée durant un temps infini et est ainsi difficilement transposable aux situations réelles.

L'interrogation des bases de données du LNE a néanmoins permis d'établir les relations suivantes entre flux et délai d'inflammation.

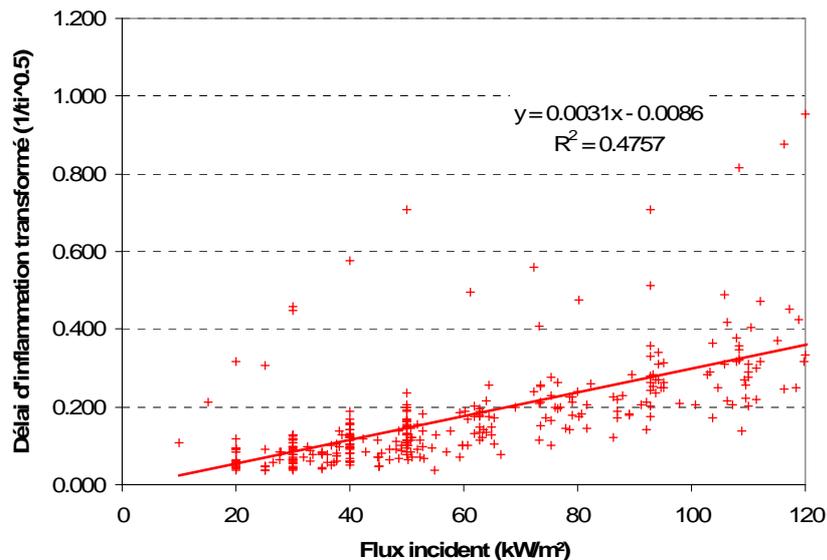


Figure 5-1 : Courbes d'inflammation des matériaux combustibles

Les données, issues des bases de donnée du LNE et concernant plus de 4000 entrées, sont résumées ci-dessous par famille de produits :

Famille	Relation $\sqrt{\frac{1}{t_i}} = aQ''_e + b$			CHF	TRP
	a	b	r ²		
Polyacryliques	0.002824	-0.008865	0.845	3.1	400
Polyamides	0.001864	0.000211	0.933	NA	605
Polycarbonates	0.001661	-0.00585	0.989	3.5	679
Polyesters	0.002611	-0.001357	0.663	NA	432
Polyoléfines	0.001832	0.017009	0.780	NA	616
Polystyrènes	0.002201	0.037078	0.735	NA	513
Polyuréthanes (rigides denses)	0.003108	-0.05595	0.989	18.0	363
Polyuréthanes (souples)	0.015635	-0.055883	0.914	3.6	72
Polymères chlorés	0.003046	-0.011573	0.804	3.8	370

Tableau 5-2 : Caractéristiques des courbes d'inflammation en fonction de la famille du combustible (CHF : flux critique d'inflammation, TRP : Température de réponse)

Les régressions présentées ne permettent pas dans tous les cas de calculer le flux critique (l'impossibilité de réaliser ce calcul est liée à la différence entre le flux minimum d'inflammation et le flux critique). On indique alors dans le Tableau 5-3, les températures de début de dégradation mécanique et de début d'inflammation des matériaux courants, ainsi que les utilisations principales de ces matériaux dans le cas du bâtiment. Ces valeurs proviennent de la littérature ou d'essais réalisés au LNE.

En outre, des essais menés au sein d'Efectis France sur des panneaux en âme isolante ont montré des pertes de performances du complexe en fonction de la nature de l'isolant, soit :

- Ame isolante en polystyrène : $\leq 3 \text{ kW/m}^2$;
- Ame isolante en polyuréthane : $\leq 5 \text{ kW/m}^2$;
- Ame isolante en laine de verre : $\leq 8 \text{ kW/m}^2$;
- Ame isolante en laine de roche : $> 12 \text{ kW/m}^2$

Les isolants en laine de verre sont très performants avec des températures de dégradation de l'ordre de 400°C pour la laine de verre et 750°C pour la laine de roche.

On note que le PVC présente une faible valeur de flux de dégradation mécanique (1 kW/m^2) et forte d'inflammation (15 kW/m^2), indiquant une lente dégradation (craquelage, gonflement,...). On retient alors sa température de début de pyrolyse (à partir de 175°C) comme critère, soit un flux de 3 kW/m^2 .

Dénomination		Température de dégradation (°C)		Flux de dégrad. kW/m ²	Température d'inflammation (°C)		Flux critique kW/m ²	Utilisation
		de	a		de	à		
Polyamides	PA	176	265	2.6	410		12.3	Électroménager, interrupteurs et prises de courant
Copolymère Acrylonitrile / butadiène / styrène	ABS	88	125	1.1	388		10.8	Électroménager, boîtiers téléviseurs et PC
Polyéthylène	PE PEHD PEBD	110	135	1.4	350	380	8.5	-
Polypropylène	PP PPHD PPBD	162	168	2.4	330	350	7.5	-
Polystyrène	PS	90	160	1.2	410	480	12.3	Emballages, ameublement, panneaux isolants de construction
Polychlorure de vinyle	PVC	75	105	0.9	450	500	15.5	Tuyauteries, profilés de fenêtre, gouttières
Polyméthacrylate de méthyle	PMMA	190	240	3	265	311	4.8	-
Polyéthylène téréphtalate	PET	255		4.9	350	410	8.5	Pièces électriques, cafetières, grille-pain, bouteilles
Polyoxyméthylène	POM	164	177	2.3	280	-	5.3	Robinetterie, électroménager
Polytétrafluoroéthylène	PTFE	320	340	7.8	700	-	50.8	Petites pièces techniques
Polyuréthane	PU PUR	170		2.4	272	500	5	Panneaux isolants de construction, meubles rembourrés
Polyisocyanurate	PIR	200		3.2	445		15.1	Panneaux isolants de construction
Polycarbonate	PC	-	-	-	420	480	13.1	Éléments de toiture, lanterneaux
Caoutchoucs	EPDM	-	-	-	310	440	6.6	-
Bois		250		4.7	340	500	8	Construction

Tableau 5-3 : Température et flux de dégradation mécanique et d'inflammation des familles de matériaux combustibles

5.5 CARACTÉRISATION DES ÉLÉMENTS DE LA STRUCTURE PRINCIPALE

A la vue de l'étude présentée en détail dans l'annexe H, nous constatons que l'échauffement de la structure porteuse métallique d'un bâtiment dépend principalement de la nature de son enveloppe externe. De plus, il est montré qu'un rayonnement énergétique de 25 kW/m² correspond au seuil critique d'un profilé métallique non protégé ; or, la structure métallique d'un bâtiment est généralement protégée par son enveloppe externe. On peut étendre cette analyse à tout type de structure de bâtiment protégé non directement exposé.

Concernant les structures en béton directement exposés à l'aléa thermique sur 4 faces, on fixe comme critère la non-atteinte par les armatures en acier de la température critique de 500°C.

Les calculs de transfert thermique (cf. Figure 5-2) dans un milieu semi infini en béton soumis à des flux thermiques radiatifs importants et constants, montrent que pour des flux inférieurs à 25 kW/m² l'épaisseur d'enrobage nécessaire est inférieure à l'épaisseur d'enrobage minimale prescrit dans l'Eurocode 2 partie 1.1 pour une structure béton.

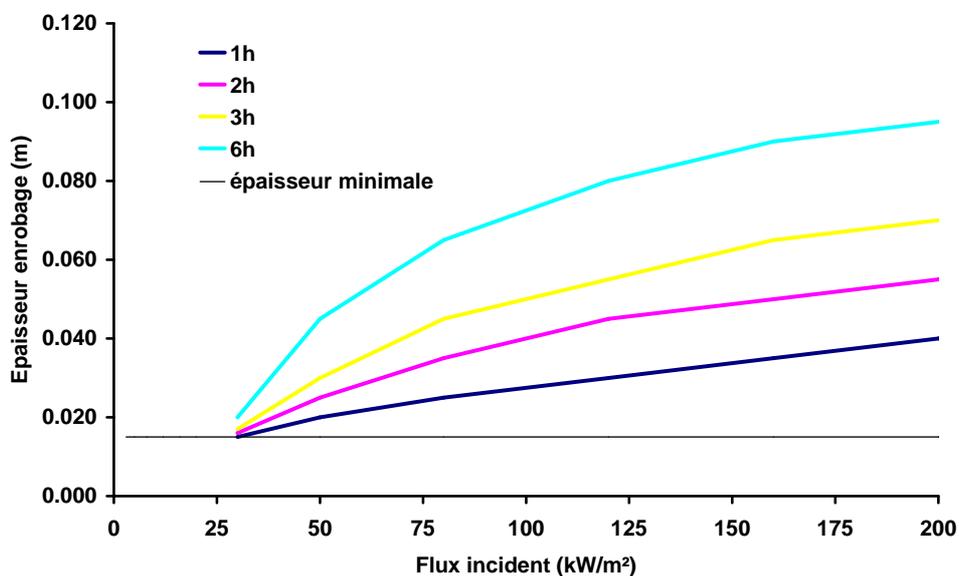


Figure 5-2 : Épaisseur d'enrobage minimale pour différents temps d'exposition à des flux radiatifs dans le béton

Pour des flux incidents inférieurs à 25 kW/m², il n'y a pas de contraintes sur la performance des structures en béton exposée 4 faces.

De plus, les seuils critiques d'effets thermiques préconisés pour les structures dans l'arrêté du 29 septembre 2005 [16] relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation, ont été définis dans le cadre d'une approche « Structurelle » et non dans une approche « Équipement ». Dans le cadre d'une approche « Équipement » telle qu'elle est proposée dans ce rapport, la problématique est basée sur la réponse thermomécanique de l'enveloppe externe (écran thermique) et non sur la structure porteuse qui n'est généralement pas directement exposée (protection par l'enveloppe externe du bâtiment).

Il est par conséquent proposé de ne pas retenir de seuil d'effets critiques définis pour les structures dans l'arrêté du 29 septembre 2005 [16] et de différencier :

- Les bâtiments ;
- Les installations comme des réservoirs de stockage ou des canalisations ;
- Les structures directement exposées.

Pour ces cas il est proposé :

- De conserver le seuil de 16 kW/m² uniquement pour des installations métallique en acier du type : canalisations, ou réservoirs de stockage ;
- De retenir le seuil de 25 kW/m², pour les structures en acier directement exposées, du type pont de tuyauterie, support de canalisation ou encore les structures extérieures.
- De retenir le seuil de 8 kW/m², pour les structures en bois directement exposées du type structures extérieures ;
- De retenir le seuil de 8 kW/m², pour les structures en aluminium directement exposées du type structures extérieures, ou les structures porteuses des CTS ;
- Et de ne pas retenir de seuil d'effets critiques pour les structures protégées (aluminium, bois, béton, acier) par l'enveloppe externe du bâtiment.

En conséquence, la caractérisation de la performance des systèmes constructifs ne sera pas prospectée pour des flux supérieurs à 12 kW/m². Une étude spécifique de stabilité devant être faite pour ces cas.

5.6 CARACTÉRISATION DES FAÇADES OPAQUES LOURDES

La performance des façades opaques lourdes est principalement liée au critère de 60°C en face non exposée pour des valeurs de flux faibles (< 5 kW/m²) ou d'épaisseurs importantes d'isolant. Les critères de dégradation de l'isolant (cf. Tableau 5-3) sont généralement atteints pour des flux importants et des épaisseurs faibles de mur.

On indique dans les tableaux ci-après, le flux radiatif incident maximal pouvant être accepté par le système constructif en fonction de l'épaisseur de l'enveloppe extérieure et de la nature et de l'épaisseur de l'isolant. Lorsqu'un flux supérieur à 12 kW/m² est acceptable, on indique la valeur de 12*, pour signifier que bien que le critère d'isolation soit vérifié, celui de stabilité structurelle ne l'est pas.

Pour le cas de façade opaque en pierre naturelle, on constate qu'une épaisseur minimale de 50 cm de pierre est nécessaire pour supporter un flux incident de 3 kW/m² ; Dès lors qu'un isolant est placé sur la face extérieure, des flux de 8, 12 et supérieur à 12 kW/m² sont tolérables. Pour un mur sans isolant, il faut une épaisseur de 80 cm pour accepter un flux incident de 8 kW/m².

		Épaisseur doublage isolant (cm)							
		0	Enduit (Plâtre)	Polystyrène (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Polystyrène (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)
		0	1	4 (1)	4 (1,3)	6 (1,3)	8 (1)	8 (1,3)	10 (1,3)
Épaisseur mur extérieur (cm)	20	< 3	< 3	8	12*	12*	12	12*	12*
	25	< 3	< 3	8	12*	12*	12*	12*	12*
	30	< 3	< 3	8	12*	12*	12*	12*	12*
	40	< 3	3	12	12*	12*	12*	12*	12*
	50	3	5	12*	12*	12*	12*	12*	12*
	60	5	5	12*	12*	12*	12*	12*	12*
	70	5	8	12*	12*	12*	12*	12*	12*
	80	8	12*	12*	12*	12*	12*	12*	12*

Tableau 5-4 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour une façade opaque en pierre naturelle

Dans le cas des murs en briques pleines, perforées (Tableau 5-5) ou creuses (Tableau 5-6), et, on remarque que les murs sans isolant ne peuvent supporter un flux supérieur à 3 kW/m² malgré de fortes épaisseurs. Une simple plaque en polystyrène de 4 cm permet de porter le flux maximal incident à 8 kW/m². Pour supporter un flux supérieur ou égal à 12 kW/m², des épaisseurs de laine de

verre supérieures à 6 cm sont nécessaires. On remarque que l'isolation par polystyrène est moins performante que par laine de verre.

Épaisseur doublage isolant (cm)



		0	Enduit (Plâtre)	Polystyrène (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Polystyrène (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)
		0	1	4 (1)	4 (1,3)	6 (1,3)	8 (1)	8 (1,3)	10 (1,3)
Épaisseur mur extérieur (cm)	9	< 3	< 3	3	8	12	8	12*	12*
	12	< 3	< 3	5	8	12	8	12*	12*
	15	< 3	< 3	5	8	12*	8	12*	12*
	19	< 3	< 3	5	8	12*	12	12*	12*
	23	< 3	< 3	5	12*	12*	12	12*	12*
	25	< 3	< 3	5	12*	12*	12	12*	12*
	28	< 3	< 3	5	12*	12*	12	12*	12*
	34	3	3	8	12*	12*	12*	12*	12*

Tableau 5-5 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour une façade opaque en briques pleines ou perforées

Épaisseur doublage isolant (cm)



		0	Enduit (Plâtre)	Polystyrène (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Polystyrène (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)
		0	1	4 (1)	4 (1,3)	6 (1,3)	8 (1)	8 (1,3)	10 (1,3)
Épaisseur mur extérieur (cm)	15	< 3	< 3	5	8	12*	12	12*	12*
	18	< 3	< 3	5	12	12*	12	12*	12*
	20	< 3	< 3	5	12	12*	12	12*	12*
	23	< 3	< 3	5	12	12*	12	12*	12*
	25	< 3	< 3	8	12	12*	12	12*	12*
	28	< 3	< 3	8	12	12*	12*	12*	12*
	33	< 3	< 3	8	12*	12*	12*	12*	12*

Tableau 5-6 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour une façade opaque en briques creuses

Épaisseur doublage isolant (cm)



		0	Enduit de Plâtre	Polystyrène et Plaque de Plâtre	Laine de verre et Plaque de Plâtre	Laine de verre et Plaque de Plâtre	Polystyrène et Plaque de Plâtre	Laine de verre et Plaque de Plâtre	Laine de verre et Plaque de Plâtre
		0	10	40 + 10	40 + 13	60 + 13	80 + 10	80 + 13	100 + 13
Épaisseur mur extérieur (cm)	15	3	3	8	12*	12*	12*	12*	12*
	20	5	5	12*	12*	12*	12*	12*	12*
	22	5	8	12*	12*	12*	12*	12*	12*
	25	8	8	12*	12*	12*	12*	12*	12*
	30	12	12	12*	12*	12*	12*	12*	12*
	33	12*	12*	12*	12*	12*	12*	12*	12*
	35	12*	12*	12*	12*	12*	12*	12*	12*
	37	12*	12*	12*	12*	12*	12*	12*	12*

Tableau 5-7 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour une façade opaque en bloc de terre cuite

Les façades opaques en bloc de terre cuite présentent des performances bien meilleures que les briques (cf. Tableau 5-7). A partir d'un simple ajout d'un isolant en polystyrène de 4 cm, ce système constructif peut tolérer des flux supérieurs à 8 kW/m².

Pour les façades en bloc de béton plein (ou perforé ou banché) et creux, l'application d'un enduit plâtré en face intérieure permet d'obtenir un flux incident maximal de 3 kW/m² seulement. Avec une isolation de 4 cm en polystyrène, on obtient un flux de 5 kW/m² et 8 kW/m² voire 12 kW/m² avec la même isolation en laine de verre.

Épaisseur doublage isolant (cm)



Épaisseur mur extérieur (cm)	Épaisseur doublage isolant (cm)							
	0	Enduit (Plâtre)	Poly-styrène (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Poly-styrène (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)
	0	1	4 (1)	4 (1,3)	6 (1,3)	8 (1)	8 (1,3)	10 (1,3)
20	< 3	3	5	8	8	8	12*	12*
23	< 3	3	5	8	12*	12	12*	12*
25	< 3	3	5	12	12*	12	12*	12*
28	< 3	3	5	12	12*	12	12*	12*
30	< 3	3	5	12	12*	12	12*	12*
35	< 3	3	5	12	12*	12	12*	12*

Tableau 5-8 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour une façade opaque en béton banché ou bloc de béton plein et perforés.

Épaisseur doublage isolant (cm)



Épaisseur mur extérieur (cm)	Épaisseur doublage isolant (cm)							
	0	Enduit (Plâtre)	Poly-styrène (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Poly-styrène (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)
	0	1	4 (1)	4 (1,3)	6 (1,3)	8 (1)	8 (1,3)	10 (1,3)
20	< 3	3	5	12	12*	12	12*	12*
23	< 3	3	5	12	12*	12	12*	12*
25	< 3	3	5	12	12*	12	12*	12*
28	< 3	3	8	12	12*	12	12*	12*

Tableau 5-9 : Flux radiatif incident maximal pour le critère de température de 60°C pour une façade opaque en bloc de béton creux.

Épaisseur doublage isolant (cm)

Épaisseur mur extérieur (cm)	Épaisseur doublage isolant (cm)							
	0	Enduit (Plâtre)	Polystyrène (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Polystyrène (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)
	0	1	4 (1)	4 (1,3)	6 (1,3)	8 (1)	8 (1,3)	10 (1,3)
5	< 3	< 3	5	8	12	12*	12*	12*
7	< 3	3	5	12	12	12*	12*	12*
10	3	3	8	12*	12*	12*	12*	12*
15	5	5	12	12*	12*	12*	12*	12*
20	8	8	12*	12*	12*	12*	12*	12*
25	12	12*	12*	12*	12*	12*	12*	12*
28	12*	12*	12*	12*	12*	12*	12*	12*
30	12*	12*	12*	12*	12*	12*	12*	12*
33	12*	12*	12*	12*	12*	12*	12*	12*

Tableau 5-10 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour une façade opaque en bloc de béton cellulaire

Comme le bloc de terre cuite pour les briques, le béton cellulaire est un matériau plus performant vis-à-vis du critère de température en face non exposé. Pour de faibles épaisseurs et avec une isolation de 4 cm en laine de verre, des flux maximaux incidents de 8 kW/m², voire de 12 kW/m² peuvent être acceptés.

Les résultats montrent donc que pour un régime permanent, c'est-à-dire une application permanente du flux incident, la plupart des façades opaques lourdes nécessitent la présence d'un doublage isolant pour tolérer des niveaux d'aléa thermique supérieur à 3 kW/m². Très peu de façades nues ou faiblement isolées ne peuvent accepter un niveau d'aléa faible.

Ces délais au bout duquel un des critères est atteint, peuvent être importants. On fournit dans le Tableau 5-11 pour les épaisseurs et le doublage isolant les plus courants, les délais minimum d'atteinte d'un des critères en fonction du flux incident. On constate ainsi que dans la plupart des cas avec isolant, les critères ne sont jamais atteints avant deux heures de sollicitations sauf pour le cas du béton cellulaire.

La plupart des matériaux sans isolant peuvent tolérer toutes les sollicitations avant 60 minutes, sauf pour le béton cellulaire et la brique. En fait, les matériaux présentant des caractéristiques thermiques à l'équilibre (temps infini) les moins performantes, montrent une inertie thermique suffisamment importante pour ralentir l'échauffement du matériau.

	Φ (kW/m ²)	Temps (min.)															
		3				5				8				12			
		sans isolant*				avec isolant											
Ép. (cm)	3	5	8	12	3	5	8	12	3	5	8	12					
Pierre naturelle	20	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120				
Brique pleine/perforée	9	100	90	50	60	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120				
Briques creuse	15	>120	>120	110	100	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120				
Bloc de terre cuite	15	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120				
Bloc de béton plein ou banché	20	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120				
Bloc de béton creux	20	>120	>120	>120	100	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120	>120				
Bloc de béton cellulaire	5	50	30	20	16	>120	>120	70	50	>120	>120	>120	>120				

(*) ou avec enduit de plâtre

Tableau 5-11 : Délai minimum d'atteinte d'un critère pour les épaisseurs les plus courantes

En conclusion, dans une approche sécuritaire et stationnaire on constate que les façades opaques dès lors qu'elles possèdent un doublage isolant supérieur à 4 cm peuvent tolérer des flux radiatifs incidents supérieurs ou égaux à 5 kW/m².

Sauf certains matériaux comme le bloc de béton cellulaire ou de terre cuite pour des épaisseurs importantes, les façades opaques lourdes nues ou avec un enduit en face intérieure ne peuvent accepter un flux incident supérieur à 3 kW/m² vis-à-vis du critère de température de 60°C.

Néanmoins les délais où ces façades opaques atteignent le critère de température sont supérieurs à 2h de sollicitation du niveau de flux thermique.

5.7 CARACTÉRISATION DES FAÇADES OPAQUES LÉGÈRES

Dans le cas des façades opaques légères trois critères doivent être vérifiés : la température en surface non exposée, la température d'auto-inflammation pour les matériaux combustibles et la température de dégradation significative de l'âme isolante.

Pour les bardages à simple peau, on fait les hypothèses suivantes :

- ❑ L'épaisseur du bardage est supposée infiniment mince relativement aux autres échelles
- ❑ Le flux incident est complètement absorbé ;
- ❑ La convection est négligée en face exposée ;
- ❑ Une lame d'air est située en face non exposée où les effets convectifs ne sont pas négligés ;
- ❑ Le flux radiatif émis en face non exposée est dû uniquement à la température du matériau.

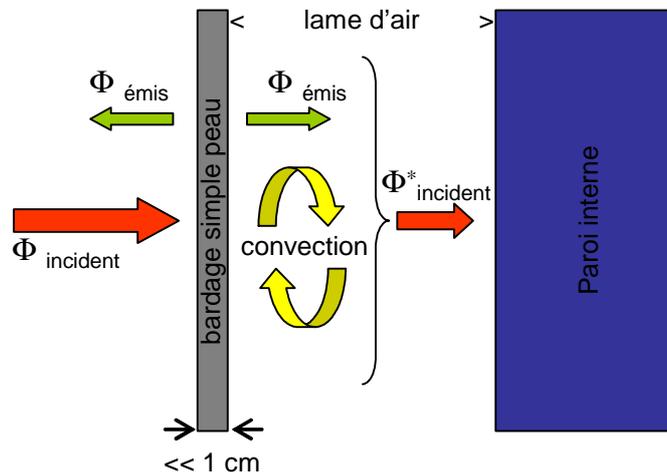


Figure 5-3 : Bardage simple peau devant une façade opaque lourde (façade-rideau)

On obtient alors les valeurs de températures et de flux émis par la surface quelque soit le matériau :

Flux incident (kW/m ²)	Température (°C)	Flux réémis (kW/m ²)
3	130	< 3
5	185	3
8	242	5
12	297	8

Tableau 5-12 : Température et flux pour un bardage simple peau

On constate alors que dans tous les cas, aucun bardage simple peau ne tolère un flux incident de 3 kW/m² vis-à-vis du critère de 60°C. Néanmoins dans le cas où le bardage simple peau est un habillage devant un mur (cf. façade-rideau Figure 5-3), la valeur du flux émis en façade non exposée doit être employée comme valeur de flux incident sur ce mur pour évaluer la performance de la façade.

Pour le cas particulier des bardages en bois (panneaux, clins, lamelles, tuile,...), l'habillage se fait devant une façade légère composée d'un complexe isolant. On indique dans le Tableau 5-13 les valeurs de flux radiatif incident maximal acceptable pour les deux essences de bois et les deux épaisseurs de matériaux les plus courantes, en tenant compte du flux critique d'inflammation du bois de 8 kW/m² défini dans le Tableau 5-3.

Le Tableau 5-14 présente les valeurs des flux radiatifs incidents maximaux acceptables pour les bardages double peau incombustible en fonction de la nature de l'âme isolante et de son épaisseur. La performance tient compte du critère de température de 60°C en face non exposée et des critères de dégradation significative des isolants fournis au paragraphe §5.4. Le polyuréthane apparaît comme l'isolant le plus performant. Il faut atteindre des épaisseurs de 10 cm pour que le critère de 60°C ne soit pas atteint.

Pour les panneaux de bardage en matériau plastique, les valeurs de flux critiques d'inflammation indiquées Tableau 5-3 sont retenues.

		Épaisseur doublage isolant (cm)						
		Polystyrène (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Polystyrène (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	Laine de verre (Plâtre)	
		4 (1)	4 (1,3)	6 (1,3)	8 (1)	8 (1,3)	10 (1,3)	
Feuillus Résineux	Épaisseur du bardage (cm)	1,5	5		8	5	8	8
		1,9	5		8	5	8	8
		1,5	5		8	5	8	8
		1,9	5		8	5	8	8

Tableau 5-13 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour les murs de bardage bois (feuillus et résineux) avec doublage isolant

		Épaisseur âme isolante (cm)							
		3	4	5	6	8	10	12	14
Nature de l'isolant	Polystyrène	< 3	3	3	3	3	3	3	3
	Laine de verre	3	3	3	5	8	8	8	8
	Laine de roche	3	3	5	5	8	12	12*	12*
	Polyuréthane	5	5	5	5	5	5	5	5

Tableau 5-14 : Flux radiatif incident maximal acceptable pour les bardages double peau en fonction de la nature de l'âme isolante et de son épaisseur

Rappelons, que les flux inférieurs ou égaux à 12 kW/m² ne remettent pas en cause l'intégrité des fixations des bardages.

En conclusion, la caractérisation des façades opaques légères nous montre, vis-à-vis de la sécurité des personnes que :

- Les bardages simple peau ne peuvent tolérer des flux incidents supérieurs à 3 kW/m². Dans le cas où ce bardage simple peau est employé en tant que façade-rideau devant une façade opaque lourde, la performance de cette dernière devra être étudiée avec la nouvelle valeur de flux incident ;
- Le bardage simple peau en bois devant une façade légère en complexe isolant ne peut tolérer un flux supérieur à 8 kW/m² ;
- Les bardages double peau ou panneau sandwich peuvent tolérer des flux jusqu'à 12 kW/m² pour des âmes isolantes en laine de roche.

5.8 CARACTÉRISATION DES TOITURES ET COUVERTURES

Pour la caractérisation des performances des toitures et terrasse, on applique la même méthodologie que pour les façades opaques légères.

Les parements extérieurs de couverture (tuiles) font le même office que les bardages simple peau. Ainsi dans le cas d'une charpente en bois, le flux de 12 kW/m² provoque l'inflammation des éléments de charpente.

En outre, en tenant compte du Tableau 5-12, il s'agit d'évaluer la performance du doublage isolant sous un flux incident réduit indépendamment de la nature de parement.

L'évaluation de la valeur du flux radiatif incident maximal pour le critère de température de 60°C pour les couvertures a montré que tous les systèmes d'isolation des couvertures définis dans le §4.2.3 peuvent tolérer un flux maximal de 12 kW/m².

On indique la performance d'une couverture en charpente bois en fonction de la nature de l'isolant et pour une épaisseur supérieur à 6 cm.

		Nature de l'isolant			
		Polystyrène	Laine de verre	Laine de roche	Polyuréthane
Flux incident (kW/m ²)	3	NA	NA	NA	NA
	5	A	NA	NA	NA
	8	A	NA	NA	A
	12	A	A	A	A

Tableau 5-15 : Performance d'une couverture en charpente bois en fonction de la nature de l'isolant (NA : critères non atteints, A : critères atteints)

Pour une couverture à charpente métallique, un flux de 12 kW/m² est toléré si l'isolant est en laine de roche. Notons que pour les charpentes sans isolation (combles non aménagés), une charpente en bois ne peut tolérer un flux supérieur à 8 kW/m² et une charpente métallique un flux supérieur à 12 kW/m².

Concernant les toitures-terrasses sans protection mécanique, la caractérisation de la performance est identique à celle des bardages double peau pour des épaisseurs de 10, 12 et 14 cm avec une acceptation des flux supérieurs à 8 kW/m² seulement pour les âmes isolantes en laine de verre ou de roche. Dans le cas où la toiture posséderait une protection mécanique de quelques centimètres en béton ou acier, les performances ne sont pas significativement changées. Pour des protections particulières, il faudra étudier spécifiquement le système. La non inflammation du revêtement d'étanchéité devra être vérifiée.

5.9 CARACTÉRISATION DES MENUISERIES EXTÉRIEURES

Les menuiseries extérieures comprennent :

- Les châssis ;
- Les vitrages ;
- Les portes ;
- Les occultations et contrevents.

Les éléments translucides en matériaux combustibles (polycarbonate, polypropylène, PMMA, ...), du fait de leur faible valeur de température de dégradation (formation de trous, ruine des fixations,..), ne peuvent tolérer un flux supérieur à 3 kW/m² sans causer de risque pour les personnes.

Pour les produits verriers, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de transmission du verre pour tout rayonnement incident. En effet, le verre n'est pas complètement transparent à l'énergie de rayonnement, qu'il soit visible ou invisible. Une partie en est réfléchi, une autre partie est absorbée produisant de la chaleur, et seul le reste est transmis. Les proportions de ces facteurs dépendent de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence de la radiation et des caractéristiques du verre.

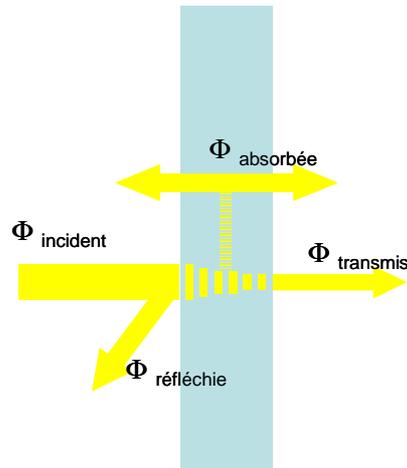


Figure 5-4 : Transferts radiatifs sur une surface vitrée

Le coefficient de transmission à travers le verre clair ordinaire en fonction de la longueur d'onde est donné Figure 5-5.

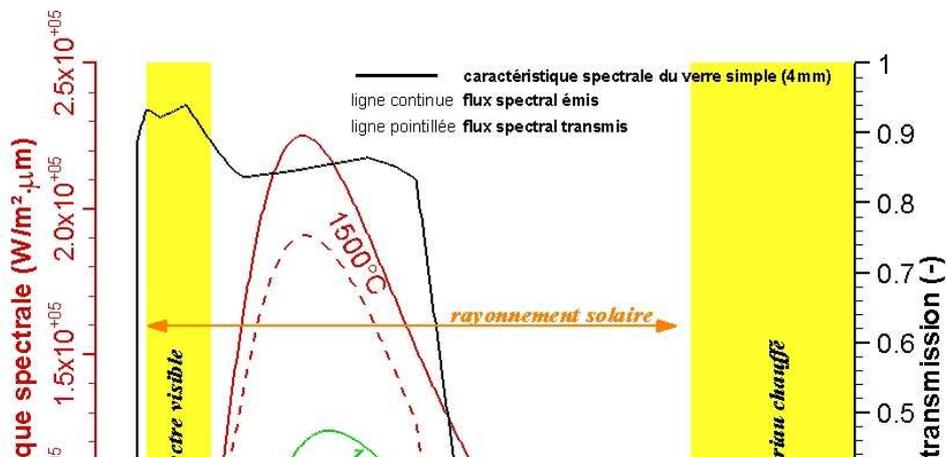


Figure 5-5 : Coefficient de transmission du verre clair et flux spectraux émis et transmis pour différentes températures de flamme issue d'un phénomène dangereux

Les vitres ordinaires laissent passer fortement le rayonnement incident pour les longueurs d'ondes comprises entre 0,35 et 2,7 μm avec un coefficient de transmission égal à 0,9. Par contre, pour les longueurs d'ondes comprises entre 2,7 et 4,25 μm , le coefficient de transmission est égal à 0,32. Le verre ordinaire laisse passer le rayonnement incident de façon plus modeste dans ce cas. Il est par contre totalement opaque aux UV (longueurs d'onde inférieures à 0,35 μm), et aux IR lointains (longueurs d'onde supérieures à 4,25 μm). Ainsi le rayonnement solaire à ondes ultracourtes (de 0,3 à 4 μm) est responsable pour la transmission de 43% de l'énergie totale. Le rayonnement émis par les surfaces des bâtiments ($>$ à 5 μm); est de faible intensité et largement filtré par un simple vitrage.

Dans le cas d'un phénomène dangereux thermique, les températures de flammes varient entre 1000 et 1500°C. Leurs flux spectraux émis et transmis au travers d'un vitrage simple sont montrés sur la Figure 5-5. Pour une température de flamme de 1 500°C le spectre de longueur d'onde se situe dans une gamme allant principalement de 0,9 à 4 μm . Sur l'ensemble du spectre, le verre clair laisse passer (ou transmet) 54% du rayonnement incident. Les vitrages clairs ordinaires ont une réflexion de 0,16 sur la totalité du spectre. C'est à dire qu'ils réfléchissent 16% de l'énergie des rayonnements. Il en résulte que 30% en sont absorbés.

Dans le cas de double vitrage, le flux transmis à travers le premier vitrage est de nouveau filtré par le second vitrage, réduisant considérablement la valeur du flux transmis au sein de la pièce.

Avec ces données, il est alors possible de déterminer pour chaque flux incident la part de flux transmise, celle-ci doit être inférieure au critère de 2,5 kW/m^2 et la part absorbée, celle-ci doit produire une température d'échauffement inférieur à 60°C.

S'agissant d'éléments transparents, il est nécessaire de considérer également les effets de doses thermiques reçues par les personnes. Comme indiqué en début de document, la détermination de la dose se fait en intégrant les apports de chacun des pas de temps pendant lesquels la densité de flux thermique est supposée constante en calculant :

$$D = \int_{t_0}^{t_1} \phi^{4/3} dt$$

Ainsi, la réduction de la dose incidente à travers un élément vitré est proportionnelle à la réduction du flux incident avec un facteur à la puissance 4/3.

On indique dans le tableau ci-dessous les valeurs des flux, température et dose transmises en face non exposée pour les deux types de vitrages considérés :

		Flux transmis (kW/m^2)		Température transmise ($^{\circ}\text{C}$)		Dose transmise ($(\text{kW/m}^2)^{4/3} \cdot \text{s}$)	
		Simple Vitrage	Double vitrage	Simple Vitrage	Double vitrage	Simple Vitrage	Double vitrage
Flux incident (kW/m^2) Dose incidente ($(\text{kW/m}^2)^{4/3} \cdot \text{s}$)	3 600	1,6	<1	58	33	264	116
	5 1000	>2,5	1,5	>60	35	440	193
	8 1800	>2,5	2,3	>60	40	>600	348
	12 -	>2,5	>2,5	>60	46		

Tableau 5-16 : Caractéristiques en face non exposée à l'aléa thermique en fonction du flux incident (ou dose thermique incidente) et du type de vitrage.

Il faut en outre retenir les critères de ruine des vitrages simples et doubles. Des études spécifiques sur l'exposition des produits verriers aux flux radiatifs, notamment cités par Babrauskas, ont montré que le comportement des produits verriers dépend de plusieurs facteurs dont la surface de l'élément soumis au flux. En effet, un élément verrier peut présenter des risques de perte d'intégrité pour des flux

thermiques de très faible intensité du moment qu'il n'est pas échauffé de manière homogène sur l'ensemble de sa surface.

Type de produits verriers	Seuil critique (kW/m ²)
Vitrage ordinaire	9
Double vitrage	25
Verre trempé	43

Tableau 5-17 : Seuil critique d'effets thermiques pour les éléments verriers [76]

D'après les travaux menés au niveau international, il peut être considéré de manière générale qu'à partir de 9 kW/m², le verre ordinaire en simple vitrage est susceptible de se briser, que le double vitrage est susceptible de résister à des flux de 25 kW/m² alors que le verre trempé peut résister jusqu'à des flux radiatifs de 43 kW/m² sous certaines conditions.

Dans le cadre du Projet National français ISI (Ingénierie de la Sécurité Incendie) notamment, il a été établi un état des connaissances actuelles sur le bris de vitrage sous l'action du feu. Certaines valeurs issues d'études théoriques ou expérimentales et de modélisation permettent d'appréhender les phénomènes physiques de bris de vitrage mais sans toutefois aboutir à un consensus en termes de critères représentatifs du bris de vitrage (température, contrainte de rupture...), les résultats dépendant de nombreux paramètres. La réflexion menée au niveau du Projet National permet d'espérer qu'un compromis puisse être atteint sur la base d'essais complémentaires afin de proposer un panel de critères relatifs à la problématique du bris de vitrage.

Par conséquent, on peut considérer que la majorité des éléments verriers sont susceptible de résister mécaniquement à un rayonnement thermique inférieur à 8 kW/m². Toutefois, il convient de préciser que la résistance des vitrages ne peut être étudiée de manière indépendante des châssis.

Par exemple, du fait de la forte diminution de la résistance mécanique de l'aluminium à partir de 250°C, les châssis en aluminium lorsqu'ils sont soumis à des flux thermiques radiatifs élevés, vont perdre leur résistance mécanique et conduire soit à la chute des éléments verriers, soit à des contraintes complémentaires dans le verre pouvant conduire à une perte d'intégrité de l'élément verrier.

En recoupant les valeurs avec le critère de température, la valeur de flux critique transmis de 2,5 kW/m², la valeur de dose limite de 600 [kW/m²]^{4/3}.s et la valeur de flux critique de ruine, on obtient le tableau de performance suivant :

		Performance	
		Simple Vitrage	Double vitrage
Flux incidente (kW/m ²) Dose incidente ([kW/m ²] ^{4/3} .s)	3 600	A	A
	5 1000	NA	A
	8 1800	NA	A
	12 -	NA	NA

Tableau 5-18 : Performance des différents types de vitrage en fonction du flux incident (A : acquise ; NA : non acquise)

Remarques : Ces performances ont été validées pour le cas où la surface vitrée est inférieure à 30% de la surface de la façade sollicitée. En effet pour des surfaces plus importantes l'apport d'une paroi à 60°C et d'une surface vitrée de 2,5 kW/m² tend à augmenter le niveau de température ambiante dans le local.

Concernant les châssis, on se réfère aux valeurs de température critiques d'inflammation et de dégradation significative. De façon générale, les châssis en PVC ne peuvent accepter un flux supérieur à 5 kW/m², les châssis en bois et en aluminium un flux supérieur à 8 kW/m² et les châssis en acier (ne présentant pas de performance en résistance au feu) un flux supérieur à 12 kW/m².

Pour les portes en bois sans vitrage, on considère deux types. Tout d'abord une porte tout en bois avec éventuellement un parement en métal ou PVC dont la faible épaisseur ne modifie pas le transfert thermique à travers la porte. Ensuite, on considère une porte à habillage bois (généralement de 1 cm) et un isolant à l'intérieur.

L'évaluation du transfert thermique en régime stationnaire pour des flux inférieurs à 8 kW/m², flux critiques d'inflammation du bois, et de dégradation du PVC nous fournit les résultats de performance suivant en fonction du critère de température de 60°C (cf. Tableau 5-19) :

		Épaisseur totale de la porte en bois (cm)			
		3	4	5	6
		critère de 60°C			
Sans Isolant	< 3	3	3	3	5
Avec Isolant	3	5	5	5	8
		critère de 80°C			
Sans Isolant	5	8	8	8	8
Avec Isolant	8	8	8	8	8

Tableau 5-19 : Flux radiatif incident maximal pour des portes en bois

On observe que les portes isolantes sont plus performantes mais ne peuvent admettre un flux supérieur à 5 kW/m² pour une porte inférieure à 5 cm d'épaisseur totale. On indique aussi dans le Tableau 5-19, la performance vis-à-vis d'un critère de 80°C. Une porte ne représentant qu'une faible surface de la pièce, son léger échauffement au-dessus de la température de 60°C ne modifiera pas significativement l'échauffement de la pièce. Néanmoins une température inférieure à 100°C est choisie pour éviter les risques d'inflammation de matériau cellulosiques à proximité. Pour ce critère, seule la porte de 3 cm sans isolant n'accepte pas un flux de 8 kW/m².

Pour les portes métalliques sans isolation, leur échauffement est tel sous les flux incidents qu'elles émettent comme un corps noir à température de l'acier. Ainsi même pour un critère de 80°C, elles ne peuvent tolérer des flux supérieurs à 3 kW/m². Si elles sont isolées, on s'intéresse à la température de dégradation significative de l'isolant. On se référera alors aux données du § 5.4 sur les bardages simple peau. Ainsi, la performance de la porte métallique dépend de la nature de son isolation, à savoir :

- Isolation en polystyrène : 3 kW/m² ;
- Isolation en polyuréthane : 5 kW/m² ;
- Isolation en laine de verre : 8 kW/m² ;
- Isolation en laine de roche : > 12 kW/m²

Pour les portes en PVC avec isolant, les performances seront, elles aussi, liées à la nature de l'isolant, mais aussi aux flux critiques d'inflammation du PVC (> 8 kW/m²). La performance maximale est de 8 kW/m².

En outre, dans le cas où ces portes présenteraient en plus de ces performances, des performances en matière de résistance au feu, au moins un degré coupe-feu, celles-ci peuvent répondre à un flux supérieur à 8 kW/m². Généralement, les portes coupe-feu sont métalliques ou en bois avec une âme isolante silico-calcaire ou à base de laines minérales.

Ces performances s'appliqueront pour le cas des portes avec une surface vitrée inférieure à 30 % de la surface totale de la porte comme pour les surfaces vitrées vis-à-vis des murs.

Pour les occultations et contrevents à l'extérieur, conformément à la température d'inflammation des matériaux, dès lors que ces équipements sont en bois ou en PVC ne peuvent tolérer un flux supérieur à 8 kW/m².

5.10 CARACTÉRISATION VIS-À-VIS DE PHÉNOMÈNES INSTANTANÉS

Dans les paragraphes précédents, la caractérisation de la vulnérabilité des éléments constituant l'enveloppe extérieure a été établie pour le cas de phénomènes de longue durée ou continus.

Ainsi, dans une approche sécuritaire et stationnaire, il a été constaté que les façades opaques lourdes dès lors qu'elles possèdent un doublage isolant supérieur à 4 cm peuvent tolérer des flux radiatifs incidents supérieurs ou égaux à 5 kW/m². La plupart des matériaux sans isolant peuvent tolérer toutes les sollicitations avant 60 minutes, sauf pour les matériaux présentant une faible inertie thermique.

Ces caractéristiques se retrouvent pour le cas de fortes intensités et des durées de sollicitations inférieures à la minute.

La caractérisation des éléments de façades opaques lourdes définie alors pour le cas de phénomènes continus d'une durée de 2h est alors suffisante pour le cas des phénomènes instantanés.

Dans le cas des façades opaques légères, ainsi que les toitures et couvertures, la présence d'un isolant permet une performance acceptable dans le cas de phénomènes continus. On la retrouve dans le cas des phénomènes instantanés. Cependant ces éléments de façade montrent généralement des inerties thermiques faibles favorisant un rapide échauffement qui peut présenter un risque en terme de propagation d'incendie. En effet, si les fortes températures en face non exposée sont de courtes durées, elles peuvent permettre l'inflammation de matériaux annexes (et non répertoriés) accolés à cette face.

La caractérisation de ces éléments définie pour le cas de phénomènes continus doit être alors conservée pour le cas des phénomènes instantanés.

Pour le cas des éléments de menuiseries et plus particulièrement des éléments transparents, il est nécessaire de considérer les effets de doses thermiques reçues par les personnes. Cette approche a été également considérée pour le cas des phénomènes continus, ainsi les prescriptions indiqués au §5.9 reste valables.

En outre s'il a été constaté qu'il fallait des flux considérables pour que l'échauffement du châssis induise de fortes déformations provoquant une ruine du vitrage, le critère de dose thermique reste majorant et dimensionnant pour la caractérisation de ces éléments transparents.

Remarque : comme pour le cas des phénomènes continus, la caractérisation des matériaux de façades définis au §5.4 reste valable.

6 PROPOSITIONS DE PROTECTION ET DE RENFORCEMENT DU BÂTI VIS-À-VIS DE L'ALÉA THERMIQUE

Cette phase a pour objet de proposer les prescriptions techniques de protection du bâti face à un aléa technologique thermique pour garantir l'intégrité physique des personnes situées à l'intérieur. Plusieurs solutions techniques sont étudiées pour les principaux éléments constituant l'enveloppe externe du bâti. On indique pour chaque solution proposée, les avantages et limites du dispositif étudié concernant sa mise en œuvre et son efficacité. Il sera également précisé, si les prescriptions techniques proposées visent à être retenues dans le règlement du PPRT ou par les services de secours dans le cadre de l'élaboration des PPI, et de leur avis sur d'éventuelles constructions nouvelles en zones à risques.

Remarque : L'aspect économique est développé dans le guide technique de renforcement du bâti.

6.1 SOLUTIONS DE PROTECTION ET DE RENFORCEMENT DU BÂTI FACE À UN ALÉA TECHNOLOGIQUE THERMIQUE

Les solutions étudiées portent soit sur :

- La protection du système par un écran thermique ;
- Le remplacement du système ou de l'équipement par un autre dispositif plus performant.

6.1.1 Solutions pour les structures

6.1.1.1 Structures métalliques

La durée de stabilité au feu d'un profilé en acier sans traitement spécifique n'excède que rarement ½ h (R 30) lorsqu'il est soumis à un rayonnement thermique supérieur à 25 kW/m² (Cf. ANNEXE H). Plusieurs moyens de protection passive peuvent être utilisés pour limiter l'échauffement des profilés en acier.

La protection passive des éléments métalliques est basée sur la mise en œuvre d'un élément entre l'acier et la source du rayonnement thermique. Cet élément de protection thermique interposé peut être de nature diverse et en contact ou non avec l'acier conduisant à une famille de quatre systèmes :

- Protection par écran, horizontal ou vertical ;
- Protection rapportée autour de l'acier ;
- Section mixte (apport de béton autour ou dans l'élément en acier) ;
- Refroidissement par eau (peu usité en France).

Tout dispositif de protection doit avoir fait l'objet au préalable d'une évaluation par un laboratoire agréé par le ministère de l'intérieur et bénéficier d'un PV de classement en résistance au feu.

- Protection par écran horizontal ou vertical

Le principe d'une protection par écran repose sur l'interposition d'éléments dissociés de la structure à protéger formant une paroi continue, tels que :

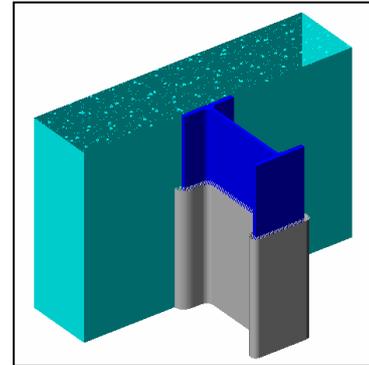
- Protection par des déflecteurs isolés ou non, en verre ou métallique ;
- Protection par isolation extérieure de la charpente de toiture par plaque de silico-calcaire, de laine de roche, de laine de verre, de vermiculite ;

PROTECTION PAR ÉCRAN HORIZONTAL OU VERTICAL	
AVANTAGES	LIMITES
<input type="checkbox"/> Déflecteurs peuvent être utilisés en extérieur <input type="checkbox"/> Esthétique (Déflecteur verrier) <input type="checkbox"/> Coût	<input type="checkbox"/> Esthétique (déflecteur métallique) <input type="checkbox"/> Traitement des détails constructifs complexe

Protection rapportée

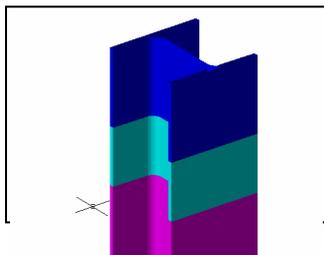
C'est le principe le plus couramment utilisé. La notion de protection rapportée est associée à l'utilisation du facteur de massiveté pour la détermination des températures atteintes par les profilés et par conséquent pour la composition des éléments de protection. On distingue trois types de produits.

Les **produits projetés** ou flocages peuvent être fibreux ou pâteux. Ils sont généralement composés de fibres minérales, de vermiculite, de laitier ou de plâtre accompagnés d'un liant. Effectuée à l'aide d'un appareillage spécial, la projection a lieu en milieu humide. Plusieurs couches peuvent être nécessaires allongeant alors les temps de séchage.



Les durées de stabilité au feu obtenues peuvent atteindre 4 heures.

PRODUITS PROJETES	
AVANTAGES	LIMITES
<input type="checkbox"/> Technique de protection la plus économique <input type="checkbox"/> Mise en œuvre pratique (en général sans préparation préalable des profils) <input type="checkbox"/> Se prête à la protection de détails constructifs complexes <input type="checkbox"/> Peuvent assurer la protection contre la corrosion	<input type="checkbox"/> L'aspect fini ne permet pas de laisser les structures apparentes <input type="checkbox"/> Fortement déconseillé en application extérieure ou milieu humide. <input type="checkbox"/> Peut créer poussières et salissures <input type="checkbox"/> Exige un contrôle de l'épaisseur <input type="checkbox"/> Fragilité de certains produits

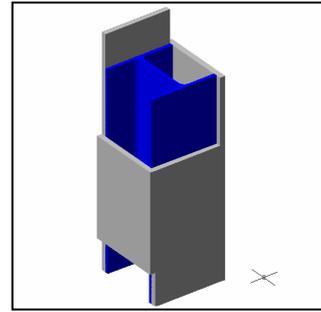


Les **peintures intumescents** sont des produits dont la particularité réside dans la transformation à la chaleur. A froid, l'épaisseur du film varie de 0,5 à 4 mm d'épaisseur. Porté à une température entre 100°C et 200°C, le produit gonfle et se transforme en mousse, atteignant des épaisseurs de 30 à 40mm, qui assure la protection de l'élément métallique. Ces peintures sont mises en œuvre selon un mode traditionnel : pistolet ou brosse, mais nécessitent une grande rigueur dans leur phase d'application afin de s'assurer de l'homogénéité de la protection. La conservation de l'esthétique de l'acier constitue le principal intérêt de ce type de protection qui peut atteindre des degrés R allant jusqu'à 120 minutes.

PEINTURES INTUMESCENTES	
AVANTAGES	LIMITES
<input type="checkbox"/> Pas de modification notable des dimensions extérieures de la structure <input type="checkbox"/> Traitement des détails constructifs complexe <input type="checkbox"/> Application sur l'acier comme une peinture <input type="checkbox"/> État de surface finie lisse <input type="checkbox"/> Gamme de couleurs et finition variées <input type="checkbox"/> Possibilité d'application en atelier <input type="checkbox"/> Certains produits peuvent être utilisés en extérieur	<input type="checkbox"/> Exige un sablage et une couche de primaire anticorrosion <input type="checkbox"/> Certains produits nécessitent une couche de finition spéciale <input type="checkbox"/> Nécessite soin de mise en œuvre <input type="checkbox"/> Temps de séchage pouvant être élevés entre passes de peinture <input type="checkbox"/> Pour R 120 – épaisseurs importantes (plusieurs mm)

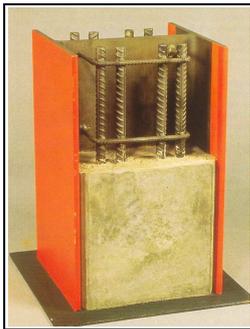
Les **produits en plaques** sont à base de plâtre, de vermiculite, de fibres minérales ou de composés silico-calcaire.

Le principe consiste à former un caisson autour de l'élément métallique. Les modes de fixation sont mécaniques (vis, agrafes) ou par collage. Cette solution est très adaptée à une réalisation soignée en intérieur, comme dans le cas du logement. Les performances peuvent atteindre R 120.



PRODUITS EN PLAQUES	
AVANTAGES	LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Permet de laisser apparent l'élément protégé <input type="checkbox"/> Fixations à sec simples (agrafes) par entreprise de cloisons <input type="checkbox"/> Plaques d'épaisseur garantie <input type="checkbox"/> Aucune préparation préalable de l'acier n'est requise <input type="checkbox"/> Plaques de plâtre résistantes aux chocs <input type="checkbox"/> Permet des finitions de qualité 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Ne se prête pas à la protection de détails constructifs complexes <input type="checkbox"/> Temps de fixation importants <input type="checkbox"/> Utilisation principalement intérieure <input type="checkbox"/> En extérieur : limité et nécessite peinture spéciale ou film étanche <input type="checkbox"/> Plus cher que projection d'enduits

Section mixte :



Le principe repose sur l'addition de béton par enrobage du profilé en acier ou par « remplissage » (tube creux). Ce procédé permet d'ajouter à la protection une capacité structurelle et de réduire les besoins de traitement anti-corrosion.

Le poids de la structure s'en trouve significativement augmenté, mais la performance en résistance peut atteindre R180.

SECTION MIXTE	
AVANTAGES	LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Systèmes robustes → résistances au feu importantes <input type="checkbox"/> Parties métalliques enrobées → pas de traitement anti-corrosion nécessaire <input type="checkbox"/> Bonne résistance aux impacts et détériorations mécaniques <input type="checkbox"/> Utilisation intérieure / extérieure 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Poids mort de la structure augmenté <input type="checkbox"/> Bétonnage en usine → moyens de levages lourds sur site <input type="checkbox"/> Assemblages à prévoir pour assurer un enrobage complet des éléments métalliques par le béton

Protection par systèmes irrigués

Ce procédé est employé avec des profils creux remplis en permanence d'eau, amenée ou non à circuler selon les systèmes. Il repose sur le maintien contrôlé de la température. Dans les cas de circulation d'eau, il y a échauffement au niveau du foyer d'incendie puis déplacement de l'eau chauffée et remplacement par de l'eau froide grâce à un principe de thermosiphon au sein du circuit. Sans circulation, chaque poteau est rempli d'eau et possède un dispositif autonome de régulation.

$$T_{\text{eau}} < 110^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{acier}} < 250^{\circ}\text{C}$$

SYSTÈMES IRRIGUÉS	
AVANTAGES	LIMITES
<input type="checkbox"/> Bonnes résistances au feu <input type="checkbox"/> Utilisation extérieure	<input type="checkbox"/> Complexe à mettre en œuvre <input type="checkbox"/> Maintenance compliquée <input type="checkbox"/> Risques de gel de l'eau l'hiver <input type="checkbox"/> Coût élevé (mise en œuvre et exploitation)

6.1.1.2 Structures bois

Il faut distinguer le bois en structure et le bois en revêtement :

- Dans le premier cas on considère la résistance au feu qui s'exprime en minutes. Par exemple, pour une résistance de 30 minutes d'une charpente en lamellé collé, la poutre sera surdimensionnée de 21 mm soit 30 X 0,7mm vitesse moyenne de la combustion du bois. La couche carbonée protège la section résiduelle de la poutre qui assure la stabilité de la structure ;
- Dans le second cas on considère la réaction au feu c'est à dire le comportement du bois exposé à une flamme, donc son ignition (inflammation) et la propagation des flammes.

En cas d'exposition prolongée à un flux thermique incident supérieur à 8 kW/m², le bois utilisé en structure et en revêtement doivent être protégés afin de ne pas présenter un risque de propagation du feu à la construction. Deux solutions peuvent être mises en œuvre pour retarder l'inflammation du bois.

La première solution est similaire à celle présentée pour les structures acier, à savoir une protection par écran, horizontal ou vertical (déflecteurs isolés ou non, en verre ou métallique pour les structures directement exposées, une isolation extérieure de la charpente de toiture par des plaques de silico-calcaire, laine de roche, laine de verre ou vermiculite.

PROTECTION PAR ÉCRAN	
AVANTAGES	LIMITES
<input type="checkbox"/> Déflecteurs peuvent être utilisés en extérieur <input type="checkbox"/> Esthétique (Déflecteur verrier) <input type="checkbox"/> Coût	<input type="checkbox"/> Esthétique (déflecteur métallique) <input type="checkbox"/> Traitement des détails constructifs complexe

La seconde solution repose sur l'application d'un vernis ignifugé, ou d'une peinture intumescente sur la charpente bois, afin de retarder l'inflammation du bois. Pour les bois massifs et dérivés du bois, les peintures intumescentes peuvent s'appliquer à la brosse, au rouleau ou par pulvérisation d'un produit filmogène (peintures intumescentes). L'épaisseur de la meringue peut atteindre plusieurs centimètres, celle-ci vitrifie et forme un véritable bouclier thermique. Toutefois, ce type de peinture ou de vernis est restreint pour le moment en utilisation intérieure.

PEINTURES INTUMESCENTES ET VERNIS IGNIFUGÉS	
AVANTAGES	LIMITES
<input type="checkbox"/> Pas de modification notable des dimensions extérieures de la structure <input type="checkbox"/> Traitement des détails constructifs complexe <input type="checkbox"/> Application sur le bois comme une peinture <input type="checkbox"/> Etat de surface finie lisse <input type="checkbox"/> Gamme de couleurs et finition variées	<input type="checkbox"/> Nécessite soin de mise en œuvre <input type="checkbox"/> Temps de séchage pouvant être élevés entre passes de peinture <input type="checkbox"/> Utilisation en intérieure uniquement <input type="checkbox"/> Coût

6.1.1.3 Structures béton

Les structures en béton ne présentent pas un risque en terme de résistance mécanique pour l'échelle de flux thermiques étudiée ($< 12 \text{ kW/m}^2$). A titre d'illustration, sous feu conventionnel, le béton atteint, au bout d'une heure d'exposition, $350 \text{ }^\circ\text{C}$ à 3 cm de profondeur et 100°C à 7 cm. Ces températures sont bien en deçà de celles pour lesquelles les caractéristiques des matériaux sont affectées de façon sensible (environ $600 \text{ }^\circ\text{C}$). De plus, à cette température, le béton dispose encore de 50 % de sa capacité de résistance. Les épaisseurs minimales d'enrobage nécessaires pour garantir une stabilité au feu sous incendie conventionnel pour des éléments porteurs et non porteurs en béton armé sont définies dans l'Eurocode 2.

6.1.2 Solutions pour les façades opaques lourdes

Dans le cas des façades opaques lourdes le critère d'isolation, soit une température de 60°C en face non exposée, est le critère prépondérant pour définir la performance d'une façade. Trois solutions sont proposées pour améliorer l'isolation des façades opaques lourdes :

- Une augmentation de l'épaisseur du matériau principal de l'enveloppe ;
- Une isolation par l'intérieur ;
- Écran de façade.

6.1.2.1 Augmentation de l'épaisseur de l'enveloppe extérieure

Il s'agit de monter un mur solidaire à la façade sur la face extérieure avec le même matériau afin d'accroître les performances de l'enveloppe extérieure. Ce système peut s'appliquer uniquement dans le cas où pour une même sollicitation et une même épaisseur de doublage isolant, les performances peuvent être améliorées. Il faudra alors se reporter aux tableaux de performance des façades opaques lourdes pour déterminer quelle épaisseur mettre en œuvre.

6.1.2.2 Isolation par l'intérieur

Il s'agit de mettre en œuvre sur la façade opaque lourde un doublage isolant côté intérieur permettant de satisfaire au niveau d'aléa thermique exigé, dans de nombreux cas la performance pouvant être améliorée si l'épaisseur d'isolant est plus conséquente ou de meilleure nature. Une fois encore il s'agit de se référer aux tableaux de performance des façades opaques et de déterminer pour la même épaisseur d'enveloppe extérieure, l'épaisseur et la nature de l'isolant nécessaire à l'obtention de la performance souhaitée.

6.1.2.3 Écran de façade

Dans ce cas, il s'agit de créer un écran thermique permettant de réduire le flux incident arrivant sur la façade opaque. Selon la sollicitation initiale, il pourra être mis en œuvre soit un bardage simple peau ou un double peau avec une âme isolante d'au moins 10 mm. Dans le cas des bardages double peau, le choix de l'isolant utilisé devra respecter les exigences en termes de réaction au feu définies dans le présent rapport. La mise en œuvre du bardage devra permettre une ventilation naturelle de l'ensemble et favoriser les échanges par convection, et un refroidissement de la température du bardage, comme illustré dans les figures ci-dessous. :

Figure 6-1 : Écran thermique de réduction de flux incident

Il s'agit alors de déterminer pour les façades opaques les valeurs des flux transmis en face non exposée pour chaque valeur de flux incident. On fournit dans le Tableau 6-1 ci-dessous, les configurations de façades opaques légères permettant de réduire le flux incident. Un bardage métallique simple peau permet de réduire un flux incident de 12 kW/m² à 8 kW/m². Tandis qu'un bardage double peau avec âme isolante en laine de roche, permet de réduire ce flux à moins de 3 kW/m². Dans tous les cas on préconisera l'emploi d'une ossature métallique pour les zones d'aléa présentant des effets thermiques supérieurs ou égaux à 5 kW/m².

FLUX THERMIQUE (kW/m ²)		PAREMENTS INTÉRIEUR / EXTÉRIEUR		AME ISOLANTE	
INCIDENT	TRANSMIS	NATURE	ÉPAISSEUR (mm)	NATURE	ÉPAISSEUR (cm)
3	< 3	Bardage métallique	0,75	Polystyrène	3
5	< 3	Bardage métallique	0,75	Polyuréthane	3
8	< 3	Bardage métallique	0,75	Laine de verre	3
12	<3	Bardage métallique	0,75	Laine de roche	5
5	3	Bardage métallique	0,75	Polyuréthane	3
8	3	Bardage métallique	0,75	Laine de roche	3
12	3	Bardage métallique	0,75	Laine de roche	5
8	5	Bardage métallique	0,75	Laine de roche	3
12	5	Bardage métallique	0,75	Laine de roche	5
12	8	Bardage métallique	0,75	Laine de roche	5
3	< 3	Métal/Pierre/Bois/Ciment	0,75/5/15/5	-	-
5	3	Métal/Pierre/Bois/Ciment	0,75/5/15/5	-	-
8	5	Métal/Pierre/Ciment	0,75/5/15/5	-	-
12	8	Métal/Pierre/Ciment	0,75/5/15/5	-	-

Tableau 6-1 : Configuration de bardage double et simple peau en tant qu'écran thermique

L'utilisation de façades opaques lourdes en tant qu'écran thermique n'a pas été retenue, compte tenu de la performance des façades légères. De même, la solution d'une vêtue, revêtement isolant fixé directement sur la façade, n'a pas été retenue car la fixation mécanique sur une ossature apparaît plus adaptée pour résister à des chocs thermiques et/ou de surpression qu'un collage ou agrafage sur paroi.

ISOLATION EXTÉRIEURE	
AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<input type="checkbox"/> Solution rapide <input type="checkbox"/> Facile à mettre en œuvre <input type="checkbox"/> Coût	<input type="checkbox"/> Grande façade <input type="checkbox"/> Détermination du matériau

ISOLATION INTÉRIEURE	
AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<input type="checkbox"/> Adapté pour les habitations individuelles <input type="checkbox"/> Coût	<input type="checkbox"/> Peu adapté aux ERP (arrêt provisoire de l'activité)

ÉCRAN THERMIQUE	
AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<input type="checkbox"/> Efficacité <input type="checkbox"/> Applicable à tout bâtiment	<input type="checkbox"/> Travaux relativement lourds <input type="checkbox"/> matériaux coûteux <input type="checkbox"/> Esthétique

Tableau 6-2 : Avantages et limites des solutions proposées pour le renforcement des façades opaques lourdes

6.1.3 Solutions pour les façades opaques légères

Pour les façades opaques légères, la solution la plus facile à mettre en œuvre est de remplacer le bardage existant par un bardage permettant de répondre à la performance imposée par le niveau d'aléa.

6.1.4 Solutions pour les couvertures de toitures et toitures

6.1.4.1 Couvertures

Pour des flux inférieurs ou égaux à 8 kW/m², les charpentes en bois sont tolérées et l'isolation (épaisseur et nature) devra être adaptée à la performance fixée par le niveau d'aléa :

- Pour des flux inférieurs à 3 kW/m², tout type d'isolant est autorisé avec une épaisseur d'au moins 60 mm si les combles sont aménagés ou si la couverture donne un volume occupé par des personnes;
- Pour un flux inférieur ou égale à 5 kW/m², un doublage isolant en polyuréthane, laine de verre et laine de roche d'une épaisseur de 100 mm minimum sont à mettre en œuvre pour les mêmes conditions d'exploitation;
- Pour un flux inférieur ou égal à 8 kW/m², un doublage isolant en laine de verre et laine de roche d'une épaisseur de 100 mm minimum sont à mettre en œuvre pour les mêmes conditions d'exploitation. Pour un flux supérieur à 5 mais inférieur ou égal à 8 kW/m², le polyuréthane est proscrit.

Ces isolants peuvent être disposés sous couverture (isolation intérieure) ou sur chevrons (isolation extérieure) pour des flux inférieurs à 8 kW/m².

Pour un flux inférieur ou égal à 12 kW/m², soit la charpente devra être métallique et le doublage isolant en laine de roche, soit la charpente est en bois avec une isolation extérieure en laine de roche sur chevron avec des contre-liteaux métalliques sous revêtement extérieur.

On peut aussi utiliser une sur-toiture métallique faisant office d'écran thermique, comme le bardage simple peau pour la protection des façades opaques. Elle permettra de réduire le flux à 8 kW/m² en corrélation avec le choix du bon isolant.

Dans tous les cas, l'emploi de tout produit combustible sous revêtement extérieur (pare-vapeur, étanchéité) sera proscrit pour des flux supérieurs à 3 kW/m².

Les différentes méthodes sont présentées ci-après.

- Réflexion de couverture par isolation intérieure :

L'isolation peut être réalisée soit en laine de roche, laine de verre, ou polyuréthane, etc. selon le niveau d'effet thermique zone d'aléa. Cette solution permet de limiter l'échauffement à l'intérieur de l'ouvrage.

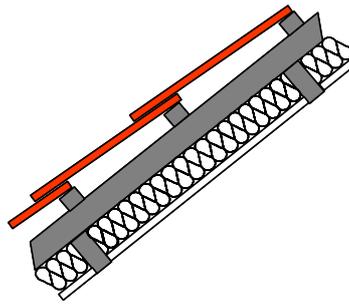


Figure 6-2 : Couverture isolée par l'intérieur

- ❑ Réflexion de couverture par isolation extérieure :

Dans le cas d'une réflexion par l'extérieur, deux solutions sont possibles :

- ❑ D'une part, l'installation d'une sur couverture avec isolation, soit en laine de roche, laine de verre, polyuréthane, etc. selon le niveau d'effet thermique zone d'aléa.

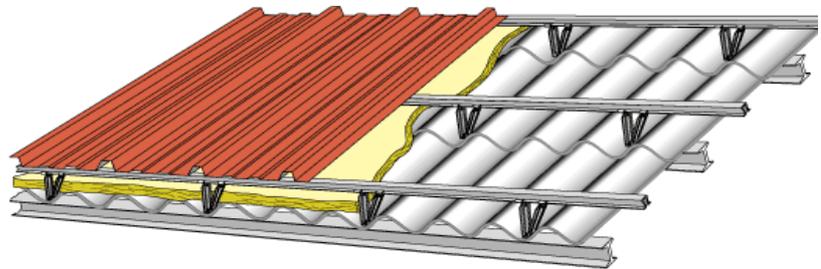


Figure 6-3 : Schéma de principe d'une sur couverture

Ce type de système est particulièrement adapté pour la réflexion des couvertures en plaques ondulées de fibrociment, ou pour les couvertures en tuile mécanique des maisons individuelles. L'épaisseur d'isolant à mettre en œuvre dépend principalement de la nature de la couverture existante et du niveau d'effet thermique reçu par l'élément.

- ❑ Et d'autre part, le remplacement de la couverture existante, comme illustré ci-dessous.

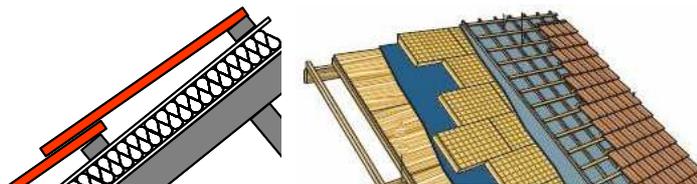


Figure 6-4 : Couverture isolée par l'extérieur (sarking)

Le tableau ci-dessous résume les avantages et limites des solutions pour les couvertures :

PROTECTION DES COUVERTURES			
PROTECTION	EFFICACITÉ	AVANTAGES	LIMITES
Sur-couverture	Niveau de sécurité optimal	<input type="checkbox"/> Simplicité de mise en œuvre <input type="checkbox"/> Coût <input type="checkbox"/> Délai de réalisation <input type="checkbox"/> Ossature métallique <input type="checkbox"/> Poursuite de l'activité pendant les travaux <input type="checkbox"/> Protection de la charpente	<input type="checkbox"/> Esthétisme
Isolation extérieure	Niveau de sécurité optimal	<input type="checkbox"/> Esthétisme <input type="checkbox"/> Protection de la charpente de toiture	<input type="checkbox"/> Difficulté de mise en œuvre <input type="checkbox"/> Coût <input type="checkbox"/> Délai de réalisation <input type="checkbox"/> Perte d'activité ou relogement temporaire pendant les travaux
Isolation intérieure	Niveau de sécurité limité	<input type="checkbox"/> Esthétisme	<input type="checkbox"/> Protection limitée de la charpente de toiture pour des flux > à 8 kW/m ²

Tableau 6-3 : Avantages et limites des solutions proposées pour le renforcement des couvertures de toitures

6.1.4.2 Toitures

Concernant les toitures les solutions de protection proposées sont :

- Pour le cas des toitures légères en bac acier :
 - Une isolation minimale de 100 mm d'épaisseur laine de roche ou polyuréthane avec une étanchéité $B_{\text{roof}}(t3)$ ou T30/1 selon le niveau d'effet thermique de la zone d'aléa ;
 - La mise en œuvre d'une couverture sèche isolée ou non selon le niveau d'effet thermique de la zone d'aléa ;

L'isolation peut être réalisée soit en laine de roche, ou polyuréthane selon le niveau d'effet thermique de la zone d'aléa.

Cette solution permet de limiter l'échauffement à l'intérieur de l'ouvrage :

- Bac acier avec une âme isolante de 100 mm en polyuréthane T30/1 ou $B_{\text{roof}}(t3)$ pour un flux inférieur ou égal à 5 kW/m² ;
- Bac acier avec une âme isolante de 100 mm en laine de roche T30/1 ou $B_{\text{roof}}(t3)$ pour un flux inférieur ou égal à 8 kW/m² ;
- Couverture sèche avec une âme isolante de 100 mm en laine de roche un flux supérieur à 8 kW/m². La couverture devra être inclinée côté opposé à la source de danger.

Une attention particulière devra être portée sur la nature de l'étanchéité, afin d'éviter tout risque de propagation d'un incendie à l'ouvrage et le cas échéant de la protéger.

- Pour le cas des toitures terrasses, on se reportera aux critères de performance des façades opaques lourdes pour ce matériau :
 - Protection rapportée par un lit de gravillon de 4 à 6 cm d'épaisseur
 - Protection rapportée par dalle béton posé sur plots, ou pavé sur lit de sable ;
 - Protection rapportée par une couverture végétale ;

Le tableau ci-dessous résume les avantages et limites des solutions pour les toitures.

PROTECTION DES TOITURES			
PROTECTION	EFFICACITÉ	AVANTAGES	LIMITES
Sur-toiture (couverture sèche)	Niveau de sécurité optimal	<input type="checkbox"/> Simplicité de mise en œuvre <input type="checkbox"/> Délai de réalisation <input type="checkbox"/> Ossature métallique <input type="checkbox"/> Poursuite de l'activité pendant les travaux <input type="checkbox"/> Protection de la charpente de toiture	<input type="checkbox"/> Coût
Remplacement de la toiture existante	Niveau de sécurité optimal	<input type="checkbox"/> Niveau de protection	<input type="checkbox"/> Difficulté de mise en œuvre <input type="checkbox"/> Délai de réalisation <input type="checkbox"/> Perte d'activité ou relogement temporaire pendant les travaux <input type="checkbox"/> Coût
Protection rapportée (dalle, gravillon, terre végétale, .. ;)	Niveau de sécurité optimal	<input type="checkbox"/> Mise en œuvre <input type="checkbox"/> Délai de réalisation <input type="checkbox"/> Poursuite de l'activité pendant les travaux <input type="checkbox"/> Protection de l'étanchéité <input type="checkbox"/> Coût	<input type="checkbox"/> Toiture légère

Tableau 6-4 : Avantages et limites des solutions proposées pour le renforcement des couvertures de toitures

6.1.5 Solutions pour les menuiseries extérieures

6.1.5.1 Portes extérieures

Trois types de protection peuvent être envisagés :

- Remplacement d'une porte par une porte adaptée à l'aléa :
 - Porte sans performance en résistance au feu ;
 - Portes ayant des performances en résistance au feu.
- Déplacement de la porte sur une face non exposée ;
- Protection de la porte par un écran thermique :
 - Par casquette ou avancée;
 - Par écran thermique déporté.
- Remplacement d'une porte par une porte adaptée à l'aléa

Il s'agit d'appliquer les solutions qui se dégagent de la caractérisation de la performance des portes extérieures.

On constate que pour les portes en bois massif (ou habillées en PVC), dès lors qu'elles présentent une épaisseur supérieure ou égale à 4 cm et possèdent une âme isolante, peuvent rester performantes pour un flux de 8 kW/m². Les portes métalliques avec âme isolante en laine de verre ont la même performance. Les portes en PVC et âme isolante sont limitées par l'inflammation du PVC à 8 kW/m².

Pour des flux supérieurs à 8 kW/m², des portes présentant un classement en résistance au feu devront être installées pour garantir au moins pour ces flux un non cintrage de la porte qui se produit pour de forts gradients de température au travers de la porte. Différentes études réalisées par le CTICM ont montré que dans le cas de portes métalliques isolées et présentant un degré coupe-feu, le critère de déformation est principalement lié au gradient thermique créant ainsi un cintrage de la porte.

6.1.5.2 Châssis vitrés mobile ou fixe

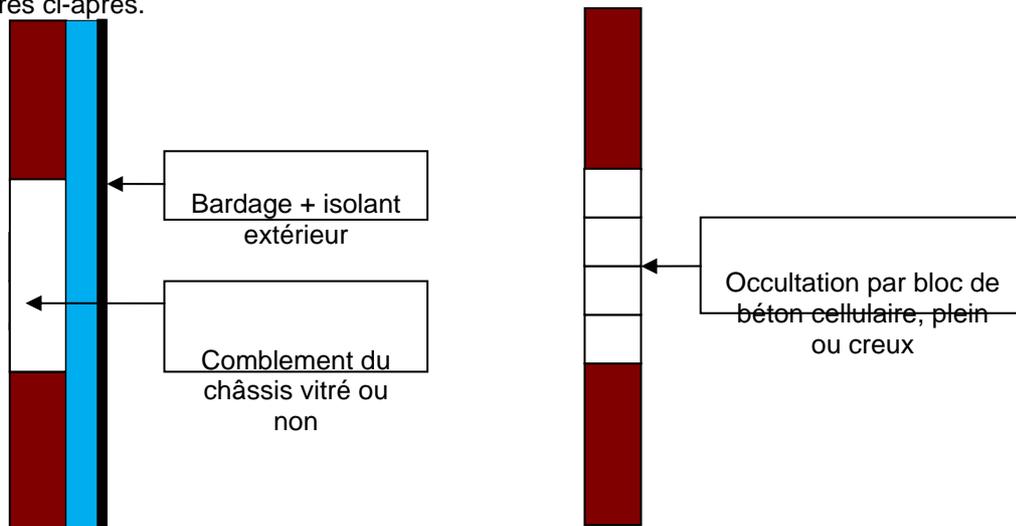
Dans le cas où les châssis vitrés ne sont pas de nature à assurer la sécurité des personnes à l'intérieur de l'ouvrage, plusieurs systèmes de protection peuvent être mis en œuvre, à savoir :

- Occultation permanente des ouvrants en faces exposées ;
 - Occultation non permanente des ouvrants en faces exposées ;
 - Remplacement de l'existant par un châssis vitré adapté à la zone d'aléa (Vitrage REI ou vitrage à basse émissivité et faible transmission, etc.) ;
- Mesures d'occultation permanente des ouvrants en faces exposées

Deux types de système d'occultation permanente peuvent être mis en œuvre :

- Occultation totale des ouvertures en façade

L'occultation totale des ouvertures en façade peut être réalisée soit par la mise en place d'un bardage avec isolation, soit par le remplissage de l'ouverture par des éléments de maçonnerie comme explicité dans les figures ci-après.

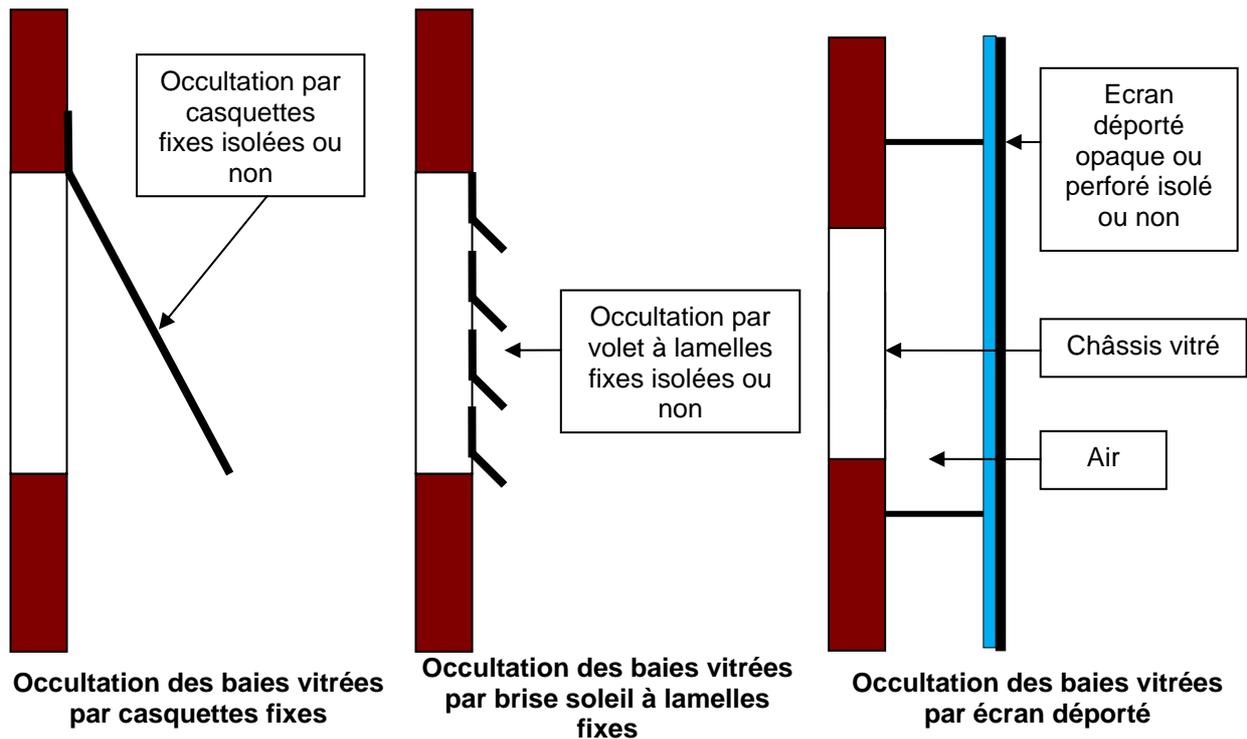


Configuration 1 : Occultation des baies vitrées par un bardage isolé

Configuration 2 : Occultation des baies vitrées par comblement de l'ouverture

- Occultation partielle des ouvertures en façade

L'occultation partielle des ouvertures en façade peut être réalisée soit par la mise en place d'un volet permanent à lamelles fixes, soit par casquette fixe, soit par un écran de façade déporté opaque ou perforé, isolé ou non comme explicité dans les figures ci-dessous.



❑ Mesures d'occultation non permanente des ouvrants en faces exposées

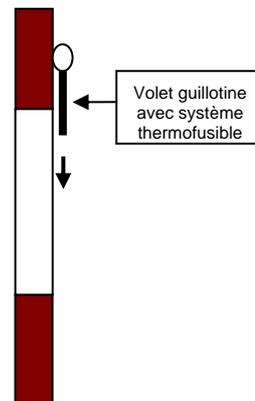
L'occultation non permanente des ouvertures en façade peut être réalisée soit par la mise en place d'un volet opaque extérieur ou intérieur, par volet guillotine avec fermeture fusible isolé, par store extérieur à lamelles pivotantes comme explicité dans les figures ci-dessous.



Store extérieur à lamelles pivotantes



Volets opaques extérieurs ou intérieurs



Volets guillottes avec fermeture fusible isolé

❑ Remplacement de l'existant par un châssis vitré adapté

Pour les simples vitrages ne pouvant accepter que des flux incidents inférieurs ou égaux à 3 kW/m^2 , il est nécessaire de les remplacer par des doubles vitrages pour un niveau d'aléa plus important.

Pour les doubles vitrages, des flux de 8 kW/m^2 peuvent être acceptés vis-à-vis de la sécurité des personnes, si le châssis est en bois, métal ou alu. Pour des flux importants, seuls des châssis en acier devront être employés avec un produit verrier adapté.

En effet, lors de caractérisation des vitrages, il a été observé que les caractéristiques de transmission du verre et d'émission du verre permettaient d'optimiser la performance des verres. Il existe des produits verriers permettant de réduire la transmission et en même temps de réduire l'absorption : il

s'agit de doubles vitrages isolants thermiques comportant des verres à basse émissivité et faible transmission dont le spectre caractéristique est montré ci-dessous :

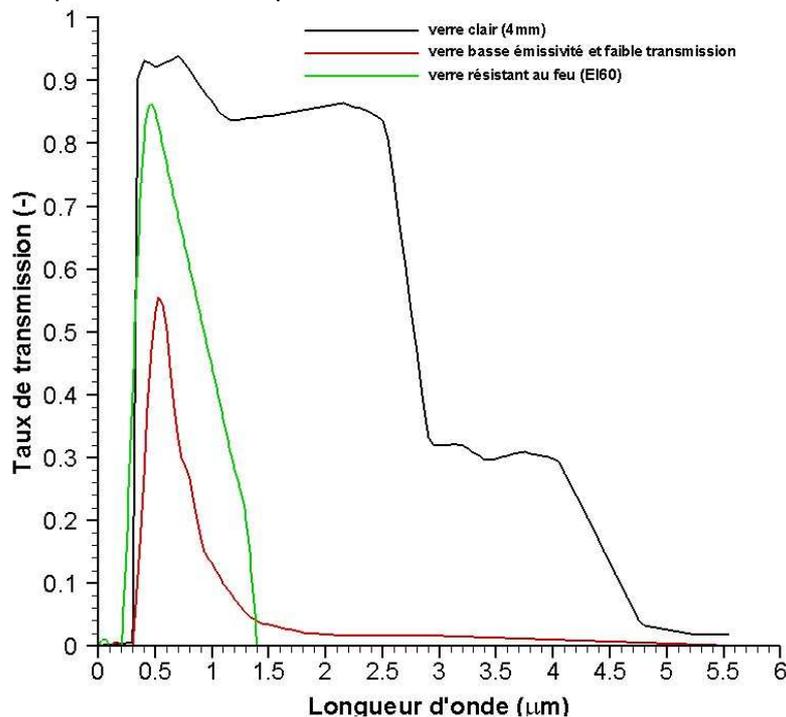


Figure 6-5 : Taux de transmission en fonction du spectre de longueur d'onde de produits verriers

Ce type de verre permet ainsi de transmettre seulement 2% de l'énergie de rayonnement lumineux et de n'émettre que 10 à 15% : le gain est énorme puisque ces paramètres permettent non seulement de diminuer la valeur du flux radiatif dans le local, mais de peu échauffer la surface vitrée.

Malheureusement, le comportement en terme de résistance au feu de ces matériaux est peu connu car très récents. En outre, les verres présentant des caractéristiques de résistance au feu (châssis compris) ont un spectre de transmission aussi performant.

C'est pourquoi, on considère ici que les doubles vitrages isolants thermiques ont les mêmes performances que des doubles vitrages standards. Il est plutôt envisagé de préconiser des produits résistants au feu pour des flux supérieurs à 8 kW/m².

Mais dans ce cas aussi, la préconisation de ce type de produit est à manier avec précaution. Très peu d'essais ont été réalisés sur la performance des éléments verriers vis-à-vis d'un flux thermique radiatif incident. On peut toutefois citer la campagne d'essais de produits verriers à intercalaire intumescent EI30 et EI60, réalisée au laboratoire d'Efectis France en avril 2006 à la demande d'un industriel. Il est toutefois difficile d'extrapoler des critères de performance sur la base de ces essais.

Cette campagne d'essais montre que les complexes « éléments verriers + châssis » présentant des performances de résistance au feu sous feu conventionnel (REI) présentent des performances équivalentes pour un flux incident de 50 kW/m² durant un temps d'exposition égal au degré de classement du produit sous feu conventionnel.

Par exemple un complexe « éléments verriers + châssis » présentant un procès verbal en résistance au feu REI30 (coupe feu ½ h) présentera au minimum des performances égales pour un flux incident de 50 kW/m² durant 30 minutes. Cependant, après ce délai, le comportement mécanique du produit et notamment la température de la face non exposée n'est plus garantie.

Synthèse des mesures protection des ouvrants en faces exposées

Le tableau ci-dessous présente les systèmes proposés pour protéger les personnes des effets thermiques au travers des ouvrants en façade.

OUVRANTS FACADES			
PROTECTION	EFFICACITÉ	AVANTAGES	LIMITES
Occultation totale par bardage	Protection totale Niveau de sécurité optimal	<input type="checkbox"/> Simplicité de mise en oeuvre	<input type="checkbox"/> Visibilité à l'intérieur de l'ouvrage <input type="checkbox"/> Inadapté pour les bâtiments d'habitation <input type="checkbox"/> Luminosité des pièces <input type="checkbox"/> Non respect du code du travail (éclairage naturel) <input type="checkbox"/> Coût
Occultation totale par comblement	Protection totale Niveau de sécurité optimal	<input type="checkbox"/> Coût <input type="checkbox"/> Simplicité de mise en oeuvre <input type="checkbox"/> Phénomène combiné (surpression)	<input type="checkbox"/> Visibilité à l'intérieur de l'ouvrage <input type="checkbox"/> Inadapté pour les bâtiments d'habitation <input type="checkbox"/> Luminosité des pièces <input type="checkbox"/> Non respect du code du travail (éclairage naturel)
Casquettes fixes	Protection partielle Ce système est adapté pour réduire le rayonnement thermique d'une source située à une hauteur supérieure au haut de la casquette	<input type="checkbox"/> Coût acceptable <input type="checkbox"/> Luminosité à l'intérieur de l'ouvrage <input type="checkbox"/> Simplicité de mise en oeuvre (intervention par l'extérieur)	<input type="checkbox"/> Inadapté pour les bâtiments d'habitation <input type="checkbox"/> Protection limitée pour les ouvertures en partie haute (flamme) <input type="checkbox"/> Esthétisme <input type="checkbox"/> Ruine en cas de phénomènes combinés (surpression)
Brise soleil extérieur à lamelles fixes	Protection partielle Il peut être nécessaire de mettre en place des lamelles isolées	<input type="checkbox"/> Simplicité de mise en oeuvre <input type="checkbox"/> Intervention par l'extérieur <input type="checkbox"/> Coût acceptable <input type="checkbox"/> Esthétisme	<input type="checkbox"/> Luminosité à l'intérieur de l'ouvrage <input type="checkbox"/> Flux réémis par l'échauffement des lamelles métalliques
Écran déporté	Protection totale Protection localisée ou globale d'une façade	<input type="checkbox"/> Luminosité à l'intérieur de l'ouvrage <input type="checkbox"/> Mise en oeuvre (Intervention par l'extérieur) <input type="checkbox"/> Esthétisme (réhabilitation de façade) <input type="checkbox"/> Protection localisée ou globale d'une façade	<input type="checkbox"/> Visibilité limitée du paysage <input type="checkbox"/> Coût <input type="checkbox"/> Durée d'installation
Brise soleil intérieur à lamelles fixes	Protection partielle De manière générale, les protections externes sont plus efficaces que les protections internes car elles évitent l'effet de serre derrière le vitrage	<input type="checkbox"/> Simplicité de mise en oeuvre <input type="checkbox"/> Intervention par l'intérieur <input type="checkbox"/> Coût acceptable	<input type="checkbox"/> Luminosité à l'intérieur de l'ouvrage <input type="checkbox"/> Flux réémis par l'échauffement des lamelles métalliques <input type="checkbox"/> Perte de surface des locaux
Volet guillotine	Protection totale	<input type="checkbox"/> Luminosité à	<input type="checkbox"/> Coût

avec fermeture fusible	Niveau de sécurité optimal sous réserve de fonctionnement (mise en place de bouton coup de poing)	l'intérieur de l'ouvrage <input type="checkbox"/> Visibilité du paysage <input type="checkbox"/> Esthétisme <input type="checkbox"/> Adapté pour les zones d'aléa TF et TF+	<input type="checkbox"/> Fiabilité de déclenchement automatique <input type="checkbox"/> Maintenance du système
Châssis vitrés avec performance de résistance au feu	Protection totale sous réserve d'une vitesse d'opacification de l'intercalaire intumescente Niveau de sécurité optimal	<input type="checkbox"/> Luminosité à l'intérieur de l'ouvrage <input type="checkbox"/> Visibilité du paysage <input type="checkbox"/> Esthétisme	<input type="checkbox"/> Coût <input type="checkbox"/> Vitesse d'opacification de l'intercalaire intumescent
Volets extérieurs	Adapté pour phénomène à cinétique lente avec procédure PPI	<input type="checkbox"/> Luminosité à l'intérieur de l'ouvrage <input type="checkbox"/> Visibilité du paysage <input type="checkbox"/> Esthétisme	<input type="checkbox"/> Occultation non permanente <input type="checkbox"/> Fermeture manuelle

Tableau 6-5 : Avantages et limites des solutions proposées pour le renforcement des châssis vitrés mobiles ou fixes

6.1.5.3 Équipements techniques et bouches d'aération

La protection des équipements techniques, telles que les climatisations, bouches d'aération ou de ventilation, ainsi que les traversées de câbles ou de fluides, peut être réalisée soit par :

- Capotage des équipements avec isolation ou non ;
- Grille métallique à maille fine pour les bouches d'aération ;
- Déplacement de l'équipement sur une face non exposée.

Afin de satisfaire la protection vis-à-vis d'un flux thermique radiatif incident, les ouvertures en façade doivent être protégées d'un éclairage énergétique direct soit par un encoffrement, soit par une grille métallique. Pour ce faire, il peut être envisagé de rapporter des encoffrements (boîtes) suivant le schéma de principe donné ci-dessous. Ces encoffrements seront constitués d'une plaque de silicocalcaire traité pour l'utilisation en extérieur et d'une tôle métallique destinée à protéger l'isolant des intempéries. Il peut être réalisé selon plusieurs dimensions.

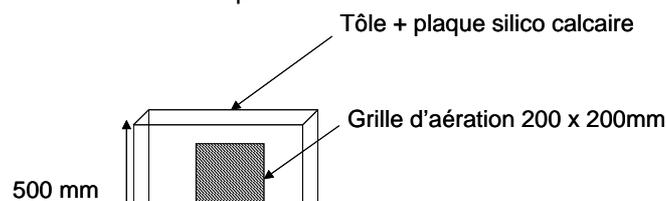


Figure 6-6 : Principe de protection des aérations (entrée d'air)

6.1.5.4 Éléments translucides en couverture

Les lanterneaux d'éclairage zénithal ou les exutoires de désenfumage sont en majorité fabriqués en polycarbonate présentant un classement de réaction au feu M3 ou M4 non gouttant. Ce type de produits peut présenter un risque de dégradation à partir de 140°C et d'inflammation à 400°C en cas d'exposition prolongée à un flux thermique incident. En cas de perte d'intégrité, ce type d'équipement pourrait conduire à un flux radiatif incident supérieur à 2.5 kW/m² à l'intérieur d'un bâtiment comme explicité par la figure ci-dessous.

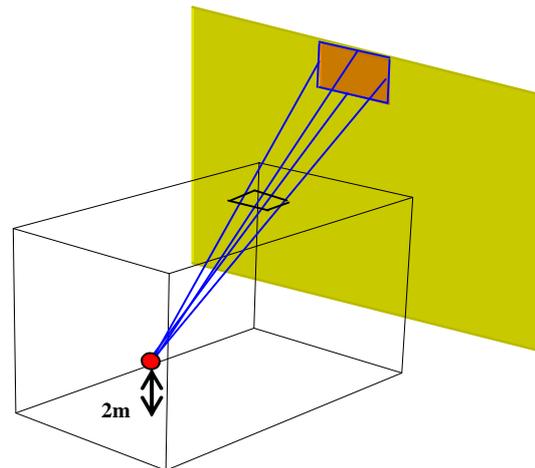


Figure 6-7 : Flux incident sur lanterneaux zénithal

Par conséquent, afin de limiter les flux thermiques au travers des équipements translucides en couverture, les solutions suivantes sont proposées pour :

❑ Lanterneaux d'éclairage zénithal :

- Occultation des lanterneaux combustibles ;
- Remplacement des lanterneaux combustibles en couverture par des exutoires de désenfumage équipés d'un pyrodôme opaque en acier ordinaire ou aluminium avec isolant ou non en fonction de la zone d'aléa ;
- Mise en place d'un système de récupération du matériau dégradé, comme une grille métallique à maille fine (réduction du facteur de vue – récupération des matières enflammées).

❑ Exutoires de désenfumage :

- Remplacement des pyrodôme en polycarbonate par des pyrodôme opaque en acier ordinaire ou aluminium avec isolant ou non en fonction de la zone d'aléa ;
- Occultation des équipements de désenfumage naturel et remplacement par un désenfumage mécanique en façade non exposée ou avec capotage en façade exposée ;
- Mise en place d'un système de récupération du matériau dégradé du pyrodôme comme une grille métallique à maille fine (réduction du facteur de vue – récupération des matières enflammées).

6.2 ANALYSE DES PROPOSITIONS VIS-À-VIS DES PHÉNOMÈNES COMBINÉS

6.2.1 Les phénomènes combinés

Ce paragraphe fait l'état de l'art des connaissances existantes sur les synergies et antagonismes entre les effets thermiques, de surpression et de toxicité, relativement aux phénomènes décrits en ANNEXE A.

6.2.1.1 Phénomène combiné thermique / toxique

L'impact des aléas thermiques sur les effets toxiques est difficile à appréhender car il dépend à la fois du comportement au feu (allumabilité, aptitude à propager le feu, potentiel toxique) des matériaux qui sont à l'intérieur du bâtiment, et de la conception du bâtiment (dimensions, type de ventilation, cloisonnement etc..). Cet impact ne peut être appréhendé qu'au cas par cas.

La solution radicale et conservatrice pour éviter tout risque de toxicité est de faire en sorte qu'il ne soit pas possible à l'intérieur d'un bâtiment de dépasser le flux thermique maximum que peut supporter une personne (zone des 3 kW/m²) et d'utiliser des matériaux dont le flux minimum de dégradation est supérieur à ce flux.

Dans le bâtiment, lorsque les produits combustibles s'enflamment, il y a génération de produits de combustion souvent toxiques. Néanmoins, cette production de gaz par combustion ne peut se réaliser qu'à des températures et flux thermiques largement supérieurs aux limites de tenabilité pour l'homme (de l'ordre de 8 à 10 kW/m², pour une tenabilité de 2,5 kW/m²). La toxicité peut néanmoins se manifester à des températures inférieures aux températures d'inflammation par la production de gaz de pyrolyse. Cette décomposition thermique concerne les matériaux synthétiques polymères, mais aussi les produits naturels tels que le bois ou les textiles. Elle se déroule en plusieurs étapes :

- ❑ Aux premiers échauffements, la matière peut libérer des fractions volatiles. En particulier, certains polymères peuvent libérer du monomère ou du solvant restant. Ce phénomène s'observe principalement avec des produits récemment manufacturés et n'est ainsi pas détaillé dans la présente étude. Il concerne en particulier la libération de formaldéhyde, de phénol ou d'isocyanates résiduels dans les polymères thermodurcissables.
- ❑ Dès que la température augmente, jusqu'à environ 400°C, la chaîne du polymère ou du produit se modifie. Les débuts de la décomposition, qui dépendent de la température, de la durée d'exposition et de la présence d'oxygène. Des produits volatils sont dégagés, comme les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques légers, des composés oxygénés (alcools, aldéhydes, cétones, acides carboxyliques) et dans certains cas, des composés spécifiques comme le chlorure d'hydrogène pour le PVC. Certains polymères ont par ailleurs tendance à se dépolymériser, comme le PMMA ou le polystyrène.

Ces différents composés gazeux émis avant la phase de combustion doivent être considérés comme dangereux, en particulier dans un lieu clos comme l'habitat. Ils sont potentiellement toxiques, corrosifs, irritant, narcotiques ou allergisant.

Le tableau suivant résume les principaux produits de dégradation pouvant être rencontrés par polymères dans les phases de pyrolyse et de combustion. Il est à noter que ces données ne peuvent être qu'indicatives, car elles dépendent des additifs et de la nature exacte des produits manufacturés.

Le tableau, issu des bases de données du LNE, de l'INRS et de la profession plastique, montre que les différents produits cités ne produisent pas de gaz en-dessous des seuils retenus d'effets pour les personnes.

Une autre forme d'action combinée toxique / thermique est à considérer, mais n'est pas couverte par la prise en compte de l'aléa thermique radiatif. Il s'agit de l'effet du déplacement du panache de gaz, et donc des composés toxiques, en cas d'incendie, et de l'action combinée de ces gaz et du panache par convection. Les synergies entre évolution de la toxicité des fumées et sa température, pour des températures sans effet sur les personnes, reste néanmoins peu explorée.

Famille	Produit	Température de début de production de gaz	Produits de dégradation thermique (phase de pyrolyse)	Produits de combustion
Polyoléfines	Polyéthylène	200°C	Hydrocarbures aliphatiques saturés et insaturés légers (méthane, éthylène) Cétones (acétone) Aldéhydes (formaldéhyde, acroléine, acétaldéhyde) Acides gras volatiles	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques
Polyoléfines	Polypropylène	200 à 250°C	Hydrocarbures aliphatiques principalement insaturés (éthylène) Aldéhydes (formaldéhyde, acroléine, acétaldéhyde) Cétones (méthylcétone) Acides gras volatiles	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques
Polyvinyliques	PVC	175 à 200°C	Chlorure d'hydrogène Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques Chlorure de vinyle résiduel Aldéhydes (formaldéhyde, acroléine) Eventuellement anhydride phtalique si PVC souple	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Chlorure d'hydrogène Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques
Polystyrène	Polystyrène	250°C	Styrène et ses oligomères Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques (benzène) Aldéhydes aromatiques	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques
ABS et autres copolymères styréniques	SAN, ABS, MBS, SBS	200°C	Monomères (Styrène, acrylonitrile, MMA) Hydrocarbures aromatiques Nitriles Aldéhydes (acroléine)	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Hydrocarbures aliphatiques Monomères (Styrène, acrylonitrile, MMA) Eventuellement Nitriles, ammoniac, cyanure d'hydrogène
Polyacryliques	PMMA	180°C	Méthacrylate de méthyle	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Méthacrylate de méthyle Hydrocarbures aliphatiques Aldéhydes

Famille	Produit	Température de début de production de gaz	Produits de dégradation thermique (phase de pyrolyse)	Produits de combustion
Polyacryliques	Polyacrylonitrile	à partir de 200°C	Aldéhydes (acroléine) Nitriles (acrylonitrile) Hydrocarbures aliphatiques	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Cyanure d'hydrogène Acrylonitrile Ammoniac Oxydes d'azote Hydrocarbures aliphatiques
Polyamides	Polyamides	jusqu'à 290 - 300°C	Hydrocarbures aliphatiques Aldéhydes, cétones Nitriles	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Ammoniac Cyanure d'hydrogène
		à partir de 400°C	en plus, ammoniac	Nitriles Aldéhydes
Polycarbonates	Polycarbonate	à partir de 250°C	Hydrocarbures aliphatiques insaturés et aromatiques Aldéhydes	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Hydrocarbures Bisphénol-A
Polyester	PET PBT	à partir de 270°C	Aldéhydes Hydrocarbures aliphatiques	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Hydrocarbures Aldéhydes Bromure d'hydrogène si ignifugeants bromés
Polyester	Polyesters insaturés	-	Styrène Méthacrylate de méthyle Eventuellement amines tertiaires	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Hydrocarbures Ammoniac Eventuellement HCl et HBr si produits ignifugeants hallogénés
Polymères fluorés	PTFE	à partir de 350°C	Hydrocarbures fluorés linéaires saturés et insaturés Hydrocarbures fluorés cycliques	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Fluorure de carbonyle, fluorure d'hydrogène Hydrocarbures fluorés

Famille	Produit	Température de début de production de gaz	Produits de dégradation thermique (phase de pyrolyse)	Produits de combustion
Polyacétals	Polyoxy-méthylène	à partir de 190°C	Formaldéhyde	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Hydrocarbures Aldéhydes
Phénoplastes	Résines phénol - formaldéhyde	A partir de 300°C	Phénol Formaldéhyde Ammoniac (HMTA)	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques Phénol
Polyuréthane	Polyuréthane et Polyisocyanurate	A partir de 250°C	Isocyanates Amines Cétones Aldéhydes Hydrocarbures légers	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Oxydes d'azote Ammoniac, nitriles Cyanure d'hydrogène Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques Eventuellement HCl et HBr si produits ignifugeants hallogénés
Bois	Divers essences	A partir de 250°C	Aldéhydes Hydrocarbures légers Cyanure d'hydrogène	Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Oxydes d'azote Cyanure d'hydrogène Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques

6.2.1.2 Phénomène combiné thermique / surpression

Le phénomène de surpression accompagnant une onde thermique peut avoir différentes natures et intervenir simultanément au début de la sollicitation thermique ou durant celle-ci. A priori, un phénomène de surpression conduisant par la suite à un incendie est à considérer pour les dégâts occasionnés par la surpression sur les moyens de protection envisagés pour se prémunir de l'action thermique.

Les vitres et les toitures sont les éléments particulièrement sensibles à ce phénomène de surpression. Les surpressions qui résultent d'un feu ne sont en général pas suffisantes à elles seules pour briser les vitres. Les surpressions résultant de l'incendie atteignent des valeurs de l'ordre de 0,1 à 0,3 mbar. La littérature donne pour les vitres un début de destruction de quelques éléments à partir de 10 à 20 mbar.

Ainsi, le phénomène combiné thermique / surpression n'est à considérer que comme issu de phases conduisant à l'expansion rapide de gaz comme le BLEVE. S'il se produit une explosion, la surpression qui en résultera brisera les vitres. Dans ce cas, une surpression de 0,1 bar est susceptible de projeter des débris à 30 m et la rupture des éléments peut être autant liée aux effets d'onde acoustique de la surpression qu'aux débris.

En cas de risque de surpression, il ne peut ainsi pas être exclu qu'une vitre résistant à l'onde de pression ne soit pas brisée par des « missiles » sous action mécanique. Il en est de même pour les personnes, qui pourraient être atteintes par les débris d'une explosion. Ainsi, l'évaluation d'une zone de surpression doit prendre en considération ces deux aspects.

Pour la tenue des éléments de structure et de protection thermique, l'expérience acquise par les travaux du NIST sur le World Trade Center est remarquable. Dans l'étude, une approche séquentielle a été retenue : calcul de l'impact de l'avion, de la surpression engendrée par la boule de feu, détermination des dégradations engendrées aux structures et aux moyens de protection, calcul du développement du feu et de l'échauffement puis tenue thermomécanique. Ainsi, le phénomène combiné d'impact et de surpression a engendré des dégradations fortes sur les structures et sur les systèmes de protection. La surpression estimée a été de 0,14 à 0,20 bars durant 0,5 à 2 secondes, ce qui a pour conséquences de briser mécaniquement les vitres sur le trajet de l'onde de pression. La capacité statique d'un étage a été calculée comme de 0,27 à 0,35 bars (rupture des assises de l'étage), ce qui signifie que les boules de feu étaient insuffisantes pour engendrer le décrochement des planchers et affecter par elle-même la structure. L'effet combiné des « missiles » a été considérable et a engendré des dégâts à la structure. En particulier, la tenue des cloisons en plâtre utilisées pour enclôsonner les escaliers et certaines colonnes étaient de 350 N/cm². La tenue des isolants projetés était de 8 N/cm², ce qui a engendré leur destruction dans le sens de l'impact.

L'effet combiné de l'action d'une onde de pression en cours de sollicitation thermique est plus difficile à considérer. Ce phénomène est mal connu et encore à l'étude. La sollicitation en surpression étant néanmoins à considérer dans une cinétique totalement différente de celle de l'action thermique, il est probable que l'action combinée considérée séparément ou non n'ait que peu d'influence, sous réserve que les propriétés mécaniques ne soient pas trop affectées par la thermique au moment de la surpression. Pour la tenue combinée des vitres aux actions thermiques et de surpression, une étude est en cours au sein du projet National ISI, mais ne devrait pas aboutir avant 2008.

6.2.2 Dispositions techniques particulières

Ce paragraphe consiste à estimer les conséquences en cas de combinaisons effets thermique/toxicité et thermique/surpression sur les solutions constructives retenues vis-à-vis de l'aléa thermique.

Pour les effets combinés thermique / toxique, deux éléments sont à considérer : Si les faces internes des matériaux de construction présentent une température inférieure à 60°C, seuil de tenue pour les personnes, le risque combiné thermique / toxique à l'intérieur du bâtiment est à négliger sous réserve que les matériaux extérieurs, pouvant éventuellement se dégrader sans s'enflammer, ne permettent pas la pénétration des fumées. Il convient ainsi d'éviter de placer des systèmes de prise d'air ou de ventilation dans les faces exposées à l'action thermique, si celles-ci présentent des matériaux susceptibles de se dégrader selon les modalités du tableau précédent.

Pour les effets combinés thermique / surpression, les solutions techniques envisagées pour protéger les personnes des effets thermiques devront montrer leur capacité à résister à l'onde de surpression et à la présence de « missiles ». Dans le cas d'une surpression consécutive au feu et non à son origine, la vérification se fera en considérant nécessairement les propriétés mécaniques des éléments à la température à laquelle ils seront lors de la sollicitation.

7 RÉFÉRENCES

7.1 DOCUMENTS RÉGLEMENTAIRES ET LÉGISLATIFS

- [1] Loi n°2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages prévoit l'élaboration de plans de prévention des risques technologiques (PPRT) Ministère de l'Écologie et du Développement Durable Journal Officiel du 31 juillet 2003
- [2] Décret n° 2005-1130 du 7 septembre 2005 relatif aux plans de prévention des risques technologiques – Ministère de l'Écologie et du Développement Durable Journal Officiel du 9 septembre 2005.
- [3] Circulaire du 3 octobre 2005 relative à la mise en œuvre des plans de prévention des risques technologiques - (non publiée)
- [4] Décision de la commission du 8 février 2000 portant modalités d'application de la directive 89/106/CEE du conseil en ce qui concerne la classification des caractéristiques de réaction au feu des produits de construction. Journal Officiel de l'Union Européenn L 50/14 du 23 février 2000.
- [5] Arrêté du 5 août 2002 relatif à la prévention des sinistres dans les entrepôts couverts soumis à autorisation sous la rubrique 1510. Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Journal Officiel du 1er janvier 2003.
- [6] Arrêté du 14 février 2003 relatif à la performance des toitures et couvertures de toiture exposées à un incendie extérieur. – Ministère de l'Intérieur, Journal Officiel n°62 du 14 mars 2003
- [7] Arrêté du 3 août 1999 relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages – Ministère de l'Intérieur, Journal Officiel n°211 du 11 septembre 1999.
- [8] Arrêté du 22 mars 2004 relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages – Ministère de l'Intérieur, Journal Officiel du 1^{er} avril 2004.
- [9] Arrêté du 31 janvier 1986 relatif à la protection contre l'incendie des bâtiments d'habitation. Journal Officiel du 5 mars 1986.
- [10] Arrêté du 22 mars 2004 portant approbation de dispositions complétant et modifiant l'arrêté du 25 juin 1980 sur le règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (dispositions relatives au désenfumage). Journal Officiel n°78 du 1^{er} avril 2004 p. 6343, texte n°5
- [11] Arrêté du 25 juin 1980 portant approbation de dispositions générales du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public. Journal Officiel du 14 août 1980.
- [12] Arrêté du 18 septembre 2006 modifiant l'arrêté du 22 mars 2004 modifié relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages – Ministère de l'Intérieur, Journal Officiel du 6 octobre 2006
- [13] Arrêté du 21 novembre 2002 relatif à la réaction au feu des produits de construction et d'aménagement – Ministère de l'Intérieur, Journal Officiel du 31 décembre 2002.
- [14] Décret n° 2006-592 du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions (RT2005) - Journal Officiel du 25 mai 2006.
- [15] Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments (RT2005) - Journal Officiel du 25 mai 2006.
- [16] Arrêté du 29 septembre 2005, relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation. Journal Officiel du 7 octobre 2005.

7.2 DOCUMENTS TECHNIQUES ET NORMATIFS

- [17] ISO / TS 13571 : 2002 (Epreuve française) : Composants dangereux du feu – Lignes directrices pour l'estimation du temps disponible pour l'évacuation, utilisant les caractéristiques du feu
- [18] Règles Th-U (fascicule 1/5) : Coefficient Ubât - Détermination des caractéristiques thermiques "utiles" des parois – Réglementation Thermique (révisées en 2004)

- [19] Règles Th-U (fascicule 2/5) : Matériaux - Détermination des caractéristiques thermiques "utiles" des matériaux - Réglementation Thermique (révisées en 2004)
- [20] Règles Th-U (fascicule 3/5) : Parois vitrées - Calcul des coefficients thermiques des parois vitrées - Réglementation Thermique (révisées en 2004)
- [21] Règles Th-U (fascicule 4/5) : Parois opaques - Calcul des caractéristiques thermiques des parois opaques - Réglementation Thermique (révisées en 2004)
- [22] Règles Th-U (fascicule 5/5) : Ponts thermiques - Calcul des ponts thermiques - Réglementation Thermique (révisées en 2004)
- [23] Guide technique des valeurs de référence des seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées - MEDD Octobre 2004
- [24] Guide d'évaluation des travaux – Appartements et maisons individuelles – ANAH – 2004
- [25] Observatoire des coûts en travaux de réhabilitation – ANAH FFB – Tomes 1 et 2 – 2003-2004
- [26] DTU 40.22 (NF P31-201-1): Couverture en tuiles canal de terre cuite - Partie 1 : Cahier des clauses techniques. Mai 1993
- [27] BP X70-200 : Guide pour l'amélioration de la protection incendie des bâtiments d'habitation existants - Organisation et démarche. septembre 2005
- [28] Mémento Technique du Bâtiment – Les Façades – CERTU - Cete Nord Picardie. Juillet 2003
- [29] Mémento Technique du Bâtiment – Les Toitures – CERTU - Cete Nord Picardie. Juillet 2002
- [30] Manuel maçonnerie terre cuite - Fédération Belge de la Brique, Mai 2005
- [31] Tenue au feu des maçonneries de blocs de béton - Cerib - Juin 2006.
- [32] Tenue au feu des maçonneries en béton cellulaire - Cerib Mai 2007.
- [33] Classement EdR des éléments de remplissage de façades légères faisant l'objet d'un Avis Technique - Cahiers CSTB 2102 septembre 1986.
- [34] Isolation thermique des façades à structure bois - Guide pratique pour les architectes - Chapitre 1 Introduction. Ministère des Transports, de la Mobilité et de l'Énergie de Wallonie.
- [35] PNISI G4 Action 14 : Comportement au feu des vitrages - Étude bibliographique – C. Renaud CTICM SRI – 06/73 – CR/NB -- - Juin 2006
- [36] Guide Méthodologique des PPRT - MEDD 16 décembre 2005
- [37] Guide Méthodologique des PPRT - MEDAD Octobre 2007
- [38] Diagnostic de performance énergétique - Guide du diagnostiqueur - Ministère de l'Emploi - septembre 2006
- [39] Diversité de l'habitat, Mixité Urbaine - Certu Février 2004
- [40] Guide pour l'estimation des dommages matériels potentiels aux biens des tiers en cas d'accidents majeurs – MEDD – 2003
- [41] Mémento des performances des ouvrages de bâtiment - Certu Décembre 2001
- [42] NF EN 13501 : « Classement au feu des produits et éléments de construction ». Août 2002
- [43] NF EN 1991-1-2 : « Eurocode 1 : actions sur les structures - Partie 1-2 : actions générales - Actions sur les structures exposées au feu ». Juillet 2003
- [44] XP ENV 1991 - 2.2: « Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures – Partie 2-2 : actions sur les structures – Actions sur les structures exposées au feu ». Décembre 1997
- [45] NF EN 1991-1-5 : « Eurocode 1 : actions sur les structures - Partie 1-5 : actions générales - Actions thermiques ». Mai 2004
- PR NF EN 1991-2-7 : « Eurocode 1 : bases de calcul et actions sur les structures - Partie 2-7 : actions sur les structures - Actions accidentelles dues aux chocs et explosions ». Décembre 2000
- [46] NF EN 1992-1-1 : « Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments ». Octobre 2005
- [47] NF EN 1992-1-2 : « Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-2 : règles générales - Calcul du comportement au feu ». Octobre 2005
- [48] XP ENV 1992-1-3 : « Eurocode 2 : calcul des structures en béton et Document d'Application Nationale - Partie 1-3 : règles générales - Éléments et structures en béton préfabriqués ». Mai 1997
- [49] XP ENV 1992-1-4 : « Eurocode 2 : calcul des structures en béton et Document d'Application Nationale - Partie 1-4 : règles générales - Béton de granulats légers à structure fermée. Mai 1997

- [50] XP ENV 1992-1-5 : « Eurocode 2 : calcul des structures en béton et Document d'Application Nationale - Partie 1-5 : règles générales - Structures précontraintes par armatures extérieures ou non adhérentes ». Mai 1997
- [51] XP ENV 1992-1-6 : « Eurocode 2 : calcul des structures en béton et Document d'Application Nationale - Partie 1-6 : règles générales - Structures en béton non armé » Mai 1997.
- [52] XP ENV 1993-1-1 : « Eurocode 3 : construction métallique - Calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments ». Décembre 1992.
- [53] XP ENV 1993-1-1/A1 : « Eurocode 3 : construction métallique - Calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments - Annexes D et K rév. ». Novembre 1999
- [54] ENV 1993-1-1/A2 : « Eurocode 3 : calcul des structures en acier - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments - Annexes G, H, J rév., N, Z ». Septembre 2002
- [55] XP ENV 1993 - 1.2 : « Eurocode 3 : Calcul de structures en acier et DAN – Partie 1.2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu ». Décembre 1997
- [56] XP ENV 1993-1-4 : « Eurocode 3 : calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale - Partie 1-4 : règles générales - Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables ». Août 2000.
- [57] NF EN 1994-1-1 : « Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments ». Juin 2005
- [58] XP ENV 1994-1-2 : « Eurocode 4 : calcul des structures mixtes acier-béton et Document d'Application Nationale - Partie 1-2 : règles générales - Calcul du comportement au feu ». Décembre 1997
- [59] NF EN 1995-1-1 : « Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments ». Novembre 2005
- [60] NF EN 1995-1-2 : « Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-2 : généralités - Calcul des structures au feu ». Septembre 2005
- [61] ENV 1996-1-1: « Eurocode 6 : calcul des ouvrages en maçonnerie - Partie 1-1 : règles générales - Règles pour maçonnerie armée et non armée ». Février 1998.
- [62] PR XP ENV 1996-1-3 : « Eurocode 6 : calcul des ouvrages en maçonnerie - Partie 1-3 : règles générales - Règles particulières pour les charges latérales ». Octobre 2000.
- [63] PR NF EN 1996-2 : « Eurocode 6 : calcul des ouvrages en maçonnerie - Partie 2 : conception, choix des matériaux et mise en oeuvre des maçonneries ». Janvier 2001.
- [64] PR XP ENV 1996-3 : « Eurocode 6 : calcul des ouvrages en maçonnerie - Partie 3 : méthodes de calcul simplifiées et règles de base pour les ouvrages en maçonnerie ». Janvier 2001.

7.3 DOCUMENTS SCIENTIFIQUES

- [65] INRS ED 789 - Incendie et lieux de travail
- [66] Operation School Burning, National Fire Protection Association, Boston, MA, USA, 269, 1959
- [67] The St Lawrence Burns. Shorter, G.W. et al. NFPA Quarterly, 53, (4), pp. 300-316, avril 1960
- [68] Mobile Home bedroom Fire Studies: The role of Interior Finish. Budnick E.K., Klein D.P. and O'Laughlin R.J., National bureau of standards Interim report (NBSIR) 78-1531, Septembre 1978
- [69] Naval ships technical manual (NSTM) Chap.555 – Volume 1, Surface ship firefighting. S9086-S3-STM-010/CH-55V1R9, Naval Sea System Command, Washington DC, Décembre 2001
- [70] Toxicity Assessment of Combustion Products, in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, P. J. DiNenno, Ed., 2nd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA, Sect. 2, 1995, pp. 85-146
- [71] Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection, A. M. Stoll, M.A. Chianta Aerospace Medicine, 40, 1969, pp. 1232-1238
- [72] Human Tolerance Limit to Elevated Temperature: An Empirical Approach to the Dynamics of Acute Thermal Collapse, C. Crane. Federal Aviation Administration, Memorandum Report No. ACC-114-78-2, 1978
- [73] Medical infrared thermometry (review of modern techniques), Fraden J., Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry (TIMCSI), 1992, 6, 2, 823-830.

- [74] Heat transfer in medicine and biology, Love T. J., in: Shitzer A., Eberhart R. C. (ed.), , Plenum Press, 1985, vol. 2, 334-340
- [75] The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. National Fire Protection Association. 3ème Édition. 2002
- [76] Ignition Handbook, Babrauskas V., Fire Sciences Publishers & Society of Fire Protection Engineers, 2003
- [77] Burning Rate of Solid Wood Measured in a Heat Release Rate Calorimeter - Fire & Materials, Vol. 16, 197-206 {1992}
- [78] Effets du feu sur les personnes - Eric Guillaume, Rapport LNE – G020284 – G672X01 – CEMATE1, Juillet 2006
- [79] Large-scale boil-over experiments using crude oil – Koseki, Fire Safety Journal n°41 2006 p529–535
- [80] Méthode d'estimation des effets thermiques d'un incendie d'entrepôt – Efectis France (CTICM) Rapport TLF Juin 2002
- [81] Feux de nappes – Omega 2 - Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006). Ineris, Octobre 2002
- [82] Modélisation d'un incendie affectant un stockage de générateurs d'aérosols – Omega 4 – Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006): Ineris, Septembre 2002.
- [83] Le Blève – Omega 5 - Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006). Ineris, Septembre 2002
- [84] Feu torche – Omega 8 - Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-35). Ineris, Juin 2003
- [85] Boil Over – Omega 13 - Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-35). Ineris, Mars 2003
- [86] Validation of FDS for the prediction of medium-scale pool fires – Wen X.. Fire Safety Journal, Vol. 42 p127–138. 2007.

ANNEXE A PHÉNOMÈNES DANGEREUX

UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion)

Un UVCE est une explosion de gaz à l'air libre qui produit des effets thermiques et de pression. Le risque thermique est généralement lié au rayonnement généré par l'incendie de stockages de liquides inflammables. Les dangers d'explosion et d'incendies peuvent être présents simultanément. Les effets thermiques peuvent entraîner des brûlures, la propagation progressive de l'incendie vers des tiers, etc.

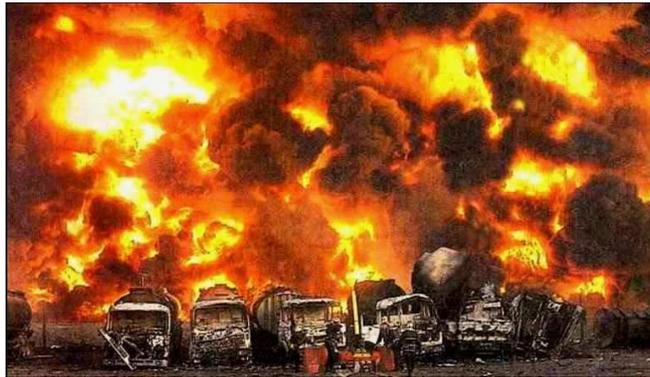


Photo A-1 : L'explosion d'une nappe de vapeurs inflammables suivie d'un important incendie dans un dépôt d'hydrocarbures (source : <http://aria.ecologie.gouv.fr/barpi>)

Description du phénomène

Suite à une fuite de gaz combustible dans un environnement non confiné, un nuage formé d'un mélange d'air et de gaz combustible se forme. Lorsque ce mélange atteint les critères d'explosibilité (teneurs en combustible et en oxygène comprises dans le domaine d'inflammabilité) et rencontre une source d'allumage, il explose. Un front de flamme se propage associé à l'expansion des gaz brûlés qui agissent sur les gaz frais environnant à la manière d'un piston pouvant donner lieu à une onde de pression aérienne (déflagration).

Origines

- Fuite d'un gaz combustible liquéfié
- Évaporation d'une flaque de liquide inflammable.

Une très faible énergie suffit pour initier l'explosion. Par ailleurs, l'allumage peut se produire à une certaine distance du lieu de la fuite.

Un UVCE génère plusieurs effets :

- Une boule de feu qui consume ou endommage ce qui se trouve à l'intérieur.
- Un rayonnement thermique sur le voisinage immédiat de la boule de feu.
- Des effets de pression plus ou moins importants suivant l'encombrement du lieu de l'accident.

Les conséquences de l'UVCE dépendent de :

- La masse de gaz combustible concerné, c'est à dire du volume du nuage.
- La composition du nuage de gaz.
- L'encombrement de l'espace.

Plus le nuage est important et plus on se rapproche d'une composition combustible/ comburant idéale, plus les conséquences sont importantes. Par ailleurs, plus l'espace est encombré (tuyaux, véhicules, convoyeurs...), plus l'explosion sera violente.

On notera que la formation et la dispersion du nuage sont influencées par de nombreux phénomènes qui ne sont pas toujours pris en compte dans les modèles comme la forme de la brèche, la direction du rejet, l'impact du jet (accroissement de volume en fonction des obstacles rencontrés), les conditions météorologiques.

Cinétique du phénomène :

Lors d'une déflagration, plusieurs régimes de combustion des gaz sont susceptibles d'être observés successivement au cours du temps. Le mécanisme, schématisé ci-dessous, est instable et il conduit, dans certains cas, à une accélération continue des flammes tant qu'il est entretenu.

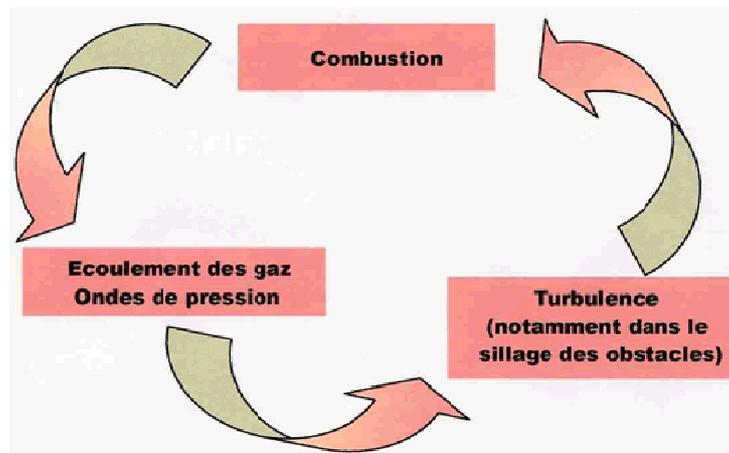


Figure A-1 : Spirale d'augmentation des effets d'un UVCE (Source : INERIS)

Dès lors, il est aussi clair que plus la flamme parcourt une distance importante dans une zone encombrée d'obstacles, plus cette accélération peut se développer, toutes autres choses égales par ailleurs. Pour cette raison, la distance sur laquelle les flammes se propagent, ou la taille du nuage, est un paramètre important.

De plus, si des vitesses de déflagration importantes sont atteintes, des ondes de pression, voire des ondes de choc sont engendrées en avant du front de flamme. En conséquence, les gaz frais sont préchauffés par ces ondes avant d'être brûlés, ce qui contribue encore à l'auto accélération des déflagrations turbulentes.

Dans certains cas, il a été observé que la déflagration a vu la vitesse du front de flamme augmenter jusqu'à devenir une détonation.

Effets thermiques

De manière générale, l'effet thermique d'un UVCE sur les structures se limite à des dégâts superficiels (déformation des plastiques, décollement des peintures, ...), et, éventuellement, à une fragilisation possible de certaines structures métalliques légères. En revanche, l'UVCE peut être initiateur d'un incendie, ou être suivi d'un feu torche, dont les effets thermiques sont à redouter.

L'expérience montre que l'effet du rayonnement thermique est assez limité, et que l'effet létal est dimensionné par la distance à LII. Autrement dit, toute personne se trouvant sur le parcours des gaz brûlés est susceptible de subir l'effet létal avec une probabilité élevée, et toute personne se trouvant en dehors du nuage inflammable ne peut pas subir d'effet thermique létal.

Dans le cas de l'explosion d'un nuage de gaz au repos en espace libre ou « flash fire » les seuils d'effets thermiques considérés sont :

- Distance au seuil des effets létaux significatifs = distance à la LII
- Distance au seuil des premiers effets létaux = distance à la LII
- Distance à l'effet irréversible = 1,1 x distance à la LII (formule forfaitaire).

Toutefois, lorsqu'un nuage inflammable sort d'un site, il est nécessaire d'étudier l'environnement voisin pour identifier la présence de sources d'inflammation éventuelles. En particulier, si dans certaines directions il est démontré que le nuage puisse rencontrer une source d'inflammation avant d'atteindre la distance maximale à la LII est très forte, la distance aux effets thermiques dans cette direction peut être réduite à la distance entre le point de fuite et le point d'inflammation.

On ne dispose pas de seuils d'effets thermiques sur les structures associées aux phénomènes rayonnants de courte durée. De manière générale, on peut considérer qu'il y a un risque de propagation d'un incendie aux matériaux combustibles (en particulier le bois). Dans le cas des matériaux incombustibles (cas de la plupart des structures et équipements industriels), le risque serait limité à des dégâts superficiels (déformation des plastiques, décollement des peintures, ...), et, éventuellement, à une fragilisation possible de certaines structures métalliques légères.

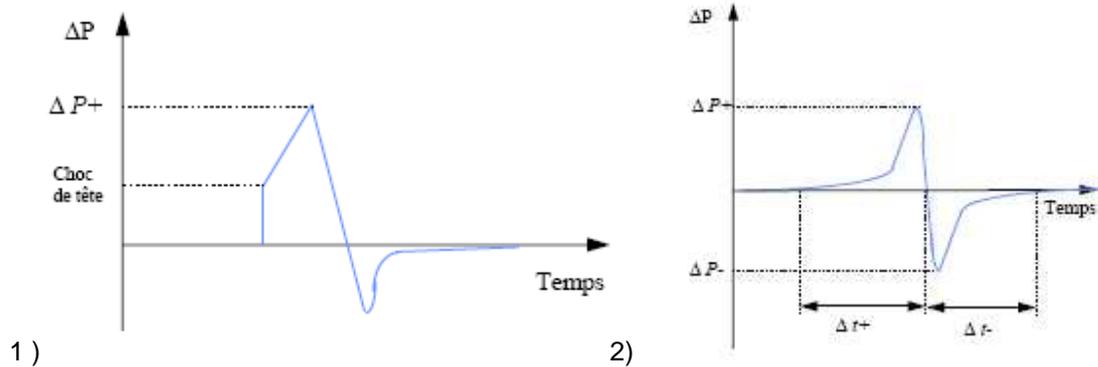
Effets de surpression

Ces effets sont produits par l'effet piston du front de flamme sur les gaz frais. Plus la propagation du front de flamme est rapide et plus son accélération est grande, plus l'amplitude de l'onde de pression est importante. Celle-ci se propage dans l'environnement à la façon d'une onde de choc dont l'amplitude s'atténue lorsque l'on s'éloigne du centre de l'explosion, de manière inversement proportionnelle à la distance.

En l'absence d'obstacles, on observe expérimentalement que la propagation de la flamme dans un mélange homogène et au repos est très faiblement accélérée, et que les niveaux de pression associés n'excèdent pas quelques millibars. En revanche, la présence d'un écoulement turbulent ou de gradients de concentration suffit à accélérer la flamme et à engendrer des niveaux de pression plus élevés, même en l'absence d'obstacles.

	Déflagration	Détonation
Origine	Source d'inflammation	Allumage par explosif Transition déflagration /détonation
Vitesse de flamme	qq mètres à qq dizaines de mètres par seconde	> 1000 m.s-1
Pressions maximales	qq bars	qq dizaines de bars
mode de propagation de la flamme	Conduction	Compression puis auto-inflammation
Paramètres influençant la vitesse de propagation de la flamme	Turbulence du jet Obstacles Confinement	Régime de propagation stable

Les flammes des déflagrations agissent à la manière d'un piston sur les gaz environnant. L'écoulement de chasse de ces gaz est en fait consécutif à la propagation des ondes de pression engendrées au droit des fronts de flammes. Dans le cas des déflagrations à vitesses de flamme inférieures à 140 m/s environ, les surpressions engendrées juste devant les fronts de flammes évoluent en fonction du temps tel qu'indiqué en figure suivante .:



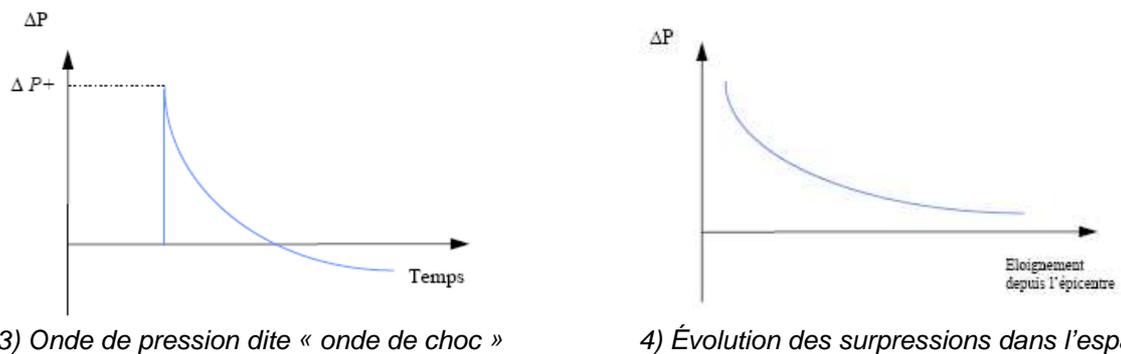
Source: Inéris omega 4 [82]

1 : Onde de pression engendrée au droit d'une déflagration à vitesse de flamme modérée

2 : Onde de pression engendrée au droit d'une déflagration à vitesse de flamme supérieure à 140 m/s environ

Le profil de l'onde de pression simplifié représenté en figure 1) est caractérisé dans ce cas particulier par les valeurs relatives que prennent les diverses variables aussi notées sur cette figure. Lorsque la vitesse de déflagration dépasse la valeur critique de 140 m/s environ, le profil d'onde observé au droit des flammes prend la forme présentée en figure 2).

Le choc qui apparaît en tête de l'onde est dû à la poussée des flammes devenue suffisamment importante. Si cette poussée augmente encore comme dans le cas des déflagrations très rapides (plusieurs centaines de m/s) ou des détonations, le profil d'onde observé prend la forme d'une onde de choc idéale telle que représentée figure 3).



3) Onde de pression dite « onde de choc »

4) Évolution des surpressions dans l'espace

Le niveau de surpression maximal atteint, noté $\Delta P+$ peut varier de quelques kPa dans le cas de la figure 1 (déflagrations à vitesses de flamme modérées) à quelques 1500 à 1800 kPa dans le cas de la figure 3 (éventuellement détonation). En fait, $\Delta P+$ dépend essentiellement de la vitesse des flammes. Dans le cas des déflagrations, de façon très simplifiée et en toute première approximation, il peut être retenu que $\Delta P+$ varie comme la vitesse de flamme au carré. Ensuite, quel que soit le profil d'onde considéré, le niveau maximal de surpression atteint diminue en fonction de la distance comptée depuis l'espace au droit des flammes et en s'éloignant de l'épicentre d'explosion tel qu'indiqué qualitativement en figure 4.

Les conséquences associées à la propagation des ondes telles que présentées ci-avant sont l'application de forces qui peuvent conduire pour l'homme, à des effets directs et indirects ; Pour des structures à une destruction totale ou partielle engendrant éventuellement la projection de débris et pour le sol à la propagation d'une onde de pression souterraine, elle-même éventuellement susceptible d'engendrer des dommages.

Modélisation du phénomène VCE

Le calcul d'un scénario d'explosion d'un nuage est réalisé en plusieurs temps :

- détermination du terme source,
- un calcul de dispersion du nuage inflammable,
- un calcul d'explosion.

Les distances d'effets sont déduites du calcul de dispersion (effets thermiques) et du calcul d'explosion (effets de pression).

2 méthodes sont couramment utilisées pour modéliser ce phénomène :

- Méthode de calcul en équivalent TNT
- Méthode multi-énergie (TNO)

L'idée centrale de ces méthodes est qu'une explosion de gaz produit des effets d'autant plus importants qu'elle se développe dans un environnement encombré ou turbulent dans lequel la flamme peut se propager rapidement, et qu'en dehors de ces zones, les effets de pression associés à la propagation de la flamme sont minimales. Pour une situation réelle où la dimension maximum du nuage explosif a été préalablement estimée, on repère les endroits où la densité d'obstacles ou le degré de turbulence du nuage sont susceptibles d'être importants et on modélise l'explosion globale par une succession d'impulsions de pression engendrées par la propagation de la flamme à travers ces zones. En fait, tout se passe comme s'il n'y avait pas une, mais plusieurs explosions. On associe à chaque explosion « élémentaire » un indice de violence (sur une échelle de 1 à 10 pour la méthode Multi-Energy) qui représente la surpression maximum qui peut être obtenue dans la zone associée. Outre ces considérations géométriques la réactivité propre du gaz inflammable doit être prise en considération.

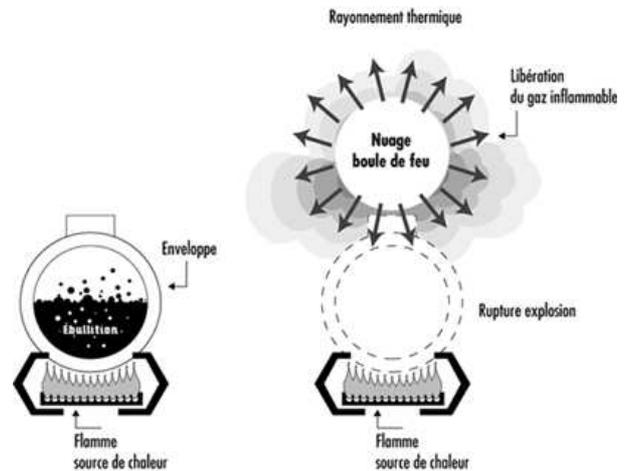
Les distances d'effets calculées ne sont pas liées directement à la quantité de produit rejeté, ni au volume des nuages inflammables formés, mais bien au volume des zones d'encombrement et de confinement. Aussi, des scénarios différents, mettant en jeu des débits de fuite et des quantités de produits différents conduisent aux mêmes distances d'effets si les nuages inflammables formés couvrent les mêmes zones encombrées.

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)

Un BLEVE correspond à la libération brutale d'une masse de gaz liquéfié en état d'ébullition sous pression, suite à l'éclatement ou la perforation d'une enveloppe de stockage suivie d'une inflammation générale immédiate. Il s'agit d'une explosion dont les effets dominants sont les effets de rayonnement plus que de surpression.



Source : www.lorraine.drire.gouv.fr



Description du phénomène

Un BLEVE survient lorsqu'il y a rupture des parois d'un contenant sous pression. 4 facteurs interviennent dans la réalisation de ce phénomène :

- ❑ La pression intérieure : Lorsqu'un réservoir est chauffé, il se produit une augmentation de la pression à l'intérieur du réservoir
- ❑ Le volume de liquide : L'augmentation de la température dans le réservoir entraîne le passage de l'état liquide à l'état gazeux de la substance contenue, il en résulte donc une diminution de la quantité de liquide à l'intérieur.
- ❑ Partie de l'enveloppe du réservoir exposée : Le liquide à l'intérieur peut absorber une partie de la chaleur des parois du contenant et en ralentir sa vitesse d'affaiblissement. Lorsque la quantité de liquide diminue, la surface du contenant exposée à la chaleur augmente.
- ❑ Résistance du contenant: La surface de l'enveloppe du réservoir exposée à la chaleur voit sa résistance diminuée. À 400°C, l'acier perd 30% de sa résistance et à 700°C plus de 90% .

Lorsque la pression intérieure est supérieure à ce que peut supporter le réservoir, le contenant se rompt et le BLEVE survient. On notera que la taille du réservoir intervient dans la vitesse d'apparition du phénomène ; en effet plus ce dernier est petit, plus vite surviendra le BLEVE.

Remarque : Le BLEVE se produit instantanément, sans avertissement. On ne peut entendre aucun bruit et on ne peut observer aucun gonflement nous prévenant.

Accidentologie

Concernant notamment les gaz liquéfiés

- ❑ REPCELAK, 1969 : ruine d'un réservoir de CO₂
- ❑ FEYZIN, 1966 : 18 morts, 84 blessés → Erreur de procédure, incendie
- ❑ LOS ALFAQUES : 1978 : 216 morts, 200 blessés → Accident routier
- ❑ MEXICO, 1984 : 500 morts, 7000 blessés → Rupture canalisation, incendie

Origines

- Corrosion
- Dommages ou fatigues mécaniques
- Hautes températures (Incendie)

Un BLEVE génère plusieurs effets

- Une boule de feu : qui consume ou endommage ce qui se trouve à l'intérieur. Il y a ignition de la substance inflammable lors du BLEVE et une boule de feu en résulte. Il est par ailleurs possible que la substance ne s'enflamme pas lors du BLEVE mais se disperse sous forme de nuages, dans le sens du vent. Elle peut alors s'enflammer soudainement à n'importe quel moment avec des conséquences catastrophiques (UVCE).
- Un rayonnement thermique sur le voisinage immédiat de la boule de feu. Les intervenants devront donc respecter une certaine distance minimale face au réservoir afin d'être épargnés par la radiation. Cette distance a été établie à 4 fois le rayon de la boule de feu.
- Une Onde de pression choc (détonation) : Le BLEVE est une explosion, il va donc générer une onde de choc (détonation), un important déplacement d'air qui va affecter l'environnement proche du réservoir.
- Projection de débris : La plus dangereuse des conséquences d'un BLEVE est la projection des débris. Ces derniers sont propulsés majoritairement vers les extrémités du réservoir. Cette projection est donc imprévisible et peu parfois atteindre des proportions énormes, à quelquefois plus d'un kilomètre. Même si des distances d'approches sont définies, le personnel qui intervient sur le sinistre n'est pas à l'abri des projections. La meilleure solution est donc de procéder à l'évacuation d'une zone qui a été établie, pour être sécuritaire, à 22 fois le rayon de la boule de feu.

Volume du réservoir (en litres)	Temps possible de survenance du BLEVE (en minutes)	Rayon de la boule de feu (en mètres)	Distance minimale d'approche (en mètres)	Rayon d'évacuation (en mètres)
400	3 - 4	18	90	400
4000	5 - 7	38	150	800
40 000	8 - 12	81	320	1800

Tableau 7-1 : Résultats d'essais effectués sur des réservoirs de propane

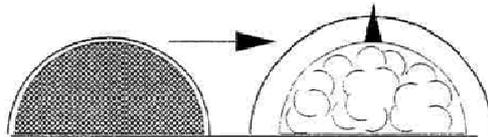
En conclusion, les conséquences d'un BLEVE sont très importantes et le meilleur moyen de se protéger de ces effets est de se tenir le plus loin possible du réservoir.

Cinétique du phénomène

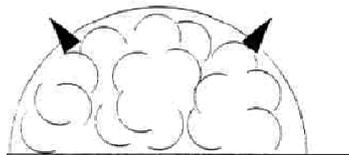
On distingue cinq étapes du développement d'un BLEVE :

Étape 1 : Le réservoir se rompt, des fragments sont éjectés et une onde de surpression est engendrée par la détente de la phase gazeuse. Cette onde est suivie d'une onde de dépression.

Étape 2 : Au cours de cette étape, il y a peu de mélange avec l'air ambiant alors que le nuage s'étend. La vaporisation continue jusqu'à ce que la pression du nuage soit égale à la pression ambiante. Si la vitesse d'expansion du nuage excède la vitesse locale du son, une onde de choc due à l'évaporation instantanée du liquide peut se former. Cette seconde onde de choc n'est observée que lors d'expérimentations pour lesquelles le niveau de remplissage est assez important.

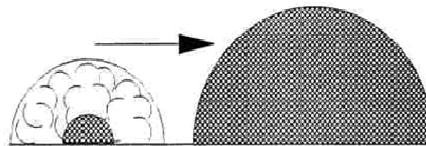


Étape 3 : Les deux ondes de surpression successives ont quitté le nuage. Ce dernier continue à s'étendre, mais à une vitesse qui diminue, alors que le mélange turbulent entraîne de plus en plus d'air. Lorsque la vitesse d'expansion du nuage est du même ordre que la vitesse des tourbillons turbulents, l'expansion du nuage n'est plus alors due qu'aux effets de turbulence.

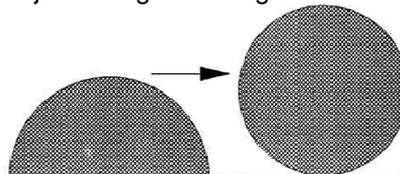


Étape 4 : L'inflammation se produit à proximité du centre du nuage et une boule de feu se développe. L'expansion de la boule de feu s'arrête lorsque tout le nuage est enflammé. C'est alors que la boule de feu est la plus brillante. Puisque le nuage contient de l'air, on suppose que durant cette étape seule la vapeur est consommée et que les gouttelettes n'ont pas le temps d'être vaporisées.

L'expansion du nuage en boule de feu engendre une onde de surpression suivie d'une onde de dépression due à l'arrêt brutal de cette expansion. La vitesse d'expansion de la boule de feu est égale à la vitesse de propagation de la flamme dans le nuage turbulent (cf § UVCE). Bien évidemment, dans la réalité, le nuage de vapeur peut s'enflammer durant chacune des quatre étapes précédentes, mais, puisque de l'air doit être mélangé au nuage, il est probable que la combustion se produise principalement dans la périphérie du nuage et les mécanismes d'expansion sont ainsi similaires, même si certaines étapes peuvent se chevaucher.



Étape 5 : La boule de feu hémisphérique devient plus légère que l'air, elle s'élève pour prendre la forme d'une sphère. Sa combustion continue mais la boule de feu ne s'étend plus, indiquant ainsi que l'air requis pour la combustion est déjà mélangé au nuage.



Le combustible est alors pourvu par les gouttelettes liquides. La boule de feu s'élève alors approximativement à vitesse et volume constant, pour prendre la forme caractéristique d'un champignon. Ensuite, du fait de l'apparition de poches de produits de combustion, l'aire de la flamme visible diminue.

Modélisation du phénomène

Effets thermiques :

Pour étudier un phénomène de BLEVE, « chaud » ou « froid », les effets thermiques doivent être systématiquement modélisés (caractérisation de la boule de feu : diamètre, hauteur, puissance rayonnée, durée de vie). En raison des difficultés à déterminer les critères d'exploitation fiables qui permettraient de s'affranchir de manière générique du BLEVE « chaud » (telle qu'une impossibilité physique de dépasser la TLS), en raison du retour d'expérience qui met en évidence l'impossibilité de déterminer de manière fiable a posteriori si un BLEVE a été « chaud » ou « froid », en raison de l'usage des résultats des modélisations à des fins de protection des tiers par le biais de la maîtrise de l'urbanisation et d'élaboration des plans de secours, **la modélisation à considérer pour la détermination des effets thermiques du BLEVE en tant que potentiel de danger, qu'il soit « froid » ou « chaud », est celle d'un BLEVE « chaud ».**

Les effets thermiques des scénarios étudiés dans l'Étude De Dangers, doivent être modélisés avec les hypothèses de calcul déterminées par l'analyse des risques. Les modèles les plus couramment utilisés pour caractériser la boule de feu sont :

- Le modèle TRC SHIELD
- Le modèle TNO

Effets de surpression :

Les effets de surpression du BLEVE ont été peu étudiés et modélisés en raison de l'impact majorant des effets thermiques. La modélisation de ces effets peut être utile pour :

- le cas où un réservoir est utilisé à moins de 30% de sa capacité nominale
- la détermination des effets dominos par impact sur les structures (seuil de surpression de 200 mbar).
- la détermination des distances d'effets par surpression pour établir les cartes d'aléa pour les PPRT

La propagation de l'onde de surpression dépend de l'environnement dans lequel elle évolue. En deçà de 50 mbar, l'influence de paramètres extérieurs comme le sens et la vitesse du vent, la topographie, la hauteur et la densité du ciel nuageux, les phénomènes de réflexions à grande échelle sur les basses couches de l'atmosphère etc., n'est pas prise en compte par les modèles, bien qu'elle ne soit pas toujours négligeable. Les effets de surpression sont couramment modélisés selon 2 approches :

- Approche énergétique : équivalent TNT
- Approche par RANKINE-HUGONIOT : P_{max} puis décroissance en $1/x$

Projections de fragments :

Bien qu'il existe dans la littérature des méthodes pour le calcul de la projection de fragments d'un réservoir qui éclate, aucune ne semble véritablement adaptée à la physique du BLEVE. L'effet d'un « gros » fragment (plus de 1 kg), peut être mesuré à sa vitesse d'impact au sol. Cette vitesse est égale à sa vitesse de chute libre, et dans le cas d'un BLEVE, un fragment de ce type est toujours susceptible d'entraîner l'effet léthal.

La projection de fragment est l'effet qui donne la plus grande distance à la létalité. Néanmoins, cet effet doit être relativisé car il est ponctuel. Il ne se manifeste qu'au point d'impact du fragment, à la différence des effets de pression et des effets thermiques. En l'état des connaissances, aucun modèle particulier n'est préconisé. Pour tous types de réservoirs confondus, on considère de manière conservatrice que 80 % des fragments projetés à moins de 250 mètres. 90 % des fragments projetés à moins de 400 mètres et la distance de projection maximum observée est de 1200 mètres.

❑ BOIL OVER

Un Boil Over est un phénomène de moussage de grande ampleur impliquant des réservoirs aériens et résultant de la vaporisation d'eau liquide contenue dans des réservoirs atmosphériques de certains hydrocarbures en feu. Ce phénomène est à l'origine de violentes projections de liquide enflammé et de la formation d'une boule de feu.



Photo A-2 : Boil-over à port Edouard Herriot (Rhône) le 2 juin 1987

Description du phénomène

Ce phénomène est similaire à l'ajout d'eau dans de l'huile chaude. Quatre conditions sont donc à réunir :

- ❑ La présence d'eau au fond du réservoir susceptible d'être transformée en vapeur
- ❑ La création d'une onde de chaleur (ou, en d'autres termes d'une zone chaude) qui entre en contact avec le fond d'eau situé sous la masse d'hydrocarbures.
- ❑ Un hydrocarbure suffisamment visqueux, pour que la vapeur créée au contact de la zone chaude et de l'eau en fond de réservoir ne puisse pas traverser facilement depuis le bas du réservoir.
- ❑ Un hydrocarbure, enfin, dont la température d'ébullition moyenne soit suffisamment élevée.

Il est à noter que, même si le phénomène en lui-même est très rapide (quelques secondes), plusieurs heures sont nécessaires pour générer l'onde de chaleur et l'amener au contact de l'eau, pour enfin provoquer le boil over. Ce délai peut être utilisé pour évacuer les populations environnantes.

Accidentologie

Des BOIL OVER ont été observés lors de cinq accidents graves:

- Yokkaichi (Japon), le 15 octobre 1955 ;
- Tacoma (Venezuela), le 19 décembre 1982 ;
- Milford Haven (GrandeBretagne), le 30 août 1983 ;
- Thessalonique (Grèce), le 24 février 1986 ;
- Port Edouard-Herriot (France), le 2 juin 1987.

Origines

- Présence d'eau dans le réservoir (teneur en eau de l'hydrocarbure, pénétration de l'eau de pluie au travers des événements, condensation sur les parois internes, introduction d'eaux d'extinction)
- Incendie prolongé en partie supérieure
- Propagation d'une onde de chaleur
- Vaporisation de l'eau (1 m³ d'eau ~ 1600 à 2000 m³ de vapeur).

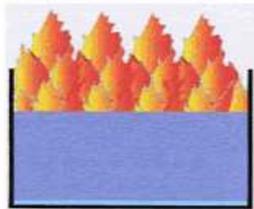
Un BOIL OVER génère plusieurs effets

- Une explosion (rupture de la capacité) ;
- Une éjection de liquide en émulsion et en feu. (extension de l'incendie) ;
- Une boule de feu avec ses retombées (effets thermiques).

La cinétique du phénomène

La cinétique de l'accident est la suivante :

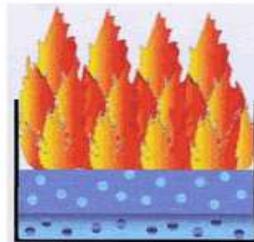
1. Lors de l'incendie, les substances à bas point d'ébullition se vaporisent et alimentent l'incendie.



2. Les substances à haut point d'ébullition ne brûlent pas, forment une couche chaude qui s'enfonce doucement dans le réservoir.



4. La couche chaude finit par entrer en contact avec l'eau présente en fond de bac, et provoque son ébullition très rapide.



5. La vapeur d'eau expulse les hydrocarbures au dessus d'elle, formant une colonne de feu accompagnée de la projection de liquides enflammés.



Modélisation du phénomène

La première méthodologie proposée pour quantifier de façon déterministe les phénomènes de boil over est le fruit d'un partenariat de recherche dirigé par **TOTAL RAFFINAGE EUROPE** et regroupant l'**INERIS** (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques), et **EDF-CLI** (Electricité de France, Centre Lyonnais d'Ingénierie).

Cette approche méthodologique a pris en compte notamment les travaux expérimentaux de l'allemand Broeckmann (1992), de l'américain Risinger (1973) et du japonais Kasegawa (1988,1990).

Dans cette approche, la quantification des conséquences d'un boil over est réalisée en supposant qu'un certain nombre d'événements simultanés et indépendants, de probabilité très faible, se produisent néanmoins, à savoir notamment que :

- L'hydrocarbure impliqué soit porté à une température supérieure au point éclair pour générer des vapeurs inflammables en suffisance ;
- Ces vapeurs accumulées sous le toit du réservoir viennent à s'enflammer ;
- Les services de sécurité demeurent dans l'incapacité d'éteindre le feu de bac dans des délais compris entre quelques heures et une journée.

FEU DE NAPPE

Le terme « feu de nappe » ou « feu de flaque », décrit un incendie résultant de la combustion d'une nappe de combustible liquide. Ce phénomène implique principalement la surface de la nappe en contact avec l'air

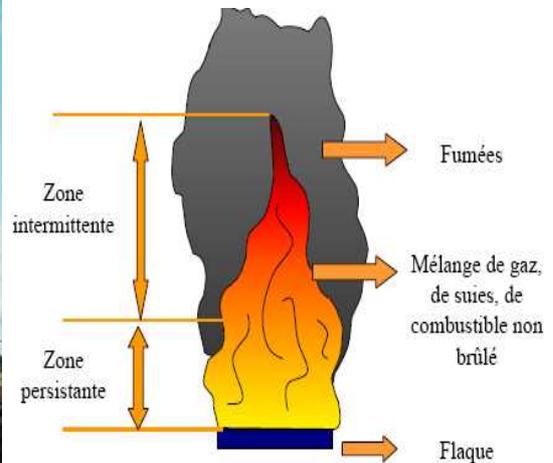


Figure 3 : Représentation schématique de la flamme

Description du phénomène

Le feu de nappe résulte de la présence simultanée d'une nappe de liquide inflammable portée à une température supérieure à son point éclair et d'un point chaud (étincelle, flamme nue, métal incandescent,...).

D'une manière générale, le phénomène de combustion d'un produit intéresse les vapeurs émises par le produit réchauffé. Pour qu'un produit brûle, il faut donc qu'il émette des vapeurs inflammables. Pour les combustibles liquides, les vapeurs inflammables sont émises par évaporation de la phase liquide. Pour les combustibles solides, un processus plus complexe mettant en jeu notamment des réactions de décomposition, fusion ou pyrolyse est indispensable à l'émission de gaz ou distillats inflammables.

La combustion a ainsi lieu en phase gazeuse dans la zone qualifiée de « flamme ». Une partie de l'énergie libérée par l'exothermicité de la réaction de combustion est cédée (rétrocession d'énergie) au combustible, entretenant ainsi l'émission de gaz inflammables. Le feu de nappe est donc un phénomène de combustion auto-entretenu.

Origines

La nappe de liquide inflammable résulte fréquemment d'une fuite, plus ou moins importante. Il est à noter que le point chaud en lui-même, s'il est maintenu suffisamment longtemps, peut initier l'incendie d'un liquide dont la température est inférieure au point éclair : le point chaud en lui-même peut porter localement le liquide à une température supérieure à son point éclair, démarrer l'incendie qui se généralise ensuite à toute la nappe.

Les conséquences d'un feu de nappe

L'impact d'un feu de nappe dépend de la taille de la surface en feu, du produit qui se consume et de la durée de l'incendie. Par contre, si l'incendie se développe à proximité de stockages de matières combustibles, des effets dominos peuvent être observés et les conséquences peuvent être dramatiques (incendie plus violent, explosion...).

De manière générale, les principales conséquences observées de manière récurrente sont la pollution des eaux de surface ainsi que la contamination des sols, voire des eaux souterraines, plus rarement, des blessés ou des morts.

Accidentologie

Le feu de nappe est un accident relativement fréquent mais présentant, s'il est correctement maîtrisé, des conséquences faibles sur l'homme.

On les retrouve notamment dans les circonstances suivantes :

- Les incendies résultant d'un débordement : principalement feux de bacs ou de cuvettes concernant des hydrocarbures ;
- Les incendies concernant les stockages de solvants ;
- Les incendies survenus dans des entrepôts.

Les causes identifiées dans les accidents connus sont fréquemment liées :

- A la malveillance ;
- A l'épandage accidentel de combustible survenu de manière récurrente suite à une fuite sur des équipements de transferts (pompe, raccord de ligne de vidange, vanne, canalisation, regard de purge ;
- Au sur-remplissage d'une capacité.

Concernant les sources d'inflammation du combustible, elles peuvent être de nature diverse (Moteur électrique, Travaux de soudage, Étincelle, Foudre et mauvaise équipotentialité, ...)

Les facteurs qualifiés d'« aggravants » sont :

- L'absence de capacités de rétention ;
- Une cuvette commune à plusieurs bacs, voire à tout un dépôt ;
- L'alimentation continue du feu en combustible par la non fermeture des vannes, résultant d'un dysfonctionnement ou d'une erreur humaine associée à un défaut de conception du système de sécurité ;
- L'entraînement des hydrocarbures enflammés par les eaux d'extinction, facilitant la propagation de l'incendie.

En ce qui concerne la gravité de tels évènements, les comptes rendus des accidents passés font part de victimes chez les pompiers ou le personnel de l'installation et d'importants dommages matériels sur l'installation ou sur l'environnement proche (habitations voisines, végétation, points d'eau, cours d'eau ou station d'épuration polluées, sols souillés par les hydrocarbures, pollution atmosphérique...).

Enfin, la durée des accidents est relativement longue. La lutte et l'extinction des feux de cuvette ou de bac sont des opérations souvent difficiles qui se chiffrent en plusieurs dizaines d'heures voire quelques jours.

Cinétique du phénomène

Les différentes formes de combustion se caractérisent notamment par leur cinétique chimique :

- La combustion lente : elle se distingue par une absence de flamme et d'incandescence ainsi que par la faible exothermicité de la réaction. Cette combustion peut, sous couvert de modifications réactionnelles, se transformer en combustion vive et conduire à des feux de surface ;
- La Combustion vive : cette forme de combustion caractérise les feux de surface. Le feu de nappe est en effet une combustion vive, généralement accompagnée de l'émission de lumière et de chaleur. La vitesse d'émission de calories est relativement élevée ce qui entraîne une forte exothermicité de la réaction. Les paragraphes à venir seront donc essentiellement consacrés à ce dernier mode de combustion ;
- La combustion très vive et la combustion instantanée : ces types de combustions caractérisées par une vitesse de réaction très élevée ne relèvent pas a priori de l'étude des feux de nappe.

La combustion des produits liquides (par ex. les hydrocarbures) intéresse les vapeurs émises par le produit réchauffé et non le liquide lui-même. De manière schématique, le combustible émet une certaine quantité de vapeurs à une température donnée. Cette émission de vapeurs conduit à la formation d'une zone riche en combustible au dessus de la nappe. Au fur et à mesure de son élévation, le combustible entraîne de l'air froid extérieur.

Lorsque le mélange air-combustible se trouve dans le domaine d'inflammabilité et en présence d'une source d'inflammation, il s'enflamme. Les gaz brûlés sont ensuite évacués vers le haut tout en continuant à entraîner l'air ambiant. L'essentiel de l'air entraîné (environ 90%) depuis la base de la flamme jusqu'à son sommet dilue les produits de la combustion tout en les refroidissant [25].

L'inflammation du mélange gazeux composé des vapeurs de combustibles et de l'air est fonction de la concentration de vapeurs de combustibles dans l'air. Chaque produit possède ainsi un domaine d'inflammabilité spécifique, représenté de manière schématique dans la Figure ci-dessus. Ce domaine est délimité par :

- La Limite Inférieure d'Inflammabilité (L I I) s'exprimant en % de gaz en volume dans l'air. En-dessous de cette limite, le mélange est trop pauvre en combustible (ou trop riche en oxygène) pour que la flamme puisse se propager dans le milieu gazeux ;
- La Limite Supérieure d'Inflammabilité (L S I) s'exprimant en % de gaz en volume dans l'air. Au-dessus de cette limite, le mélange est trop riche en combustible (ou trop pauvre en oxygène) pour que la flamme puisse se propager dans le milieu gazeux ;
- La courbe de condensation dans la partie gauche ;
- La courbe d'auto-inflammation, qui correspond à une inflammation « spontanée » du mélange.

Modélisation du phénomène

Effets thermiques :

Le rayonnement est le mode de transfert privilégié de la chaleur dans un plan horizontal pour des feux de grande taille. Ainsi, il convient de s'intéresser en priorité à ce mode de transfert de chaleur, notamment lorsqu'il s'agit de déterminer des distances d'effets thermiques sur l'homme.

Plusieurs méthodes peuvent être mise en œuvre pour modéliser ce mode de transfert. Les plus courantes sont :

- Le modèle du point source ;
- Le modèle de la flamme solide.

Dans le premier modèle, le flux thermique transmis par radiation est supposé émis par une source ponctuelle. Dans le second modèle en revanche, la flamme est assimilée à un volume de géométrie simple (cylindre, cône ou parallélépipède rectangle) rayonnant de manière uniforme sur toute sa surface.

Le modèle du point source est basé sur les hypothèses suivantes :

- La flamme est assimilée à une source ponctuelle ;
- Cette source ponctuelle est supposée rayonner avec une puissance équivalente à celle de la totalité de la flamme ;
- La densité de flux thermique radiatif reçue varie inversement au carré de la distance entre la source et la cible.

Dans le modèle de la flamme solide, la flamme est assimilée à un volume opaque de géométrie simple (cylindre, parallélépipède rectangle...) dont les surfaces rayonnent uniformément. Ce modèle repose notamment sur les hypothèses suivantes :

- Le volume visible de la flamme émet des radiations thermiques vers la cible alors que la partie non visible n'en émet pas ;

- La flamme est assimilée à un volume géométrique simple (cylindre, parallélépipède, cône..). La base de ce volume correspond alors à la base du feu et sa hauteur à la hauteur pour laquelle la flamme est visible 50 % du temps.

Bien entendu, les adaptations et les variantes de ce modèle de la flamme solide peuvent être multiples, par exemple :

- Le modèle de flamme solide à une zone

Pour le modèle à une zone, la flamme est supposée rayonner de manière uniforme sur toute sa surface, ce qui revient à considérer une température de flamme et une composition homogènes sur toute la hauteur de la flamme

- Le modèle de flamme solide à deux zones

Le modèle de la flamme solide à deux zones reprend en partie les hypothèses présentées pour le modèle à une zone, la différence portant sur une discrétisation de la flamme en :

- Une zone persistante en partie basse, de pouvoir émissif élevée ;
- Une zone intermittente, de pouvoir émissif généralement plus faible.

Ces deux zones permettent de prendre en compte les observations expérimentales d'une flamme qui mettent en évidence la présence d'une zone basse de géométrie quasi-constante dans le temps et l'espace et une zone dont la forme change continuellement.

FEU DE TORCHE

Les feux « torche » sont le résultat de l'inflammation de fuites accidentelles de gaz ou de liquide qui peuvent être très dévastateurs en milieu industriel



Description du phénomène

Dans l'environnement industriel, les feux de torche appelés également feux chalumeau peuvent survenir suite à des fuites accidentelles de fluides inflammables ou à des évacuations intentionnelles de sous-produits par l'intermédiaire de torchères.

Le système de torchère est très couramment utilisé dans l'industrie pétrolière pour évacuer sans danger d'importantes quantités de vapeurs inflammables superflues. Les torchères sont en général des feux de torche bien contrôlés par l'industriel et qui représentent donc que peu de dangers pour l'environnement. En revanche, les feux de torche qui sont le résultat de l'inflammation de fuites accidentelles de gaz ou de liquide peuvent être très dévastateurs en milieu industriel.

Origines

Les feux de torche accidentels proviennent en général de fuites à un raccord ou à une vanne, de parois perforées ou de ruptures de canalisation. Ces fuites produisent des dards enflammés pouvant occasionner de graves avaries sur le reste de l'installation et donc conduire à la propagation de l'incendie ou provoquer de nouveaux accidents tels que le phénomène de BLEVE de réservoirs.

Le phénomène de feu de torche a pour origine un rejet de fluides combustibles, généralement à l'état gazeux, qui s'enflamme :

- Spontanément si sa température est suffisamment élevée ;
- En raison de points chauds ;
- Par démarrage d'un véhicule situé à proximité (étincelle) ;
- Par action de la foudre.

Les produits enflammés sont divers et vont des gaz tels que l'hydrogène, le propane, l'acétylène à l'huile de lubrification.

Afin de se prémunir de tels évènements, il est important de pouvoir prévoir et évaluer les conséquences associées aux feux torche. Pour ce faire, il est notamment nécessaire d'estimer les caractéristiques géométriques de la flamme et de déterminer le flux radiatif émis par la flamme.

Accidentologie

Les accidents impliquant des feux torche peuvent être dévastateurs et néfastes pour l'environnement lorsqu'ils sont le résultat d'évènements accidentels et non d'une démarche volontaire de réduction des risques (dégagement de gaz excédentaires par les torchères dans les raffineries de pétrole).

Les feux de torche se produisent généralement sur des canalisations, mais une fissure ou une perforation sur un stockage ou encore une vanne de purge restée ouverte peuvent également être à l'origine d'un tel phénomène. L'analyse des accidents passés fait part d'accidents de ce type notamment dans les raffineries de pétrole, les industries chimiques ou encore sur des conduites terrestres et enterrées de produits inflammables. Les feux torche peuvent donc aussi bien se produire en milieu industriel qu'en milieu urbain (conduites de gaz de ville, ...).

Dans certains cas, lorsqu'une fuite de gaz toxiques et inflammables survient, les services de secours préfèrent brûler la substance plutôt qu'elle ne se disperse. Le fait d'enflammer la fuite peut éviter une pollution notable de l'atmosphère mais également que le nuage inflammable ne se déplace et n'aille s'enflammer plus loin au risque d'engendrer dès lors un feu de nuage (flash-fire ou VCF) ou une explosion (VCE).

Causes identifiées :

- La défaillance matérielle : corrosion de conduite, contraintes mécaniques trop fortes, fissure de soudure
- La défaillance humaine provenant soit de travaux de maintenance et d'exploitation inhérents à la structure visée, soit de travaux totalement indépendants comme la perforation d'une canalisation par des engins de terrassement
- Les agressions naturelles comme la foudre frappant une canalisation enterrée.

Les conséquences d'un feu de torche

Parmi les conséquences les plus critiques, il convient de citer des pertes humaines (ouvriers, conducteurs de camions...) et matérielles (effets dominos) pouvant entraîner également une perte de production.

Par ailleurs, quelques éléments observés donnent une idée qualitative des conséquences des feux torche :

- Les débits de fuite qui représentent des quantités importantes de combustibles rejetés ;
- L'orientation de la flamme qui peut avoir une influence déterminante sur l'occurrence d'effets dominos ;
- Les hauteurs de flamme d'une dizaine voire de plusieurs dizaines de mètres ;
- Les températures importantes atteintes autour du sinistre qui soulignent le caractère dévastateur du feu torche (accident du 05/10/85 : « Les terrains sont calcinés à des distances considérables : 1400 °C à 60 m, 1100 °C à 76 m, 600 °C à 97 m, 450 °C à 125 m. », accident du 28/07/94 : « le maïs est brûlé sur 30 m de rayon » et cas n°4914 : « 57 bêtes [...] périssent carbonisées »).

Une caractéristique particulière du feu torche réside dans sa propension à entraîner des effets dominos sur les équipements alentour. A titre d'illustration, il peut être à l'origine d'accidents aux conséquences dramatiques tels que :

- BLEVE de sphères et de cigares de stockage générant des boules de feu ;
- Explosion de véhicules qui sont en général à l'origine de l'allumage du feu torche ;
- Feux torche et explosions de canalisations ;
- Projections de missiles (fragments de canalisations, de sphères, de véhicules...) à plusieurs centaines de mètres.

Cinétique du phénomène

Lorsqu'un jet liquide ou gazeux issu d'une fuite accidentelle s'enflamme par l'intermédiaire d'une source d'inflammation quelconque (par exemple, une surface chaude), le feu torche prend naissance sous forme d'une flamme de diffusion.

Le jet combustible émerge d'une canalisation ou d'un orifice et entre dans l'air ambiant qui est en général au repos. La principale caractéristique de la flamme de diffusion est que le combustible et l'air

sont initialement séparés et que la combustion se produit dans la zone où le mélange comburant-combustible se fait.

Le jet combustible se mélange ainsi à l'air par entraînement et diffusion et avec l'aide d'une source d'inflammation, se met à brûler seulement lorsque les concentrations de combustible et d'air sont comprises dans une plage définie entre les limites d'inflammabilité (domaine d'inflammabilité).

- La Limite Inférieure d'Inflammabilité ou d'Explosivité (LII ou LIE) s'exprimant en % de gaz en volume dans l'air ;
- En dessous de cette limite, le mélange est trop pauvre en combustible (ou trop riche en oxygène) pour que la flamme puisse se propager dans le milieu gazeux ;
- La Limite Supérieure d'Inflammabilité ou d'Explosivité (LSI ou LSE) s'exprimant en % de gaz en volume dans l'air. Au-dessus de cette limite, le mélange est trop riche en combustible (ou trop pauvre en oxygène) pour que la flamme puisse se propager dans le milieu gazeux ;
- La courbe de condensation;
- La courbe d'auto-inflammation, qui correspond à une inflammation « spontanée » du mélange.

Outre l'effet sur l'apparence de la flamme, la vitesse de jet exerce également une influence sur la hauteur de flamme ainsi que sur la forme et la taille de la fuite accidentelle. En pratique, il est d'usage de relier la hauteur de flamme à un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds qui caractérise le régime d'écoulement.

Modélisation du phénomène

Les descriptions et les caractéristiques géométriques des feux de torche accidentels et des torchères pétrolières sont similaires à celles des jets enflammés turbulents (plus rarement, laminaires) en phase gazeuse, étudiés à l'échelle du laboratoire. Ces différentes études ont ainsi permis d'acquérir une bonne compréhension du phénomène et de modéliser analytiquement, puis numériquement, les différentes caractéristiques du feu de torche.

La flamme ne se comporte pas de la même façon si l'écoulement est laminaire ou turbulent et si celui-ci est plutôt dominé par la convection forcée ou naturelle.

Deux méthodes simples sont couramment mises en œuvre pour modéliser ces comportements :

- Le modèle de flamme à diffusion laminaire de Hottel & Hawthorne (1949)
- Le modèle de Hawthorne (1949), de Brzustowski (1971, 1973) ou le modèle semi-empirique l'API RP 521 (1997) pour les flammes de diffusion turbulente

Modèle de Hawthorne :

Ce modèle correspond au feu de torche turbulent dominé par la convection forcée dans lequel la convection naturelle est négligeable (fort nombre de Froude). Elle donne des résultats en bon accord avec les mesures faites sur les flammes turbulentes pour un large panel de gaz (Lewis & Von Elbe, 1987 et Kanury, 1975) et montre que la flamme est linéairement dépendante du diamètre d'injection mais indépendante du débit volumétrique.

Modèle de Brzustowski :

Brzustowski propose d'intégrer un critère sur la concentration en combustible qui doit être égale à la limite inférieure d'inflammabilité au sommet des flammes de diffusion fortement turbulentes (variables pour les très hauts nombres de Reynolds). A noter que l'équation du modèle de Brzustowski ressemble fortement à l'expression obtenue par Hawthorne & al.(1949).

Modèle de l'API RP 521 :

Les modèles susmentionnés présentent des approches physiques voire semi-empiriques pour déterminer la longueur de flamme. A l'aide de différents résultats d'expériences donnant la longueur

de flamme en fonction de la puissance calorifique liée au débit à l'orifice, le modèle suivant propose de définir la longueur de flamme plus simplement par une corrélation empirique

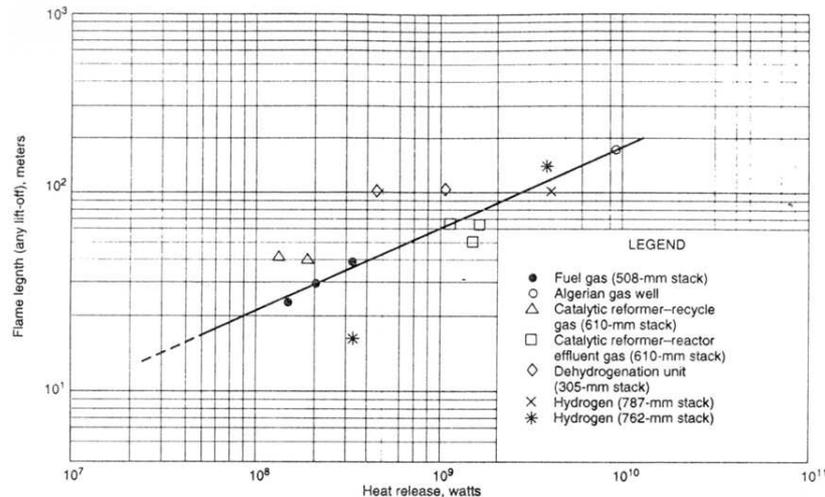


Figure A-2 : Longueur de flamme fonction de la puissance du feu torche (API RP 521, 1997).[84]

La corrélation donnée dans le guide de l'API RP 521 (1997) ne traite que des rejets gazeux et ne prend pas du tout en compte l'effet du vent. Etant donné que l'échelle du graphique est une échelle logarithmique, cette formule est quelque peu approximative mais elle permet en employant la méthode de la source ponctuelle (voir § 4.4.1.1) dans le cadre du calcul des flux rayonnés de simplifier les expressions finales concernant les distances d'effets.

Effets thermiques

Les effets thermiques d'un feu torche peuvent être de deux sortes, radiatifs et convectifs. En effet, si la cible n'est pas dans l'environnement proche du feu torche, elle ne reçoit qu'un flux radiatif. En revanche, si elle est impactée directement par le jet enflammé, en plus d'un flux radiatif maximal, elle recevra un flux convectif dû à l'écoulement forcé des gaz brûlés.

Ainsi, plusieurs méthodes pourront être mise en œuvre :

- ❑ L'une dite de la « source ponctuelle » et l'autre de la « flamme solide » pour la détermination sur l'environnement des effets thermiques radiatifs ;
- ❑ Une méthode permettant d'estimer le flux convectif que peut recevoir une cible directement touchée par le feu torche.

FEU DE MATERIAUX SOLIDE

L'incendie est le risque d'accident dominant pour les entrepôts et, selon la nature des produits stockés ce risque sera plus ou moins important pour l'homme et l'environnement.

Les entrepôts couverts pour le stockage de matières, produits ou substances combustibles en quantité supérieure à 500 tonnes sont visés par la rubrique n°1510 de la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement.



Photo A-3 : entrepôt d'archives de la société INTRADIS à ROYE (80) a brûlé le 28 janvier 2002 [Source : <http://www.drire.gouv.fr/picardie>]

Ces entrepôts sont :

- ❑ Soit utilisés par des entreprises qui font uniquement du stockage, on parle alors de plateforme logistique. Dans ce cas, la nature des produits stockés est très variable (HIFI, produits alimentaires, produits chimiques, ...); leurs caractéristiques de danger (combustible, inflammable, toxique, ...) présentant plus ou moins de risques pour l'homme et l'environnement ;
- ❑ Soit utilisés par des entreprises qui les exploitent parallèlement à d'autres activités, pour stocker des matières premières ou des produits finis, on parle alors d'entrepôts dédiés. Dans cette configuration, la nature des produits stockés évolue très peu car en rapport avec l'activité principale de l'établissement.

Description du phénomène

Les feux d'entrepôts ont la particularité de commencer à l'intérieur d'un bâtiment, en milieu relativement confiné avec une toiture et des murs. Les effets sont donc dans un premier temps limités au bâtiment (voire compartiment) d'origine. Ensuite, au fur et à mesure que l'incendie se développe, se propage puis se généralise dans l'entrepôt, les effets de l'incendie d'entrepôt sont perceptibles à l'extérieur du bâtiment.

Les effets d'un incendie d'entrepôt sur l'environnement sont d'ordre thermique (du aux flammes) et d'ordre toxique (dû aux fumées). Aucun effet de pression direct n'est lié au feu d'entrepôt.

Origines

Les origines des feux d'entrepôts sont les suivantes :

- Étincelle, défaut électrique ;
- Point chaud ;
- Malveillance ;
- Foudre ;

Généralement, les seuils d'énergie nécessaires à l'inflammation des matériaux solides sont plus élevés que pour des produits liquides inflammables tels que des hydrocarbures.

Les conséquences d'un feu d'entrepôt

Les conséquences liées au développement d'un incendie d'entrepôt peuvent être classées selon 6 catégories :

- les effets thermiques : chaleur reçue par une cible
- les effets toxiques : selon la nature des produits stockés, les fumées dégagées en cas d'incendie peuvent être plus ou moins toxiques (présence de plastiques, ...) ;
- les effets visuels : les fumées d'incendie diminuent généralement la visibilité dans l'entrepôt et, le cas échéant, dans l'environnement proche ;
- les effets sur le bâtiment : sous l'effet de la chaleur, les structures sont susceptibles de se déformer, voire s'écrouler ;
- la pollution éventuelle des sols par les eaux d'extinction ;
- la pollution des cours d'eaux et nappes phréatiques par les eaux d'extinction.

Enfin, par " effets dominos ", la propagation de l'incendie aux bâtiments voisins est également à redouter si l'éloignement n'est pas suffisant ou si certaines dispositions constructives n'ont pas été mises en œuvre.

Cinétique du phénomène

Le développement d'un incendie dans un entrepôt est lent relativement aux autres phénomènes décrits dans ce document. L'inflammation débute par l'ignition d'une partie de combustible dans une zone localisée de l'entrepôt. La propagation se fait à la fois par convection naturelle et par rayonnement des flammes. Ensuite, les gaz chauds accumulés sous la toiture contribuent à accélérer la propagation du feu jusqu'à sa généralisation dans le compartiment d'origine.

La généralisation du feu à l'ensemble du bâtiment prendra de quelques minutes à plus d'une heure suivant le type de combustible présents et leur disposition dans l'entrepôt.

CINETIQUE DES PHENOMENES DANGEREUX

Le tableau suivant récapitule les principaux phénomènes susceptibles de survenir sur un site industriel et l'ordre de grandeur des temps associés à la montée en puissance du phénomène redouté, de la durée du phénomène ainsi que les effets associés qui seront recherchés lors de l'occurrence de ces phénomènes.

Phénomène dangereux	Délai d'occurrence d_1	Durée de montée en puissance du phénomène jusqu'à son état stationnaire d_2	Effets recherchés P-Pression Th-Thermique Tox-Toxique M-Missile
Décomposition explosive de produits¹	Immédiat dès la rupture du conditionnement	Quelques millisecondes	Tox+ P M+ Th (Th non prépondérant)
VCE	Plusieurs secondes à 2-3 minutes (formation du nuage à la LIE)	Quelques millisecondes (inflammation du nuage)	P + Th
BLEVE « chaud »	Immédiat dès la rupture de la citerne	Plusieurs secondes (expansion de la boule de feu et combustion de la boule de feu)	Th, P et M
Explosion de capacité (ou BLEVE froid)	Immédiat dès la rupture de la citerne	Plusieurs secondes (expansion volumique du produit)	Th, P et M
Boil-over	Immédiat dès que l'eau s'évapore	Plusieurs secondes (expansion de la boule de feu et combustion de la boule de feu)	Th + Tox
Feu torche	Immédiat dès l'inflammation du produit	Plusieurs minutes à heures	Th + Tox
Dispersion d'une substance toxique	Immédiat dès la libération du produit	Plusieurs minutes à heures	Toxiques
Feu de nappe	Immédiat dès l'inflammation du produit	Plusieurs minutes à heures	Th + Tox
Incendie entropôt	Immédiat dès l'inflammation du produit	Plusieurs minutes à heures	Th + Tox
Incendie de matières solides en milieu confiné	Immédiat dès l'inflammation du produit	Plusieurs minutes à heures	Th + Tox

Tableau 7-2 : Cinétique post-accidentelle des phénomènes dangereux (source INERIS)

Concernant le délai d'atteinte des cibles (délai nécessaire à l'atteinte d'un effet physique sur la cible), il est important de préciser :

- ❑ Ce délai est toujours négligeable pour les effets de pression et les effets thermiques. En effet, l'onde de surpression se propage à la vitesse du son dans l'atmosphère et ne laisse donc aucune latitude pour permettre la mise à l'abri des personnes. Concernant les effets thermiques, le rayonnement se propageant à la vitesse de la lumière, l'atteinte des cibles est immédiate. Mais cette fois-ci, contrairement aux effets de pression, la durée d'exposition de la personne entre en jeu. En effet, pour des phénomènes violents (BLEVE / Boil-over / VCE), le temps de référence est du même ordre de grandeur que la durée du phénomène et pour des phénomènes moins violents (feux de nappe, feux de solides), le temps de référence devient alors de l'ordre de 2 minutes (en raison de la définition des seuils).
- ❑ Ce délai n'est pas négligeable pour les effets toxiques. En effet, dans ce cas, le nuage toxique se propage dans un premier temps à la vitesse du jet résultant de l'émission initiale et dans un deuxième temps à la vitesse de l'écoulement du vent. De plus, la durée d'exposition et les seuils de toxicité associés au produit rejeté jouent un rôle important. En effet, les temps d'atteinte aux cibles seront très différents selon que le produit possède un potentiel toxique élevé (observé a priori donc plus près de la source et donc un temps d'atteinte faible) ou un

potentiel bas (observé a priori donc plus loin de la source et donc un temps d'atteinte plus grand).

Pour l'élaboration des PPRT, et notamment la hiérarchisation des scénarios d'accident, la cinétique des phénomènes dangereux doit être estimée et cotée selon une échelle allant de 1 à 6 (0 correspondant à la cinétique la plus lente et 5 à la plus rapide). De façon simplificatrice, cette cinétique est extrapolée à la phase post-accidentelle du scénario d'accident considéré. L'estimation post-accidentelle est qualitative et l'échelle de cotation à 6 niveaux est la suivante : Très rapide (5), rapide (4), rapide mais retardé (3), rapide mais très retardé (2), long mais immédiat (1), très long mais immédiat (0).

Le niveau 0 « très long mais immédiat » qualifie la cinétique des scénarios d'incendie de liquides inflammables dont le développement peut être particulièrement long compte tenu du temps nécessaire au remplissage de la cuvette. Cependant, pour coter la cinétique d'un scénario à 0, des justifications quantitatives concernant ce temps de remplissage doivent être fournies par l'exploitant.

Même si la démarche ne considère, d'une façon générale, que la phase post-accidentelle des scénarios d'accident, la spécificité des scénarios BLEVE et Boil-Over conduit à nuancer le niveau 4 « rapide » en deux sous niveaux pour intégrer la particularité de la phase pré accidentelle :

- Niveau 2 « rapide mais très retardé » pour le Boil-Over ;
- Niveau 3 « rapide mais retardé » pour le BLEVE.

Le niveau 2 « rapide mais très retardé » qualifie essentiellement la cinétique d'un scénario Boil-Over. Il est à noter que ce scénario sera traité à part dans le cadre de la maîtrise de l'urbanisation et de l'élaboration des PPRT. En effet, quelque soit le classement de ce scénario, les distances d'effets seront considérées pour définir les règles d'urbanisme s'appliquant aux établissements recevant du public difficilement évacuables.

Phénomène dangereux	Dynamique pré-accidentelle	Dynamique post-accidentelle				Terminologie du scénario	Indice de cinétique
		d1	d2	d3	d4		
Décomposition explosive de produits ²	secondes à heures (rapide)	instantané	instantané	instantané	instantané	Très rapide	5
		rapide					
VCE	millisecondes (très rapide)	secondes	millisecondes	immédiat	instantané	Très rapide	5
		rapide					
BLEVE « chaud »	minutes (retardé)	immédiat	secondes	immédiat	instantané	Rapide mais retardé	3
		rapide					
Explosion de capacité (ou BLEVE froid)	minutes (retardé)	immédiat	Secondes	immédiat	instantané	Rapide mais retardé	3
		rapide					
Boil-over	heures (très retardé)	immédiat	secondes	immédiat	instantané	Rapide mais très retardé	2
		rapide					
Feu torche	immédiat à minutes	immédiat	minutes à heures	immédiat	minutes à heures	Long mais immédiat	1
		long					
Dispersion d'une	immédiat	immédiat	minutes à heures	Minutes à heures	minutes à heures	Long mais	1

Tableau 7-3 : Dynamique post-accidentelle des phénomènes dangereux (source INERIS)

ANNEXE B EFFETS THERMIQUES SUR LES PERSONNES

FLUX THERMIQUE RADIATIF INCIDENT

Effets du flux thermique radiatif

Le flux thermique radiatif participe aux risques pour les personnes et contribue de manière importante au développement du feu. Avec la température, il présente des risques pour les personnes : le flux thermique engendre des brûlures directes de la peau en fonction de l'exposition. Les différents effets pathologiques observés en fonction du flux thermique sont présentés dans le tableau suivant :

Flux thermique (kW/m ²)	Effet physiopathologique	Effet descriptif ou correspondance
1,0	-	Rayonnement solaire en zone tropicale
2,5	Limite de tenabilité de la peau en 30 minutes	-
5,0	Cloques en 30 secondes	Bris de vitres par effet thermique
9,5	Seuil de douleur en 6 secondes	-
90,0	Destruction immédiate des tissus	Rayonnement émis par une surface chaude (<850°C)
150,0	-	Rayonnement émis par une surface très chaude (1000°C)

Tableau 7-4 : Effets du flux thermique radiatif

Le Tableau 7-4 et différentes sources bibliographiques donnent une limite de tenabilité de la peau de 2,5 kW/m². Le flux radiatif dépend strictement de la direction de propagation, car il est de nature électromagnétique. Il chauffe donc en priorité les zones corporelles en regard direct avec la source. Ainsi, une partie du corps peut être exposée intensément, les autres parties restant dans de l'air frais.

La température de la peau dépend alors du bilan thermique se produisant à sa surface, donc du flux incident, mais aussi du flux de chaleur évacué dans le corps plus particulièrement par le sang. Ces considérations expliquent la présence d'un seuil net de 2,5 kW/m², au-delà duquel le sang ne peut plus assurer l'évacuation du flux de chaleur incident.

Ce bilan thermique dépend donc du flux incident, de l'émissivité de la peau (ou plus exactement son coefficient d'absorption), mais aussi du débit de circulation du sang sous la peau et de la proximité des vaisseaux de la surface. Parmi les populations, très peu de différences existent à ce niveau entre les individus. La valeur de l'émissivité de la peau humaine est de (0,98 ± 0,01), quelle que soit la couleur et en tout point du corps ^{[11][12]}.

Trois sources de flux thermique radiatif sont à considérer dans l'incendie :

- Le flux thermique direct émis par la source rayonnante ;
- Le flux thermique issu de la fumée est lié à son émissivité et à sa température ;
- Le flux thermique issu des parois. Une paroi thermiquement fine peut s'échauffer et transmettre du flux par rayonnement sans pour autant qu'il y ait de passage de fumées. C'est le cas dans les incendies de navires à cloisonnements métalliques non protégés (hors cantons), ou par exemple pour les personnes présentes après l'extinction d'un feu : Les murs se comportent alors comme un corps gris et rendent la chaleur accumulée sous forme de rayonnement, selon la loi de Stefan-Boltzmann.

Temps d'atteinte des effets incapacitants

La limite de tenabilité de la peau au flux thermique radiatif est estimée à 2,5 kW/m², pour une exposition voisine de 30 minutes. Aucun effet significatif n'a été observé sur les capacités des personnes et pour le temps nécessaire à l'évacuation pour ce niveau de sollicitation. Au-delà de cette valeur, le délai de brûlure de la peau a été décrit par Stoll *et. al* [8] . Ce délai correspond à l'apparition de brûlures du second degré. Il est établi d'après l'équation :

$$t_{rad} = 4 \cdot Q^{-1,35}$$

Avec :

t_{rad} : temps de tenabilité, exprimé en minutes;
 Q : flux radiatif incident, exprimé en kW/m²

L'incertitude sur le temps calculé par cette équation est estimée à 25 %. Le tracé de ces valeurs est présenté ci-dessous :

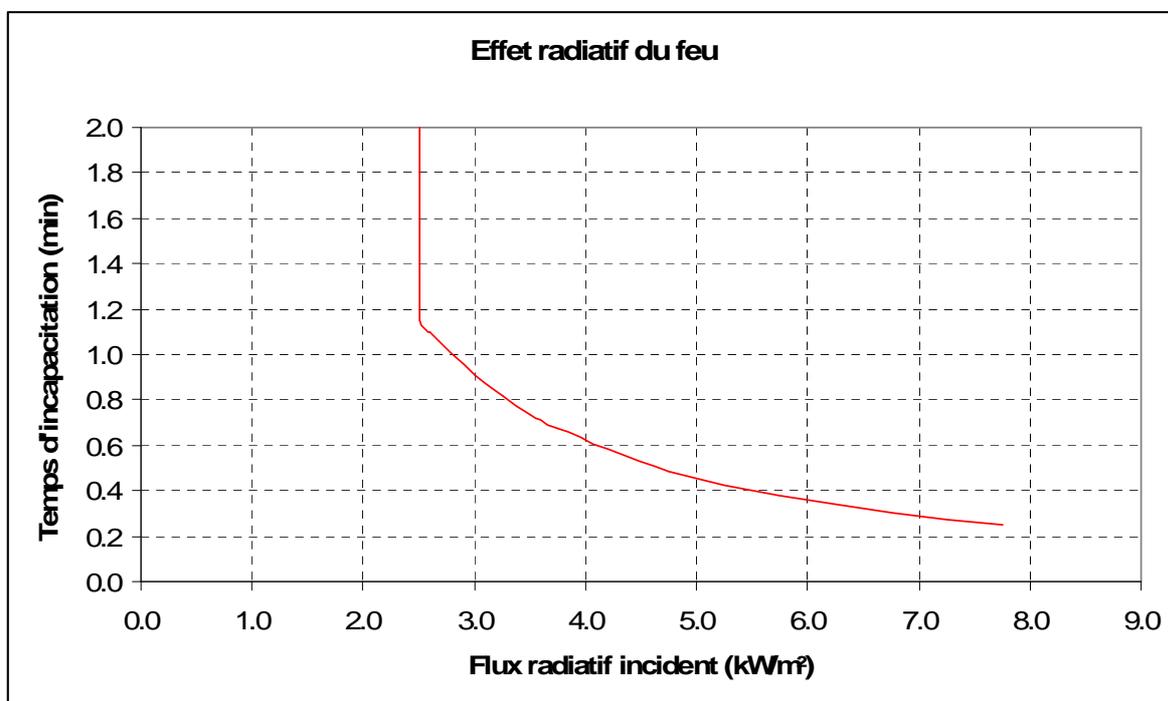


Figure B-3 : Effet du rayonnement thermique sur les personnes

Dose thermique radiative

Il est possible de considérer que l'occupant accumule une dose de chaleur amenée par rayonnement au cours du temps. Une dose de flux radiatif accumulé par minute peut alors être définie par rapport à l'équation précédente.

Définir une dose thermique radiative seule n'est néanmoins pas nécessairement pertinent, car le rayonnement n'est pas toujours majoritaire dans l'effet thermique sur les personnes. Une dose thermique globale, prenant en compte les différentes sources de chaleur, est décrite ultérieurement.

TEMPÉRATURE ET FLUX CONVECTIF

Effet de la température

La température a différents effets physiopathologiques sur l'homme. En particulier, une exposition courte à de hautes températures engendre des effets directs tels que des brûlures du derme ou de l'appareil respiratoire, alors qu'une exposition plus modérée peut n'engendrer que de l'hyperthermie.

Les recherches réalisées lors de l'essai de feu d'école de Los Angeles de 1959 ^[3] a montré qu'une température de 66 °C à une hauteur de 1,5 m conduisaient à des conditions critiques pour l'évacuation. Le NRCC (Canada) a conclu ^[4] qu'une température de 150 °C était la température maximum de l'air pouvant être respiré durant une période très courte, l'air étant parfaitement sec. D'autres études ont montré qu'une exposition à 100 °C représente un niveau suffisant pour engendrer l'hyperthermie et des brûlures locales en 2 à 5 minutes.

L'effet de la présence de vapeur d'eau en quantités importantes, engendre des effets à des températures inférieures. Il est avéré que des brûlures de l'appareil respiratoire liées à l'inhalation d'air contenant moins de 10 % d'eau n'ont jamais été observées sans atteintes préalables de la peau. Cela signifie que la limite de tenabilité liée aux brûlures de la peau est en général plus basse que celle liée au système respiratoire. Si l'air inhalé est plus chaud que la température corporelle, il est rapidement refroidi lors de son entrée dans l'organisme.

Néanmoins, des brûlures de l'appareil respiratoire sont observées dès 60 °C dans de l'air saturé en humidité. Cela signifie que la teneur en eau est un critère important dans l'effet thermique du feu, en particulier pour l'atteinte des voies respiratoires.

Dans l'air humide, des brûlures de la peau sont observables à 100 °C, et toute évacuation devient impossible dès 150 °C. Une table croisant température, effet physiopathologique et durée de tenabilité a été établie par l'US Navy et est présentée ci-dessous :

Température	Incapacitation	Létalité
90 °C	35 minutes	60 minutes
150 °C	5 minutes	30 minutes
190 °C	Immédiate	15 minutes
200 °C	Dommages irréversibles aux voies respiratoires	
340 °C	Mort instantanée	

Tableau 7-5 : Effets de la température sur les personnes – données US Navy

Le tracé graphique des données de létalité est présenté ci-dessous :

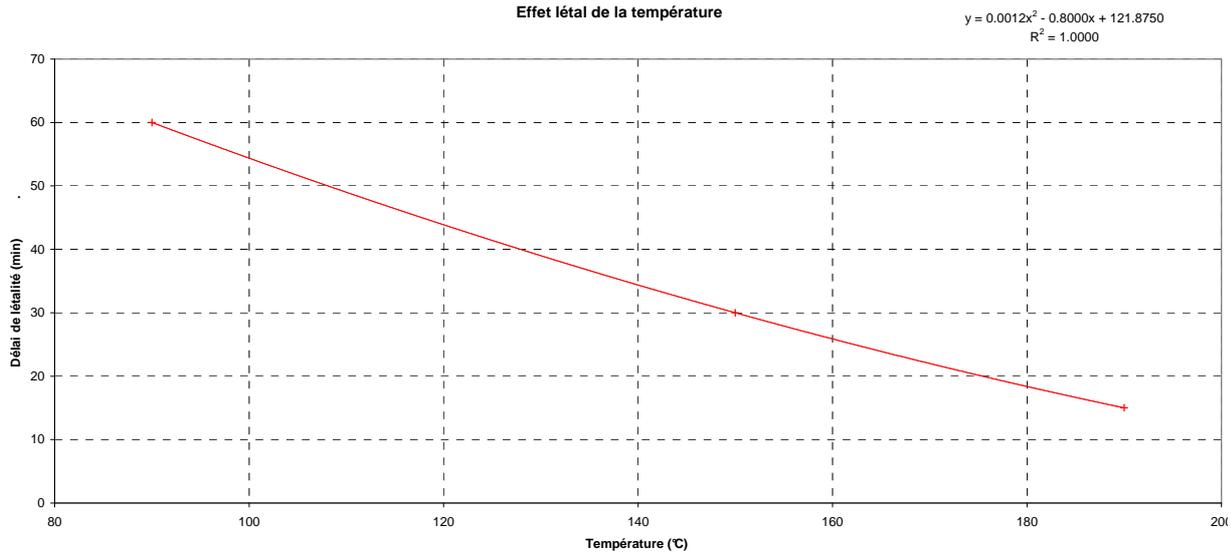


Figure B-4 : Effet de la température sur les personnes– données US Navy

Ces valeurs sont données pour de jeunes soldats entraînés et ne reproduisent donc pas nécessairement le comportement d'une population civile, la population considérée étant vraisemblablement plus résistante du fait de son jeune âge et de sa condition physique.

Temps d'atteinte des effets incapacitants

Comme pour le flux radiatif, le délai d'incapacitation suite à l'effet de la chaleur apportée par convection en contact d'un gaz chaud peut être calculé. Cette incapacitation correspond au délai d'apparition de brûlures et de douleurs importantes. Deux relations ont été établies, en fonction du niveau d'habillement des personnes, les habits jouant le rôle d'isolant thermique par rapport à l'échauffement. Ces relations sont valables pour des teneurs en vapeur d'eau des gaz inférieures à 10 %.

La relation établie pour les sujets complètement habillés (hiver, pantalon, bras couverts) est présentée ci-dessous ^[9] :

$$t_{I_{conv}} = (4,1 \times 10^8) \cdot T^{-3,61}$$

La relation pour des sujets légèrement vêtus (T-shirt, short, robe légère) est la suivante ^[7] :

$$t_{I_{conv}} = (5 \times 10^7) \cdot T^{-3,4}$$

avec :

$t_{I_{conv}}$: temps de tenabilité, exprimé en minutes;

T : température du gaz, en °C

Ces deux équations sont empiriques et ont une incertitude estimée à 25 %. Le tracé des valeurs est présenté ci-dessous :

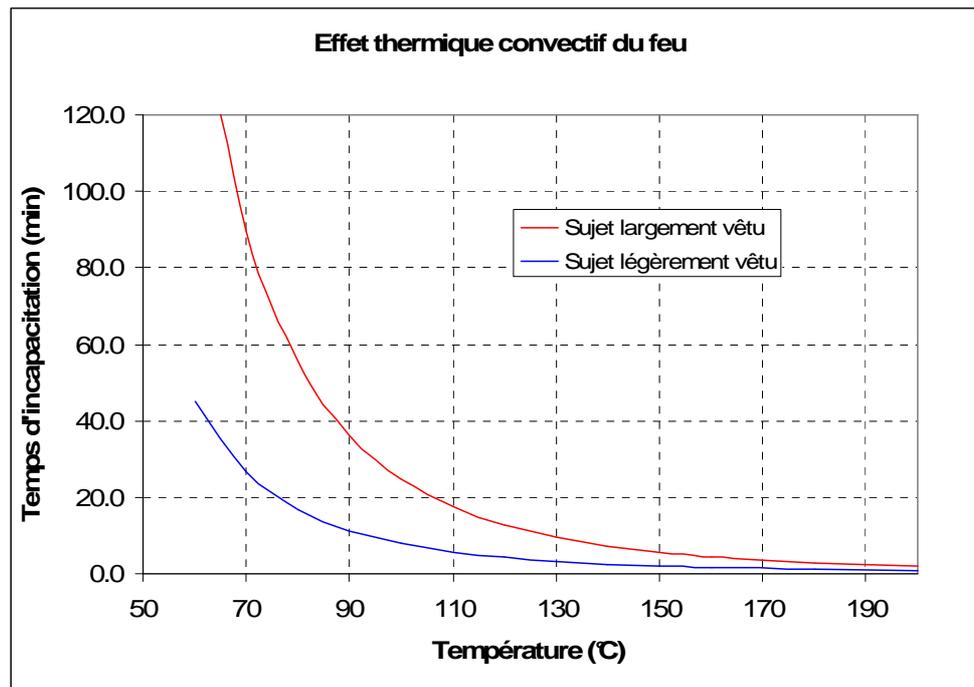


Figure B-5 : Effet incapacitant de la température sur les personnes

Pour un sujet légèrement vêtu, la température de 67 °C engendre des effets incapacitants en 30 minutes. Cette valeur est conforme à celle de la référence [3] et peut être utilisée dans les études de danger pour les expositions courtes.

Dose thermique convective

Des douleurs dues à l'hyperthermie ou aux brûlures apparaissent rapidement chez les victimes d'un incendie. Une équation de « *Fractional Effective Dose* » a été développée pour la chaleur et est présentée dans la norme ISO 13571^[1]. La relation établie est la suivante :

$$FED_{chaleur} = 1 / \exp(5,1849 - 0,0273.T)$$

Dans cette équation, T est la température en degrés Celsius.

Dose thermique globale

La réponse des personnes à une sollicitation thermique est liée à un effet dose de chaleur sur une durée d'exposition. Une exposition courte à une forte sollicitation radiative ou convective est en général moins tolérable qu'une exposition plus longue à une sollicitation moindre, du fait de la nature des effets mis en jeu : brûlures dans le premier cas et hyperthermie dans le second. La dose totale reçue par des personnes exposées durant un temps donné peut être calculée pour un feu donné d'après la formule^[1] :

Les termes t_{rad} et t_{conv} de l'équation correspondent respectivement aux valeurs présentées aux paragraphes précédents.

Dans le cas où le flux radiatif serait inférieur au seuil de 2,5 kW/m², le premier terme de l'équation est éliminé. La FED est basée sur une variation dans la susceptibilité des populations. Ainsi, l'atteinte d'une FED de 1 signifie que 50% d'une population subit de sévères effets thermiques gênant l'évacuation et entraînant des brûlures conséquentes. Une valeur de 0,3 correspond à l'atteinte de 11,4 % de la population.

UTILISATION DE L'ÉVALUATION DE L'EFFET THERMIQUE SUR LES PERSONNES EN FRANCE

Instruction technique 246

L'instruction technique 246 constitue l'annexe 3 de l'arrêté du 22 mars 2004, relatif au désenfumage des établissements recevant du public. La réglementation propose dans le chapitre 8 de cette annexe la possibilité d'utiliser l'ingénierie du désenfumage afin de valider les prescriptions relatives au désenfumage.

Dans ce chapitre, il est demandé de remplir l'objectif de l'article DF1, c'est à dire d'extraire, en début d'incendie, une partie des fumées et gaz de combustion de telle sorte que les cheminements destinés à l'évacuation du public restent praticables.

Les critères proposés sont que la hauteur libre de fumée soit suffisante, c'est à dire toujours supérieure à 1,8 m, mais aussi que le flux de chaleur reçu par les personnes soit supportable. Néanmoins, aucun critère n'est proposé. Les paragraphes précédents peuvent apporter des éléments de réponse satisfaisants pour remplir cet objectif.

ICPE soumises à autorisation

Une recommandation sur les niveaux de flux thermique existe dans l'arrêté du 29 septembre 2005 [16], relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation (JO n° 234 du 7 octobre 2005). Des valeurs de référence sont définies pour les structures et pour les personnes. Les valeurs ont pour but de déterminer les conséquences environnementales d'un feu à grande échelle. Les critères retenus pour les structures sont les suivantes :

Flux	Effet
5 kW/m ²	Destructions de vitres significatives
8 kW/m ²	Seuil des effets domino, correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures
16 kW/m ²	Seuil d'exposition prolongée des structures, correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton
20 kW/m ²	Seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton
200 kW/m ²	Seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes

Tableau 7-6 : Effets du flux thermique radiatif sur les biens selon l'arrêté du 29 sept. 2005

Les critères proposés pour les effets radiatifs sur les personnes sont accompagnés de valeurs exprimées en flux et en dose :

Flux	Dose	Effet
3 kW/m ²	600 [(kW/m ²) ^{4/3}].s	Seuil des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine »
5 kW/m ²	1 000 [(kW/m ²) ^{4/3}].s	Seuil des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine » mentionnée à l'article L. 515-16 du code de l'environnement
8 kW/m ²	1 800 [(kW/m ²) ^{4/3}].s	Seuil des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine » mentionnée à l'article L. 515-16 du code de l'environnement

Tableau 7-7 : Effets du flux thermique radiatif sur les personnes selon l'arrêté du 29 sept. 2005

Ces valeurs sont à comparer avec le seuil de 2,5 kW/m², correspondant à un effet incapacitant en 30 minutes. Seul l'effet radiatif est évalué dans les ICPE. Dans l'étude d'impact, les zones correspondant aux différents niveaux de flux suscités doivent être déterminées.

ANNEXE C MÉTHODES DE CLASSEMENT EN MATIÈRE DE REACTION AU FEU ET PERFORMANCE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Elles sont au nombre de 5 et sont présentées ci-dessous. On notera que l'ensemble des essais est réalisé après conditionnement des éprouvettes selon la norme EN 13238 et que l'on ne procède à un essai d'un niveau donné que si le produit a passé avec succès l'essai de niveau inférieur.

MÉTHODES D'ESSAIS ET CRITÈRES DE CLASSEMENT

Euroclasses	Méthodes d'essais harmonisées				
	Essai n°1	Essai n°2 Revêtement de sol	Essai n°2 Autres produits	Essai n°3	Essai n°4
	Petite flamme	Panneau radiant	SBI	Bombe calorimétrique (PCS)	Four de non combustibilité
A1					
A2					
B					
C					
D					
E					
F					

Tableau 7-8 : Méthodes d'essais harmonisés

Le four d'incombustibilité NF EN ISO 1182

Il couvre les Euroclasses A1 - A1_{FI} et A2 - A2_{FI} (voir tableaux ci-après). Il est destiné à identifier les produits qui ne contribuent pas ou peu au développement d'un feu. Le scénario est alors celui d'un feu pleinement développé et l'objectif est l'évaluation de la faible contribution du matériau dans de telles conditions.

Présentation :

L'appareillage se présente sous la forme d'un four cylindrique vertical constitué un tube réfractaire entouré d'une résistance chauffante enfermée dans une enveloppe isolante. Le tube interne est en matériau réfractaire à base d'alumine, sa hauteur est de 150 mm, son diamètre intérieur de 75 mm et l'épaisseur de sa paroi de 10 mm. La température interne du four est contrôlée par un thermocouple (K ou N) placé au centre géométrique de l'enceinte et à 10 mm de la paroi interne.

La partie inférieure du four est équipée d'un stabilisateur d'écoulement d'air de forme tronconique de 500 mm de longueur. La base du stabilisateur présente un diamètre intérieur de 10 mm et un diamètre supérieur équivalent à celui du tube réfractaire. La partie supérieure du four présente un écran de protection contre les mouvements d'air qui vient coiffer le tube réfractaire. La hauteur de cet écran est de 50 mm et son diamètre de 75 mm.

L'ensemble du four est posé sur un socle rigide et doit être abrité de tout mouvement d'air. Un système de porte-éprouvette en fil d'acier au nickel-chrome ou réfractaire permet de descendre une nacelle contenant l'échantillon au centre géométrique du tube interne du four.

Cinq éprouvettes sont successivement soumises à l'essai, après pesée de chacune d'elle. Le four est préchauffé jusqu'à obtention d'une température interne stabilisée à 750 ± 5 °C, appelée stabilisation initiale. L'éprouvette est introduite au centre géométrique de l'enceinte.

Les variations de température dans l'enceinte sont enregistrées en continu. L'essai se déroule sur une période de 30 minutes au minimum et de 60 minutes au maximum. Entre 30 et 60 minutes, l'essai est considéré comme terminé lors de la stabilisation en température de l'enceinte, dite "stabilisation finale" considérée comme atteinte quand la variation de température (régression linéaire) est inférieure à 2 °C en 10 minutes.

On calcule la différence arithmétique entre le point de température le plus élevé relevé sur la courbe et la valeur à la "stabilisation finale". On détermine, par pesée des résidus, le taux (%) de perte de masse pour chaque éprouvette. Est considéré comme admissible toute éprouvette satisfaisant aux critères de classement présentés dans les tableaux 1 et 1bis présentés plus loin. Il est à noter que cet essai s'applique à des matériaux comme les bétons, s'ils contiennent plus de 1% d'additifs organiques.

La bombe calorimétrique NF EN ISO 1716

Cet essai est utilisé pour déterminer le pouvoir calorifique supérieur (PCS) d'un produit ou sa chaleur de combustion maximale dans les conditions d'une combustion forcée, reproduite dans une enceinte sous pression d'oxygène. Il est similaire à celui définissant le classement M0 par le passé, bien que le critère d'appréciation du résultat diffère. Cet essai couvre les Euroclasses A1 - A1 FI et A2 - A2 FI (voir tableaux 1 et 1bis).

Présentation

Ce matériel est constitué de trois éléments principaux :

- ❑ La jaquette, remplie d'eau pour les essais, est constituée par un récipient à double paroi, isolé thermiquement et muni d'un couvercle également isolant. Elle présente des dimensions telles qu'il existe un espace d'au moins 10 mm à la périphérie du vase calorimétrique qui se positionne dans la jaquette.
- ❑ Le vase calorimétrique est un récipient en métal poli qui repose sur le fond de la jaquette par un système tripode isolant présentant la plus petite surface possible.
- ❑ La bombe calorimètre est placée à l'intérieure du vase calorimétrique, son couvercle reçoit un creuset supportant l'échantillon et le dispositif de mise à feu. La surface interne de la bombe doit résister aux attaques des produits de combustion et à la corrosion. Elle doit pouvoir supporter des pressions internes élevées (21 Mpa)

Il s'agit alors de brûler, par le biais d'un dispositif de mise à feu, une éprouvette de masse spécifiée à volume constant dans une atmosphère d'oxygène à l'intérieur de l'enceinte calorimétrique interne (bombe), cette dernière ayant été préalablement étalonnée par la combustion d'un acide benzoïque certifié.

Le pouvoir calorifique est déterminé par observation de l'élévation de la température dans le vase calorimétrique en tenant compte de la perte calorifique et de la chaleur latente de vaporisation de l'eau. Le pouvoir calorifique, exprimé en mégajoules par kilogramme (d'échantillon) est donné par :

Avec :

PCS : pouvoir calorifique supérieur (MJ/kg).

E : équivalent eau du système (déterminé par essai sur acide benzoïque)

T_i : température initiale (K).

T_m : température maximale (K).

b : correction de la chaleur de combustion des éléments combustibles utilisés.

Un minimum de trois résultats est requis pour déterminer un classement. Les critères de validité des résultats d'essais sont spécifiés dans les tableaux suivants.

L'essai SBI – Single Burning Item – NF EN 13823

Il s'agit d'un essai en semi-grandeur destiné à évaluer la contribution potentielle à l'extension du feu d'un produit placé dans un scénario simulant la combustion d'un élément isolé embrasé dans le coin d'une pièce, à proximité du produit à évaluer. Cet essai couvre uniquement les Euroclasses A2, B, C et D. Les revêtements de sol ne sont pas couverts pas ce test.

Présentation

Les produits doivent être testés dans les conditions les plus représentatives des conditions finales d'usage. Pour certain produit de revêtement une liste des supports représentatifs de l'application finale a été précisée (Document EN 13238). Le cas échéant, on utilisera le mode de fixation mécanique ou les adhésifs spécifiques aux produits

Les produits sont placés dans une chambre d'essai de 3 m x 2,4 m de façon à reconstituer le coin d'une pièce contenant le produit à évaluer. Le coin est constitué de deux panneaux asymétriques de 1,5 m de haut, ayant respectivement 1,00 m et 0,50 m de largeur et représentatif de l'épaisseur d'usage du produit.

Les panneaux sont placés sur un bâti mobil (chariot) de façon à pouvoir effectuer le montage hors de l'enceinte d'essais. L'élément isolé embrasé est représenté par un brûleur à flamme de propane molle (sans air ajouté) d'une puissance nominale de 30 kW placé à la base et dans l'angle formé par les deux panneaux.

Après une période d'équilibrage thermique de l'appareil destiné à obtenir un "zéro" de référence, le produit est exposé à l'attaque du brûleur à propane pendant la totalité de la durée de l'essai. La durée utile de l'essai est de 20 minutes aux cours desquelles on enregistre plus particulièrement la consommation d'oxygène et l'évolution du signal de transmission d'un opacimètre à lumière blanche, situé sur le conduit d'extraction.

Sur ce conduit de 350 mm de diamètre sont placés les points de prélèvements et les capteurs destinés aux mesures. La circulation des effluents, à raison de 0,6 m³/s, est assurée par un extracteur à débit contrôlé relié à une hotte placée au-dessus du montage d'essai.

On relève également, de façon visuelle, l'éventuelle propagation latérale du front de flammes et l'apparition de chute de gouttes ou de particules enflammées.

Le comportement au feu du produit est exprimé par détermination des cinétiques de débit calorifique (par consommation d'oxygène) et de la production de fumées (opacimètre). L'exploitation des données ci-dessus permet de calculer les critères suivants qui serviront au classement du produit.

- ❑ FIGRA en W.s-1 : Valeur maximale du rapport débit calorifique / temps, déterminée à chaque intervalle de scrutation pendant l'attaque thermique des éprouvettes (un coefficient multiplicatif de 1000 est systématiquement appliqué).
- ❑ THR600 en MJ : Quantité totale d'énergie libérée par l'éprouvette pendant les 600 premières secondes d'exposition à l'attaque thermique.
- ❑ SMOGRA en m².s-2 : Valeur maximale du rapport débit fumigène / temps, déterminée à chaque intervalle de scrutation pendant l'attaque thermique des éprouvettes (un coefficient multiplicatif de 10000 est systématiquement appliqué).
- ❑ TSP600 en m² : Quantité totale de fumées produites par l'éprouvette pendant les 600 premières secondes d'exposition à l'attaque thermique.

Le classement est établi sur la moyenne de trois résultats. Le classement s'exprime par une expression comportant 3 termes. Le premier terme s'applique au seul comportement au feu. Le second terme est représentatif du niveau de production de fumées. Le dernier terme exprime la présence de chute de gouttes ou de particules en feu ou non.

Exemple : *B s1 d0*

L'Essai au panneau radiant pour revêtement de sol NF EN ISO 9239-1

Il permet de déterminer le flux radiant critique à partir duquel un front de flamme cesse de propager sur une surface horizontale représentative d'un produit de revêtement de sol. Il couvre uniquement les Euroclasse A2_{Fh}, B_{Fh}, C_{Fh}, et D_{Fh}.

Présentation :

Il s'agit d'une chambre en panneaux de silicate de calcium (ep 13 mm, 650 kg/m³) de dimensions intérieures 1400 mm x 500 mm d'une hauteur utile de 725 mm. La chambre peut être habillée d'une enveloppe métallique extérieure. Un panneau de verre résistant au feu forme une fenêtre horizontale de 1100 mm x 110 mm sur une des faces de l'enceinte.

Le fond de la chambre se compose d'une plate-forme soutenant le porte-éprouvettes horizontal. La plate-forme, équipé d'une porte hermétique, coulisse vers l'extérieur, sous la fenêtre. En position fermée, l'air peut circuler librement à la périphérie de la plate-forme sur une surface uniformément répartie de 0,23 m².

La source d'énergie est un panneau en réfractaire poreux sur armature métallique dont la surface de rayonnement de 450 mm x 300 mm peut atteindre 900 °C. Elle est alimentée par un mélange air / propane piloté par un dispositif assurant un fonctionnement constant et reproductible. Un brûleur tubulaire produisant trois lignes de flammes pilotes, vient compléter le système d'inflammation au début de l'essai.

Le panneau radiant est placé à l'une des extrémités de la chambre, sa plus grande dimension dans la largeur de celle-ci. Son inclinaison à 30 ° de l'horizontal produit un rayonnement globalement orienté vers le bas mais dont les niveaux flux vont en décroissant à mesure que l'on s'éloigne vers l'autre extrémité de la chambre.

Cette seconde extrémité est surmontée d'un dispositif d'évacuation des produits de combustions dont la vitesse est contrôlée (2,5 m/s) et qui intègre un opacimètre à lumière blanche, destiné à évaluer l'opacité dynamique des fumées.

Périodiquement et préalablement aux essais, on doit établir la cartographie des flux incidents sur l'éprouvette. Dans ce but, on place sur le porte éprouvette, une plaque inerte de silicate de calcium de 20 mm d'épaisseur et de 850 kg/m³ mesurant 1050 mm x 250 mm et pouvant recevoir un capteur de flux thermique que l'on place successivement dans une série de cavités régulièrement réparties sur l'axe longitudinal de la plaque.

Le panneau radiant étant en fonctionnement et le système stable en température, on relève les niveaux d'énergie pour chaque point. Ils doivent se répartir entre 1 et 11 kW/m² selon un profil prédéterminé dans le document normatif.

Les éprouvettes doivent être représentatives du revêtement de sol dans son usage final (utilisation de thibaudes, joints entre dalles, etc.). Au nombre de six, elles doivent être prélevées, si possible, dans deux orientations perpendiculaires du produit (trois éprouvettes par orientation). La taille d'une éprouvette est de 1050 mm x 230 mm dans l'épaisseur du produit. Elle doit être montée sur un support représentatif d'un plancher réel (Document EN 13238) avec, le cas échéant utilisation de l'adhésif ou des adhésifs spécifiques.

Après allumage du dispositif d'attaque thermique et stabilisation du balayage d'air de l'enceinte et de sa température, on introduit l'éprouvette dans la chambre par le support coulissant. La fermeture de la porte étanche marque le début de l'essai. Le brûleur pilote est placé au contact du bord de l'éprouvette et reste en position pendant 10 minutes.

L'essai est poursuivi pendant 30 minutes au cours desquelles on note la progression des flammes et les temps de passage aux niveaux des repères correspondants aux points significatifs du profil de flux déterminé précédemment à l'aide du capteur thermique. L'enregistrement des variations de transmission du signal lumineux de l'opacimètre est réalisé sur cette même période de temps.

On déduit de la distance de propagation de flamme observée, le flux énergétique critique, à partir de la courbe de profil des flux préalablement établie. Les éprouvettes qui ne s'allument pas ou dont la limite de propagation est inférieure à 11 cm ont un flux critique $\geq 11 \text{ kW/m}^2$, celles qui propagent au-delà de 91 cm ont un flux critique $\leq 1,1 \text{ kW/m}^2$.

Les limites de classement relatives aux niveaux de flux critiques sont données dans les tableaux suivants.

L'essai d'allumabilité à la petite flamme NF EN ISO 11925-2

Il est destiné à évaluer l'allumabilité d'un produit exposé à une sollicitation thermique faible et localisée produite par une petite flamme. Il sert de test éliminatoire et, en cas de succès, renvoie les produits vers le "SBI" ou le panneau pour les revêtement de sol couvrant ainsi indirectement les Euroclasses B, C, D, E, et F et B_{F1} , C_{F1} , D_{F1} , E_{F1} et F_{F1} pour les sols.

Un système porte-épreuve en acier inoxydable, constitué d'un double châssis en U inversé, d'une hauteur de 295 mm et de 110 mm de large, peut maintenir, par serrage mécanique entre les deux éléments du châssis, une éprouvette d'une dimension utile de 250 mm x 90 mm d'une épaisseur maximale de 60 mm. L'ensemble est placé verticalement, ouverture du U vers le bas, dans une enceinte de 700 x 400 mm d'une hauteur totale de 810 mm, dont la partie supérieure à la forme d'une trémie inversée de 100 mm de hauteur et dont le sommet présente, à son centre géométrique, une courte cheminée cylindrique de 50 mm de haut pour un diamètre de 150 mm.

Le fond de la chambre se présente sous la forme d'un caillebotis métallique permettant la libre circulation de l'air car reposant sur un piétement maintenant le système à 40 mm de la surface sur lequel il repose. L'appareil est placé sous une hotte ventilée assurant une vitesse d'air de $0,7 \pm 1 \text{ m/s}$ dans l'enceinte aux cours des essais.

Un brûleur calibré, générant une flamme à mélange air / propane, sert de source d'allumage soit en position vertical soit avec une inclinaison de 45° . Il est placé sur un dispositif coulissant de façon à pouvoir attaquer le produit sur une arête et/ou dans l'épaisseur. La flamme du brûleur est réglée à 20 mm de longueur sous une pression de propane située entre 10 et 20 kPa.

L'essai se déroule sur six épreuves comportant, dans la mesure du possible, deux sens perpendiculaires de découpe des éprouvettes (trois éprouvettes par sens). Selon les prescriptions du demandeur, la flamme est appliquée pendant 15 s ou 30 s. Si la durée d'application retenue est de 15 s, la durée totale de l'essai est de 20 s à partir de l'application de la flamme. Si la durée d'application retenue est de 30 s, la durée totale de l'essai est de 60 s à partir de l'application de la flamme.

Préalablement à l'essai, on place sous l'échantillon, sur un plateau de 100 x 50 mm, une bande de papier filtre non teinté, de 60 g/m^2 , destinée à recueillir les éventuelles gouttes ou particules enflammées ou non.

Pour les produits fusibles qui fondent, on utilise une éprouvette de 250 mm x 180 mm. L'éprouvette est placée sur un support en U inversé dont la plus grande dimension est en position basse et horizontale. Le montage est réalisé de telle sorte que l'on peut produire un mouvement de translation latérale de la base de l'éprouvette devant le brûleur. Le brûleur étant incliné à 45° , on met la flamme au contact de l'éprouvette pendant 5 s puis on la retire. On déplace l'éprouvette de façon à dégager la zone attaquée et on recommence l'opération. Le processus est répété jusqu'à atteindre l'extrémité de l'éprouvette ou jusqu'à inflammation et propagation verticale au-delà de 150 mm.

On relève l'apparition de l'inflammation et on note à quel moment l'extrémité de la flamme se propage vers le haut au-delà de 150 mm du point d'application de la flamme. On note l'inflammation éventuelle du papier filtre à la suite de la chute de matière. Le tableau suivant précise, en fonction des observations relevées, la catégorie de classement correspondant.

Détermination des classements

Classe	Méthode(s) d'essai	Critères de classification	Classification supplémentaire
A1	NF EN ISO 1182 ⁽¹⁾ Et	$\Delta T \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\Delta m \leq 50 \%$ et $t_f = 0$ (pas d'inflammation prolongée)	-
	NF EN ISO 1716	$PCS \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ⁽¹⁾ et $PCS \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ^{(2) (2a)} et $PCS \leq 1,4 \text{ MJ.m}^{-2}$ ⁽³⁾ et $PCS \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ⁽⁴⁾	-
A2	NF EN ISO 1182 ⁽¹⁾ Ou	$\Delta T \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\Delta m \leq 50 \%$ et $t_f \leq 20\text{s}$	-
	NF EN ISO 1716 Et	$PCS \leq 3,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ⁽¹⁾ et $PCS \leq 4,0 \text{ MJ.m}^{-2}$ ⁽²⁾ $PCS \leq 4,0 \text{ MJ.m}^{-2}$ ⁽³⁾ $PCS \leq 3,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ⁽⁴⁾	-
	NF EN 13823 (SBI)	FIGRA $\leq 120 \text{ W.s}^{-1}$ et LFS < bord de l'éprouvette et THR _{600s} $\leq 7,5 \text{ MJ}$	Production de fumée ⁽⁵⁾ et Gouttelettes/particules enflammées ⁽⁶⁾
B	NF EN 13823 (SBI) Et	FIGRA $\leq 120 \text{ W.s}^{-1}$ et LFS < bord de l'éprouvette et THR _{600s} $\leq 7,5 \text{ MJ}$	Production de fumée ⁽⁵⁾ et Gouttelettes/particules enflammées ⁽⁶⁾
	NF EN ISO 11925-2 ⁽⁷⁾ Exposition = 30s	Fs $\leq 150 \text{ mm}$ en 60s	-
C	NF EN 13823 (SBI) Et	FIGRA $\leq 250 \text{ W.s}^{-1}$ et LFS < bord de l'éprouvette et THR _{600s} $\leq 15 \text{ MJ}$	Production de fumée ⁽⁵⁾ et Gouttelettes/particules enflammées ⁽⁶⁾
	NF EN ISO 11925-2 ⁽⁷⁾ Exposition = 30s	Fs $\leq 150 \text{ mm}$ en 60s	-
D	NF EN 13823 (SBI) Et	FIGRA $\leq 750 \text{ W.s}^{-1}$	Production de fumée ⁽⁵⁾ et Gouttelettes/particules enflammées ⁽⁶⁾
	NF EN ISO 11925-2 ⁽⁷⁾ Exposition = 30s	Fs $\leq 150 \text{ mm}$ en 60s	-
E	NF EN ISO 11925-2 ⁽⁷⁾ Exposition = 15s	Fs $\leq 150 \text{ mm}$ en 20s	Gouttelettes/particules enflammées ⁽⁸⁾
F	Aucune performance Déterminée		

Tableau 7-9 : Essais à effectuer et critères pour le classement des produits à l'exception des sols.¹ Pour les produits homogènes et les composants substantiels des produits non homogènes.² Pour tout composant non substantiel externe des produits non homogènes.^{2a} Ou, pour tout composant externe non substantiel ayant un PCS $\leq 2,0 \text{ MJ.m}^{-2}$, pour autant que le produit remplit les critères suivants de NF EN 13823 (SBI) : FIGRA $\leq 20 \text{ W.s}^{-1}$ et LFS < bord du spécimen et THR_{600s} $\leq 4,0 \text{ MJ}$, et s1, et d0.³ Pour tout composant non substantiel interne des produits non homogènes.⁴ Pour le produit dans son ensemble⁵ s1 = SMOGRA $\leq 30 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ et TSP_{600s} $\leq 50 \text{ m}^2$, s2 = SMOGRA $\leq 180 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ et TSP_{600s} $\leq 200 \text{ m}^2$; s3 = ni s1 ni s2.⁶ d0 = Pas de gouttelettes / particules enflammées dans NF EN 13823 (SBI) avant 600s; d1 = pas de gouttelettes/particules enflammées persistant plus de 10s dans NF EN 13823 (SBI) avant 600s; d2 = ni d0 ni d1; Allumage du papier dans NF EN ISO 11925-2 résultats dans la classe d2.⁷ En cas d'attaque par la flamme en surface et, le cas échéant, compte tenu de l'application finale du produit, d'attaque par le bord⁸ Accepté = pas d'allumage du papier (pas de classe); refusé = allumage du papier (classe d2).

Classe	Méthode(s) d'essai	Critères de classification (valeurs moyennes)	Classification supplémentaire
A1_{FL}	NF EN ISO 1182 ⁽¹⁾ Et	$\Delta T \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\Delta m \leq 50 \%$ et $t_f = 0$ (pas d'inflammation prolongée)	-
	NF EN ISO 1716	$PCS \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ⁽¹⁾ et $PCS \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ⁽²⁾ et $PCS \leq 1,4 \text{ MJ.m}^{-2}$ ⁽³⁾ et $PCS \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ⁽⁴⁾	-
A2_{FL}	NF EN ISO 1182 ⁽¹⁾ Ou	$\Delta T \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\Delta m \leq 50 \%$ et $t_f \leq 20\text{s}$	-
	NF EN ISO 1716 Et	$PCS \leq 3,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ⁽¹⁾ ; et $PCS \leq 4,0 \text{ MJ.m}^{-2}$ ⁽²⁾ et $PCS \leq 4,0 \text{ MJ.m}^{-2}$ ⁽³⁾ et $PCS \leq 3,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ⁽⁴⁾	-
	NF EN ISO 9239-1 ⁽⁵⁾	Flux critique ⁽⁶⁾ $\geq 8,0 \text{ kW.m}^{-2}$	Production de fumée ⁽⁷⁾
B_{FL}	NF EN ISO 9239-1 ⁽⁵⁾ Et	Flux critique ⁽⁶⁾ $\geq 8,0 \text{ kW.m}^{-2}$	Production de fumée ⁽⁷⁾
	NF EN ISO 11925-2 ⁽⁸⁾ Exposition = 15s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ en 20s	-
C_{FL}	NF EN ISO 9239-1 ⁽⁵⁾ Et	Flux critique ⁽⁶⁾ $\geq 4,5 \text{ kW.m}^{-2}$	Production de fumée ⁽⁷⁾
	NF EN ISO 11925-2 ⁽⁸⁾ Exposition = 15s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ en 20s	-
D_{FL}	NF EN ISO 9239-1 ⁽⁵⁾ Et	Flux critique ⁽⁶⁾ $\geq 3,0 \text{ kW.m}^{-2}$	Production de fumée ⁽⁷⁾
	NF EN ISO 11925-2 ⁽⁸⁾ Exposition = 15s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ en 20s	-
E_{FL}	NF EN ISO 11925-2 ⁽⁸⁾ Exposition = 15s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ en 20s	-
F_{FL}	-	Aucune performance	déterminée

Tableau 7-10 : Essais à effectuer et critères pour le classement des produits de revêtement de sols.

⁽¹⁾ Pour les produits homogènes et les composants substantiels des produits non homogènes.

⁽²⁾ Pour tout composant non substantiel externe des produits non homogènes

⁽³⁾ Pour tout composant non substantiel interne des produits non homogènes

⁽⁴⁾ Pour le produit dans son ensemble

⁽⁵⁾ Durée de l'essai = 30 minutes

⁽⁶⁾ Le flux critique est défini comme le flux radiatif à partir duquel la flamme s'éteint ou le flux radiatif après une période d'essai de 30 minutes, selon la valeur qui est la moins élevée (c'est-à-dire le flux correspondant à la propagation de flamme la plus étendue).

⁽⁷⁾ s1 = Fumée $\leq 750 \%$.min ; s2 = pas s1

⁽⁸⁾ En cas d'attaque par la flamme en surface et, le cas échéant, compte tenu de l'application finale du produit, d'attaque par le bord

Les exigences applicables en réaction au feu dans le domaine domestique

Le milieu domestique est très peu réglementé. En particulier, les meubles rembourrés et articles de literie sont des éléments sensibles, mais les exigences qui s'y appliquent demeurent modérées.

A l'heure actuelle, les articles de literie sont testés selon la norme NF EN ISO 12952-1 et 2, d'après les dispositions du décret 2000-164. Le champ d'application du décret concerne les fabricants, importateurs, prestataires de service qui fabriquent, importent, mettent à disposition des articles de literie. Les articles directement concernés sont les coussins, les traversins, les oreillers, les couettes, les édredons et les couvertures matelassées. Les coussins pour siège sont exclus.

Le décret impose des exigences d'hygiène et de sécurité. Les articles de literie mentionnés doivent satisfaire à l'exigence de non-allumabilité et, pour ceux qui comportent des plumes et des duvets, à l'exigence essentielle d'hygiène. La mise à feu est réalisée à l'aide d'une cigarette, placée en différents points. Les produits sont testés après nettoyage conformément aux dispositions de l'étiquetage (par exemple nettoyage à sec).

Ces exigences sont très faibles et n'attestent pas d'une performance au feu des produits comparable à celles appliquées aux matériaux de construction. Aucune exigence n'est applicable aux meubles rembourrés, mais un décret similaire (exigence cigarette) est en cours de préparation.

En interrogeant les bases de données du LNE, les matériaux constitutifs de ces meubles rembourrés et articles de literie ont des flux critiques d'inflammation de l'ordre de 5 à 8 kW/m².

PERFORMANCES DES MATERIAUX ET PRODUITS DE CONSTRUCTION EN MATIÈRE DE RÉACTION AU FEU

Les tableaux ci-dessous présentent la performance en réaction au feu des produits ou systèmes sous couvert de la directive « Produits de Construction », complétée par les bases de données internes dont le LNE dispose sur les produits d'aménagement, d'ameublement et de décoration.

Nature selon DPC	Référence produit selon DPC	Euroclasses des produits			Eléments combustibles	Eléments non combustibles
		Gamme Euroclasse	Fumée	Goutte / Débris		
Finitions intérieures et extérieures des murs et des plafonds	ardoise en fibres-ciment	A1	C	/	d0	Résine organique Ciment
Ardoises et éléments en pierre pour toiture et bardage pour pose en discontinu	ardoise en pierre	A1				Pierre
Produits préfabriqués en béton, normal, léger ou autoclavé aéré	bardage béton	A1		/	/	Béton
Finitions intérieures et extérieures des murs et des plafonds	bardage en bois	C	D	>s2	/	Bois massif Bois Lamellé collé
Finitions intérieures et extérieures des murs et des plafonds	bardage en planches pour finition extérieure	B	D	>s2	/	Bois massif Panneau fibre de bois Panneau de particules Panneau contreplaqué
Finitions intérieures et extérieures des murs et des plafonds	bardage en planches pour finition intérieure	B	D	>s2	/	Bois massif Panneau fibre de bois Panneau de particules Panneau contreplaqué
Eléments spéciaux de toiture préfabriqués en béton	béton préfabriqué	A1				Béton
Revêtements de sol	caillebotis	A1fl	Efl	>s2	/	Caoutchouc Acier
Carreaux et dalles céramiques	carreau de céramique	A1				Céramique
Carreaux de mosaïque de marbre à usage extérieur	carreau de mosaïque de marbre	A1				Marbre
Carreaux de plâtre et liants colles à base de plâtre	carreau de plâtre	A1				Plâtre
Carreaux et dalles céramiques	carreau de sol rigide	A1				Céramique
Carreaux de mosaïque de marbre à usage intérieur	carreau de terrazo	A1				Marbre
Carreaux et plaques en pierre agglomérée pour finitions murales	carreau en pierre agglomérée	A1				Pierre
Carreaux et dalles céramiques - revêtement de sol	carrelage	A1				Céramique
Structures en bois - Fermes préfabriquées utilisant des connecteurs à plaque métallique emboutie	chevron	C	D	>s2	/	Bois massif Bois lamelle collé
Panneaux de cloison préfabriqués en plaques de plâtre	cloison en plaques de plâtre	A2	B	≤s2	d0	Plâtre cartonné Polystyrène PUR/PIR Phénolique Laine minérale
Panneaux de cloison préfabriqués en plaques de plâtre	cloison et doublage de murs et de plafonds	A2	B	≤s2	d0	Plâtre cartonné Polystyrène PUR/PIR Phénolique Laine minérale
Panneaux à base de bois destinés à la construction	bois contreplaqué	B	D	≥s2	d0	Panneau contreplaqué
Produits préfabriqués en béton, normal, léger ou autoclavé aéré	dalle alvéolée pour plancher	A1		/	/	Béton
Finitions intérieures et extérieures des murs et des plafonds	dalle céramique	A1				Céramique
Produit en pierre naturelle - Dalles de revêtement de sols et d'escaliers	dalle de pierre naturelle	A1				Pierre
Dalles en béton pour revêtement	dalle en béton	A1		/	/	Béton
Produits préfabriqués en béton – Dalles alvéolées pour planchers	dalle en béton armé	A1		/	/	Béton
Produits préfabriqués en béton - Prédalles pour systèmes de planchers	dalle et poutre en béton	A1		/	/	Béton
Dalles modulaires en pierre reconstituée pour revêtements de sol (intérieurs et extérieurs)	dalle modulaire en pierre reconstituée	A1		/	/	Pierre

Nature selon DPC	Référence produit selon DPC	Euroclasses des produits			Eléments combustibles	Eléments non combustibles
		Gamme Euroclasse	Fumée	Goutte / Débris		
Carreaux et dalles céramiques	dalle pour plafond pour finition extérieure	A1				Céramique Marbre
Carreaux et dalles céramiques	dalle pour plafond pour finition intérieure	A1				Céramique Marbre
Produits préfabriqués en béton – Dalles alvéolées pour planchers	dalle précontrainte	A1		/	/	Béton
Finitions intérieures et extérieures des murs et des plafonds	écran acoustique intérieur en fibres de bois (ate 9.2)	B	D	≥s2	/	Panneau fibre de bois
Produits préfabriqués armés en béton de granulats légers à structure ouverte	élément de bardage	A1		/	/	Béton
Produits de bois de charpente et produits connexes	élément de dalle en bois lamellé collé et croisé pour le bâtiment (ate 9.2)	D		≥s2	/	Bois Lamellé collé
Maçonnerie et produits connexes	élément de maçonnerie en béton cellulaire autoclavé	A1		/	/	Béton
Maçonnerie et produits connexes	élément de maçonnerie en béton de granulats	A1		/	/	Béton
Maçonnerie et produits connexes	élément de maçonnerie en pierre naturelle	A1		/	/	Pierre
Maçonnerie et produits connexes	élément de maçonnerie en pierre reconstituée	A1		/	/	Pierre
Maçonnerie et produits connexes	élément de maçonnerie en silico-calcaire	A1		/	/	
Eléments de maçonnerie - Briques de terre cuite	élément de maçonnerie en terre cuite	A1		/	/	
Structures en bois - Bois lamellé collé	élément de mur en bois	C	D	≥s2		Panneau contreplaqué Panneau de particules Panneau fibre de bois Bois massif
Produits préfabriqués en béton, normal, léger ou autoclavé aéré	élément de mur et de façade	A1				Béton
Produits préfabriqués armés en béton de granulats légers à structure ouverte	élément de mur non porteur	A1				Béton
Produits préfabriqués armés en béton de granulats légers à structure ouverte	élément de mur porteur	A1				Béton
Eléments en plâtre pour plafonds suspendus	élément de plafond en plâtre	A1	B	<s2	d0	Plâtre cartoné
Produits préfabriqués armés en béton de granulats légers à structure ouverte	élément de plancher	A1				Béton
relatif à certains éléments de structures en bois	élément de plancher en bois	C	D	≥s2	d0	Bois massif Panneau de particules Panneau fibre de bois
relatif à certains produits préfabriqués en béton	élément de plancher nervuré	A1				Béton
Eléments spéciaux de toiture préfabriqués en béton	élément de toiture	A1				Béton
Structures en bois - Bois lamellé collé	élément de toiture en bois	C	D	≥s2	d0	Bois Lamellé collé Panneau de particules Panneau fibre de bois
Matériaux en bois et à base de bois dans les éléments d'escaliers	élément d'escalier en bois	C	D	≥s2	d0	Bois massif Panneau de particules
Produits préfabriqués en béton, normal, léger ou autoclavé aéré	élément linéaire de structure	A1				Béton
Structures en bois - Fermes préfabriquées utilisant des connecteurs à plaque métallique emboutie	élément pour ferme en bois	C	D	≥s2	d0	Bois massif
Produits préfabriqués en béton, normal, léger ou autoclavé aéré	élément préfabriqué armé en béton cellulaire	A1				Béton
Produits préfabriqués en béton, normal, léger ou autoclavé aéré	élément préfabriqué en béton de granulats légers à structure ouverte	A1				Béton
Produits préfabriqués en béton, normal, léger ou autoclavé aéré	élément structurel	A1				Béton

Nature selon DPC	Référence produit selon DPC	Euroclasses des produits			Eléments combustibles	Eléments non combustibles	
		Gamme Eurolasse	Fumée	Goutte / Débris			
Eléments de construction en acier et en aluminium	élément structurel de construction métallique	A				Acier Aluminium	
Produits de maçonnerie	enduit à base de plâtre	A1		≥s2	d0	Plâtre	
Enduits de parement plastiques extérieurs et intérieurs	enduit de parement plastique	/		/	/		
Produits à base de plâtre	enduit extérieur	A1		/	/	Plâtre	
Produits à base de plâtre	enduit intérieur	A1		/	/	Plâtre	
Produits à base de plâtre	enduit pour joint	A1		/	/	Plâtre	
Produits préfabriqués en béton - Escaliers	escalier	A1		/	/	Béton	
Eléments de construction en acier et en aluminium	escalier métallique	A1		/	/	Acier Aluminium	
systèmes composites pour l'isolation thermique extérieure avec enduit	ETICS	B	D	/	/	Polystyrène	Enduit minéral
Revêtements de sol résilients, textiles et stratifiés	feuille de plastique et de caoutchouc	C	E			Caoutchouc PVC	
Produits d'isolation thermique	isolant thermique élaboré in situ à base de mousse de polyuréthane	B	C	≥s2	d0	PUR/PIR	Acier
Produits d'isolation thermique	isolant thermique élaboré in situ à base de mousse de polyuréthane projetée	B	C	≥s2	d0	PUR/PIR	Acier
Produits d'isolation thermique	isolant thermique élaboré in situ à base de perlite expansée	A1		/	/		Perlite
Produits d'isolation thermique	isolant thermique élaboré in situ à base de vermiculite exfoliée	A1		/	/		vermiculite
Produits d'isolation thermique	isolant thermique en vrac élaboré in situ à base de laine minérale	A1		≥s2	d0	Plâtre cartonné	Acier
Produits d'isolation thermique	isolant thermique manufacturé à base de vermiculite exfoliée (EV)	A1		/	/		vermiculite
Produits d'isolation thermique	isolant thermique manufacturé en de fibre de bois	/					
Produits d'isolation thermique	isolant thermique manufacturé en laine de bois	/					
Produits d'isolation thermique	isolant thermique manufacturé en laine minérale	A1	F	≥s2	d0	Kraft	Laine minérale
Produits d'isolation thermique	isolant thermique manufacturé en liège expansé	/					
Produits d'isolation thermique	isolant thermique manufacturé en mousse de polystyrène extrudé	D	E	/	/	Polystyrène	Aluminium(surfaçage)
Produits d'isolation thermique	isolant thermique manufacturé en mousse phénolique	C	D	≥s2	d0	Phénolique	
Produits d'isolation thermique	isolant thermique manufacturé en mousse polyéthylène	D	E	≥s2	/	Polyéthylène souple	
Produits d'isolation thermique	isolant thermique manufacturé en mousse rigide de polyuréthane	C	D	≥s2	d0	PUR/PIR	
Produits d'isolation thermique	isolant thermique manufacturé en mousse rigide de PU et polyisocyanurate	C	D	≥s2	d0	PUR/PIR	
Produits d'isolation thermique	isolant thermique manufacturé en perlite expansée	A2		/	/		Perlite
Produits d'isolation thermique	isolant thermique manufacturé en polystyrène expansé	D	E	s1	/	Polystyrène	Aluminium (surfaçage)
Produits d'isolation thermique	isolant thermique manufacturé en silicate de calcium	A1		s1	d0		silicate de calcium ciment(liant)
Produits d'isolation thermique	isolant thermique manufacturé en verre cellulaire	A1					Mousse de verre
finitions intérieures et extérieures des murs et plafonds	lambris	B	D	≥s2	/	PVC Bois	
Revêtements de sol résilients, textiles et stratifiés	Linoléum	Cfl	Dfl	/	/	Liège (farine amalgamée) Bois (farine amalgamée)	

Nature selon DPC	Référence produit selon DPC	Euroclasses des produits			Eléments combustibles	Eléments non combustibles	
		Gamme Eurolasse	Fumée	Goutte / Débris			
Revêtements de sol résilients, textiles et stratifiés	Liège	D	E	≥s2	/	Liège	
mur rideau	mur - rideau						
Panneaux à base de bois destinés à la construction	panneau à base de bois	B	D	≥s2	d0	Panneau de particules Panneau contreplaqué Bois massif Panneau fibre de bois	
Panneaux à base de bois destinés à la construction	panneau à base de bois non revêtu	B	D	≥s2	d0	Panneau de particules Panneau contreplaqué Bois massif Panneau fibre de bois	
Panneaux à base de bois destinés à la construction	panneau à base de bois plaqué	B	D	≥s2	d0	Panneau contreplaqué	
Panneaux à base de bois destinés à la construction	panneau à base de bois revêtu	B	D	≥s2	d0	Panneau de particules Panneau fibre de bois Stratifié	
Panneaux à base de bois destinés à la construction	panneau à base de bois surfacé	B	D	≥s2	d0	Bois massif	
Finitions intérieures et extérieures des murs et des plafonds	panneau de fibre et de plâtre, grandes dimensions pour maisons préfabriquées	A2	B	≥s2	d0	Cellulose (fibre)	Plâtre Verre(fibres)
Panneaux à base de bois destinés à la construction	panneau de fibres	C	D	≥s2	d0		
Panneaux à base de bois (osb)	panneau de lamelles minces, longues et orientées (o.s.b.)	B	D	≥s2	d0	Panneau fibre de bois	
Panneaux à base de bois	panneau de particules	B	D	≥s2	d0	Panneau de particules	
Panneaux à base de bois destinés à la construction	panneau en bois massif	D		≥s2	d0	Bois massif	
Panneaux à base de bois destinés à la construction	panneau léger composite autoporteur	/					
relatif aux panneaux légers composites autoporteurs de toitures	panneau léger composite autoporteur pour utilisation en toiture	/					
Panneaux à base de bois destinés à la construction	panneau modulaire de construction (ate 9.2)	/					
Panneaux sandwichs autoportants, isolants, double peau à parement métallique	panneau sandwich	A1	D	≤s3	d0	PUR/PIR Polystyrène	Acier Aluminium Laine minérale Mousse de verre
Planchers et parquets en bois	parquet	Bfl	Dfl	S1	/	Bois massif Panneau de particules Stratifié	
produit de plafonds	plafond suspendu	A1	B	?	D0	Laine minérale surfacée Plâtre cartoné Vermiculite	
produit de plafonds	Plafond suspendu anti vibration et avec isolant acoustique (ate 9.2)	/					
produit de plafonds	plafond tendu	B		>s2	d0	PVC Polyester(fibre)	
Revêtements de sol	plancher en bois	Bfl	Dfl	S1	/	Bois massif Panneau de particules Panneau fibre de bois	
produits à base de plâtre	plaque de plâtre	A2		S1	d0		Plâtre
produits à base de plâtre	plaque de plâtre armée de fibres	A2	B	S1	d0	Cellulose (fibre)	Plâtre Verre(fibres)
produits à base de plâtre	plaque de plâtre armée de tissu	/					
produits à base de plâtre	plaque de plâtre fibrée	A2	B	S1	d0	Cellulose (fibre)	Plâtre Verre(fibres)
Plaques planes en fibres-ciment	plaque plane en fibres-ciment	A1					Ciment Verre(fibres)

Nature selon DPC	Référence produit selon DPC	Euroclasses des produits			Eléments combustibles	Eléments non combustibles	
		Gamme Euroclasse	Fumée	Goutte / Débris			
Plaques profilées en fibres-ciment	plaque profilée en fibres-ciment	A1				Ciment Verre(fibres)	
Plaques d'éclairage profilées en matériau plastique simple paroi pour couverture, bardage plafonds	plaque profilée en plastique	B	D	≥s2	d0	Polycarbonate PVC Polyester stratifié	
Produits de protection des structures contre le feu et joints résistants au feu	plaque, panneau semi-rigide, panneau flexible, de protection au feu	/					
Produits de protection au feu - Produits projetés et kits à base de produits projetés pour la protection au feu	produit de protection au feu	/					
produits à base de bois	produit de structure en bois lamellé-collé	B	D	≥s2	d0	Bois Lamellé collé	
produits à base de bois	produit de structure en bois massif	B	D	≥s2	d0	Bois massif	
Structures en bois - LVL (Lamibois)	produit de structure LVL	B	D	≥s2	d0	Bois laminé	
Structures en bois - LVL (Lamibois)	produit de structure Lamibois	B	D	≥s2	d0	Bois laminé	
produits à base de bois	produit en bois collé	B	D	≥s2	d0	Panneau de particules Panneau fibre de bois Panneau contreplaqué Bois laminé	
Produits modulaires - Plaquette de pierre naturelle	produit en pierre naturelle	A1				Pierre Marbre	
Produits à base de plâtre	produit en staff	A1				Plâtre	
finition des sols	revêtement de sol stratifié résilient	Bfl	Dfl	s1	/	PVC Caoutchouc	
finition des sols	revêtement de sol stratifié rigide	Bfl	Dfl	s1	/		
finition des sols	revêtement de sol textile (dalle)	Bfl	Dfl	s1	/		
Produits de protection des structures contre le feu, calfeutrements et joints résistant au feu	revêtement intumescent et ablatif	/					
finitions de murs	revêtement mural décoratif	A2	D	≤s2	d0	Cellulose PVC	Toile de verre
finitions de murs	revêtement mural en lé	A2	D	≤s2	d0	Cellulose PVC	Toile de verre
finitions de murs	revêtement mural en pierre naturelle	A1					
Surfaces multi-sports à l'intérieur	sol sportif	Bfl	Dfl	≤s3		PVC Caoutchouc Panneau de particules Stratifié Résine Epoxy	
Finitions intérieures et extérieures des murs et des plafonds	stratifié décoratif haute pression	B	D	>s2	d0	Cellulose Résine organique Panneau de particules	
Produits pour évacuation et assainissement	tube en polychlorure de vinyle non plastifié	B	C	>s2	d0	PVC	
Produits pour évacuation et assainissement	tube en polyéthylène	C	D	/	/	Polyéthylène rigide	
Produits pour évacuation et assainissement	tube en polypropylène	C	D	/	/	Polypropylène	
Kits de toiture translucide autoporteurs non verriers	kit de toiture translucide autoporteur	B	D	≥s2	d0	Polycarbonate PVC	
Produits bois, charpente et produits connexes	kit pour construction à ossature en bois	C	D	≥s2	d0	Panneau fibre de bois Panneau de particules Panneau contreplaqué Bois massif	

PERFORMANCE DES PRODUITS D'AMÉNAGEMENT ET D'AMEUBLEMENT EN MATIÈRE DE RÉACTION AU FEU

Matériaux classés par flux minimal d'auto-inflammation.

Famille	Sous-Famille	Nom	Température d'inflammation (°C)	Flux minimal d'auto-inflammation (kW/m ²)
Bois, papiers et matériaux naturels	Bois et végétaux	Pin de Géorgie	203	2.5
Bois, papiers et matériaux naturels	Papiers et cartons	Papier	224	3.0
Bois, papiers et matériaux naturels	Bois et végétaux	Erable	232	3.3
Bois, papiers et matériaux naturels	Bois et végétaux	Cyprès	241	3.5
Bois, papiers et matériaux naturels	Bois et végétaux	Bois référence NIST	250	3.8
Bois, papiers et matériaux naturels	Bois et végétaux	Chêne	257	4.1
Polyacryliques	divers	PMMA Polycast (1,59 mm)	278	4.8
Polyuréthanes	-	Polyuréthane (S353M)	280	4.9
Polyacétals Polyalcools et polyacétates	Polyacétals	Polyoxyméthylène (POM)	281	4.9
Polyacétals Polyalcools et polyacétates	Polyacétals	Polyoxyméthylène (POM)	300	5.7
Polyacryliques	-	Polyméthylméthacrylate (Plexiglas, PMMA)	310	6.1
Bois, papiers et matériaux naturels	Bois et végétaux	Panneau de fibres agglomérées, BD (S119M)	330	7.1
Polyoléfines	-	Polypropylène (PP)	334	7.3
Celluloses	divers	Fibre cellulose pour isolation (13 mm)	265	8.0
Polyacryliques	divers	PMMA noir	266	8.0
Polystyrènes et polyphényles	-	Polystyrène (PS)	366	9.0
Autres / divers		Panneau dur (S159M)	372	9.4
Polyacryliques	divers	PMMA (FIN)	311	9.5
Polyacryliques	divers	PMMA Type G (1.27 cm)	378	9.8
Autres / divers		Bardeau d'asphalte	378	9.8
Polystyrènes et polyphényles	Mousse	Polystyrène mousse		10.0
Polyesters	Ignifugé	Polyester 2 + fibres de verre		10.0
Polyesters	Ignifugé	Polyester 3 + fibres de verre		10.0

Famille	Sous-Famille	Nom	Température d'inflammation (°C)	Flux minimal d'auto-inflammation (kW/m²)
Polyesters	Ignifugé	Polyester 5 + fibres de verre		10.0
Polymères chlorés	-	Polyvinylchlorure (PVC)		10.0
Polymères à base de butadiène	-	Styrène-butadiène (SB)		10.0
Bois, papiers et matériaux naturels	Bois et végétaux	Chêne rouvre (red oak)		10.0
Bois, papiers et matériaux naturels	Bois et végétaux	Sapin de Douglas (Douglas fir)		10.0
Bois, papiers et matériaux naturels	Bois et végétaux	Sapin de Douglas traité FR		10.0
Bois, papiers et matériaux naturels	Bois et végétaux	Panneau de particules	302	10.0
Bois, papiers et matériaux naturels	Papiers et cartons	Papier léger		10.0
Bois, papiers et matériaux naturels	Papiers et cartons	Papier lourd		10.0
Bois, papiers et matériaux naturels	Bois et végétaux	Panneau en bois (S178M)	385	10.2
Bois, papiers et matériaux naturels	Papiers et cartons	Carton gris (S118M)	390	10.5
Polyacryliques	divers	PMMA (PX)	311	10.6
Polyacryliques	-	Polyméthylméthacrylate (Plexiglas, PMMA)		11.0
Polyoléfines	-	Polypropylène (PP)	334	11.3
Polyacétals Polyalcools et polyacétates	Polyacétals	Polyoxyméthylène (POM)	281	11.5
Bois, papiers et matériaux naturels	Autres	Panneau de gypse + papier peint (S142M)	412	12.1
Polystyrènes et polyphényles	-	Polystyrène (PS)		13.0
Polyacétals Polyalcools et polyacétates	Polyacétals	Polyoxyméthylène (POM)		13.0
Polyuréthanes	Ignifugé	Polyuréthane mousse rigide FR	350	13.0
Polyuréthanes	-	Polyuréthane rigide		13.0
Polystyrènes et polyphényles	-	Polystyrène (BASF Hyalite)	366	14.0
Polyuréthanes	-	Polyisocyanurate (5,08 cm)	445	14.7
Autres / divers		Bardeau de fibres de verre	445	14.7
Polyoléfines	-	Polyéthylène HD		15.0
Polyoléfines	divers	Polyéthylène à structure croisée (XLPE)		15.0
Polyoléfines	-	Polypropylène (PP)		15.0
Polystyrènes et polyphényles	Mousse	Polystyrène mousse		15.0
Polycarbonates	-	Polycarbonate		15.0

Famille	Sous-Famille	Nom	Température d'inflammation (°C)	Flux minimal d'auto-inflammation (kW/m²)
Polyesters	Ignifugé	Polyester 4 + fibres de verre		15.0
Polyesters	divers	Panneau de polyvinylester		15.0
Polymères chlorés	-	Polyvinylchlorure (PVC) rigide		15.0
Polymères chlorés	-	Polyvinylchlorure (PVC) rigide		15.0
Polymères chlorés	divers	Feuilles de Polyvinylchlorure (PVC) rigide 2		15.0
Cables électriques		Polyéthylène/Polyvinylchlorure 1		15.0
Cables électriques		Polyéthylène à structure croisée / Néopropène 1		15.0
Polycarbonates	divers	Panneau de polycarbonate		16.0
Autres / divers		Mousse de Latex		16.0
Polyoléfines	-	Polyéthylène (PE)	363	17.0
Polymères chlorés	divers	Panneau de Polyvinylchlorure (PVC)		17.0
Cables électriques		Silicone / PVC 1		19.0
Autres / divers		Phenolic		20.0
Bois, papiers et matériaux naturels	Autres	Panneau de gypse FR (1,27 mm)	510	20.9
Polycarbonates	divers	Polycarbonate (1,52 mm)	528	22.9
Cables électriques		Silicone 2		23.0
Polymères chlorés	divers	Tissus de Polyvinylchlorure (PVC) rigide 2		26.0
Polymères fluorés	-	Tefzel ETFE		27.0
Bois, papiers et matériaux naturels	Autres	Panneau de gypse (1,27 mm)	565	27.5
Autres / divers		Phenolic 1 + fibres de verre		33.0
Bois, papiers et matériaux naturels	Bois et végétaux	Contreplaqué FR (1,27 cm)	620	35.6
Polystyrènes et polyphényles	-	Polystyrène (5,08 cm)	630	37.3
Polymères fluorés	-	Polyfluoroéthylène-propylène (Téflon FEP)		38.0
Polyuréthanes	-	Polyuréthane rigide		40.0
Polymères fluorés	-	Polytétrafluoroéthylène (Téflon TFE - PTFE)		50.0
Polymères fluorés	-	Polytétrafluoroéthylène (Téflon TFE - PTFE)		50.0

ANNEXE D PERFORMANCES D'ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION COURANTS EN MATIÈRE DE RÉSISTANCE AU FEU

Murs à base de briques de terre cuite

Nature des éléments	Degré de Résistance Sous feu ISO	Numéro de l'essai	Laboratoire
Murs en briques creuses			
- Mur en briques creuses de 9 cm d'épaisseur totale (briques 8 x 20 x 40,2 trous) avec un enduit en plâtre de 1 cm sur la face exposée	PF 6 h CF 1 h	71/5443	CSTB
- Mur en briques creuses de 12 cm d'épaisseur totale (briques 11 x 20 x 40,2 trous) avec un enduit en plâtre de 1 cm sur la face exposée	PF 6 h CF 2 h	71/5442	CSTB
- Murs en briques creuses de 16 cm d'épaisseur totale (briques 15 x 20 x 40,3 trous) avec un enduit en plâtre de 1 cm sur la face exposée	PF 6 h CF 3 h	71/5444	CSTB
- Mur en briques creuses de 17 cm d'épaisseur totale (briques 15 x 20 x 40,3 trous) avec un enduit en plâtre de 1 cm sur chaque face	PF 6 h CF 4 h	71/5444	CSTB
- Mur en briques creuses de 21 cm d'épaisseur totale (brique 20 x 20 x 40,4 trous) avec un enduit en plâtre de 1 cm sur la face exposée	PF 6 h CF 4 h	71/5446	CSTB
- Mur en briques creuses de 26 cm d'épaisseur totale (briques 25 x 19,5 x 40,4 trous) avec un enduit en plâtre de 1 cm sur la face exposée	PF 6 h CF 4 h	71/5447	CSTB
- Double mur en briques creuses de 22,5 cm d'épaisseur totale (2 briques de 8 x 20 x 40,2 trous, séparées par une isolation intérieure en laine minérale de 4,5 cm) comportant un enduit en plâtre de 1 cm sur chaque face	PF 6 h CF 6 h	71/5448	CSTB
Murs en briques pleines			
- Mur en briques pleines de 7 cm d'épaisseur totale (briques 6 x 10,5 x 21) avec un enduit en plâtre de 1 cm sur la face exposée	PF 6 h CF 1 h 30	71/5451	CSTB
- Mur en briques pleines de 11 cm d'épaisseur totale (briques 10 x 21 x 5,5) avec un enduit en plâtre de 1 cm sur la face exposée	PF 6 h CF 3 h	71/5452	CSTB
- Mur non-porteur en briques pleines de terre cuite de 10,5 cm d'épaisseur sans enduit sur les deux faces	PF 6 h CF 1 h 30	99-U-506	CTICM
Murs en briques pleines perforées			
- Mur en briques perforées de 10,5 cm d'épaisseur (briques 6 x 10,5 x 22) sans enduit	PF 6 h CF 2 h	71/5449	CSTB
- Mur en briques perforées de 22 cm d'épaisseur (briques 6 x 10,5 x 22) appareillées sans enduit	PF 6 h CF 6 h	71/5450	CSTB

Murs en blocs de béton (parpaing)

Nature des éléments	Degré de résistance	Numéro de l'essai CSTB	Référence des Cahiers du CSTB		
			Date	Livraison	Cahier
Murs en bloc de béton pleins					
- Mur de 10 cm d'épaisseur totale (bloc de béton de 10 x 20 x 40) sans enduit	CF 2 h PF 4 h	991 R 229	1970	111	974
- Mur de 15 cm d'épaisseur totale (blocs de béton de 15 x 20 x 40) sans enduit	CF 4 h PF 4 h	991 R 230	1970	111	974
- Mur de 20 cm d'épaisseur totale (blocs de béton de 20 x 20 x 40) sans enduit	CF 6 h PF 6 h	67 2853 B	1969	103	902
Murs en blocs de béton creux					
- Mur en blocs de béton creux de 11 cm d'épaisseur totale (blocs 10 x 20 x 40, 1 rang d'alvéoles) hourdés au mortier de ciment, avec enduit au ciment 10 mm sur face exposée (il n'a pas été fait d'essai sur mur sans enduit)	CF 1 h PF 4 h	991 R 250	1970	114	997
- Mur en blocs de béton creux de 16,2 cm d'épaisseur totale (blocs 15 x 20 x 40, 2 rangs d'alvéoles) hourdés au mortier de ciment, avec enduit au ciment 12 mm sur face exposée (il n'a pas été fait d'essai sur mur sans enduit)	CF 3 h PF 6 h	991 R 251	1970	114	997
- Mur en blocs de béton creux de 20 cm d'épaisseur totale (blocs de béton 20 x 20 x 40, 2 rangs d'alvéoles) hourdés au mortier de ciment sans enduit	CF 6 h PF 6 h	991 R 207	1969	102	891
Murs en blocs de béton creux					
- Mur en blocs de béton creux de 21,5 cm d'épaisseur totale (20 x 20 x 40) hourdés au mortier de ciment, avec enduit en plâtre 15 mm sur face exposée	CF 6 h PF 6 h	991 R 208	1969	102	891

Murs en béton

Nature des éléments	Degré de résistance	Numéro de l'essai CSTB	Référence des Cahiers du CSTB		
			Date	Livraison	Cahier
Murs en béton courant (Ép. 5 cm)					
- Les deux parements nus	CF 1/2 h	56 231	1957	30	252
- Avec 1,5 cm de mortier de sable au plâtre sur parement exposé	CF 1 h	56 231	1957	30	252
- Avec 1,5 cm de plâtre sur parement exposé	CF 2 h	56 231	1957	30	252
- Avec 1,5 cm de plâtre sur chaque parement	CF 3 h	56 231	1957	30	252
Murs en béton de diverses natures (Ép. 5 cm)					
- Béton de laitier (avec 1,5 cm de plâtre sur chaque parement)	CF 3 h CF 4 h	56 273 D 56 273 E	1957 1957	30 30	252 252
- Béton de Leca (avec 1,5 cm de plâtre sur chaque parement)	CF 3 h	56 273 E	1957	30	252
- Béton de pouzzolane (avec 1,5 cm de plâtre sur chaque parement)	CF 3 h	56 273 E	1957	30	252
- Mur en blocs de béton creux de 21,5 cm d'épaisseur totale (20 x 20 x 40) hourdés au mortier de ciment, avec enduit en plâtre 15 mm sur face exposée	CF 6 h PF 6 h	991 R 208	1969	102	891

Murs de grande hauteur

Nature des éléments	Degré de résistance	Numéro de l'essai du CTICM
- Mur de 4 m de haut en briques rouges alvéolaires en terre cuite de 400 x 200 x 200 montées au mortier	CF 3 h	79-U-52/T 52
- Mur de 4 m de haut en blocs alvéolaires de béton montés au mortier dosé à 250 kg/m ³ de ciment CPJ 45 et sable 0/6. Épaisseur 200 mm	CF 4 h	80-U-2/T 2

Poutres et poteaux en bois

Nature des éléments	Degré de résistance	Numéro de l'essai CSTB	Référence des Cahiers du CSTB		
			Date	Livraison	Cahier
Poutre en bois lamellé-collé					
- Poutre en bois lamellé-collé de section 65 x 21,6 cm, longueur 3,60 m, supportant une charge de 9,5 tonnes. Constituée de planches de sapin de 20 mm assemblées sous presse à l'aide de colle résorcine-formol	SF 1 h	69/3833	1970	115	1003
Poteaux en bois					
Poteau en chêne					
- Poteau en chêne nu, section 15 x 15 cm, hauteur 2,30 m, charge 10 t (profondeur moyenne carbonisée en fin d'essai : 23 mm)	SF 1/2 h	91/532	avril 1960	43	341
- Poteau identique, recouvert d'un enduit en plâtre de 1 cm posé sur grillage (profondeur moyenne carbonisée en fin d'essai : 25 mm)	SF 1 h	91/532	avril 1960	43	341
- Poteau identique, recouvert d'un enduit en plâtre de 2 cm posé sur grillage (profondeur moyenne carbonisée en fin d'essai : 18 mm)	SF 1 h 30	91/532	avril 1960	43	341
Poteau en pin					
- Poteau en pin massif, section 18 x 20 cm, hauteur 2,275 m, charge 18 t (profondeur carbonisée en fin d'essai : 2,5 à 3 cm selon les faces)	SF 1/2 h	61/1210	juin 1962	56	445
Poteaux en bois lamellé-collé					
Poteau sapin lamellé-collé (à base de mélamine ou à base d'urée-formol) : 10 planches de 20 mm, section 20 x 18 cm, hauteur 2,275 m, charge 18 t (profondeur carbonisée en fin d'essai : 3 à 3,7 cm)	SF 1/2 h	61/1091 D et E	octobre 1961	52	415

ANNEXE E CLASSIFICATION DES CONSTRUCTIONS PAR DESTINATION DU BATIMENT

LES TEXTES DE RÉFÉRENCE PAR TYPES DE BÂTIMENTS

La destination des bâtiments a permis de créer aussi un classement en quatre catégories d'établissement : les établissements recevant du public, les bâtiments industriels ou tertiaires, les immeubles de grande hauteur et les bâtiments d'habitation.

Le tableau suivant présente les principaux ouvrages traitant de l'aspect de la sécurité incendie dans ces différentes catégories.

THEME	REFERENCE DES TEXTES	Commentaires
BATIMENTS D'HABITATION	Arrêté du 31 janv 1986 (N°1603) modif 18/08/86 et 19/12/89	4 familles en fonction de la hauteur et du type
ETABLISSEMENTS RECEVANT DU PUBLIC (ERP)	Article R 123-01 à R123-55 Arrêté du 25 juin 1980 Arrêté du 22 juin 1990 Arrêté du 22 mars 2004	Classé par type d'activité et effectif d'accueil
+ Règles pour les ERP (instruction technique)		IT n° 246 / IT n° 249
ETABLISSEMENTS INDUSTRIELS OU TERTIAIRES	article L231-1 Décret du 31 mars 1992 Articles R123-12 à R123-12-22 Arrêté du 5 août 1992 articles R235 à R235-4-17	Code du travail Code du travail modifié 10/09/98 "Prévention des incendies et du désenfumage de certains lieux de travail"
INSTALLATIONS CLASSEES POUR LA PROTECTION de L'ENVIRONNEMENT (ICPE)	Loi du 19 juillet 1976 Arrêté du 10 mai 2000 Arrêté du 5 août 2002 Loi du 30 juillet 2003	Code de l'Environnement "SEVESO II" Rubrique 1510 PPRT Nature des produits manipulés ou entreposés Entrepôts ouverts
IMMEUBLES DE GRANDE HAUTEUR	article R122-2 Arrêté du 18 oct 1977	CCH modif 22/10/82 Hauteur par rapport au sol
PARCS DE STATIONNEMENT	Arrêté du 03 avril 2000 Arrêté du 31 janv. 1986	ICPE Rubrique 2935 Bâtiments d'Habitation

Tableau 7-11 : Référence des principaux textes en vigueur par types d'ouvrages

LES BATIMENTS D'HABITATION

L'arrêté du 31 janvier 1986 est relatif à la protection des bâtiments d'habitation contre l'incendie, à l'exception de ceux dont le dernier plancher bas est situé à plus de 50 m du niveau de référence. Il concerne également les parcs de stationnement couverts et en annexes, dont la surface est comprise entre 100 et 6000 m².

La brochure n°1603 du Journal Officiel de la République Française réunit l'ensemble des exigences et illustre tous les points à traiter au sens de l'arrêté :

- Généralités et classement des bâtiments
- Structures et enveloppes
- Dégagements
- Conduits et gaines
- Logements-foyers
- Parcs de stationnement
- Dispositions diverses

L'objet du présent chapitre n'est pas de rappeler de manière exhaustive toutes les dispositions à prendre. Il aborde la méthode de classement par familles des bâtiments d'habitation avec les exigences correspondantes, la règle du « C+D » et les principales règles concernant les parcs de stationnement. Pour les autres parties à traiter, il convient de se rapporter au document officiel.

Classement par famille

Le classement s'opère en fonction des dimensions géométriques et de l'implantation des bâtiments et distingue 4 familles.

La 1^{ère} Famille comprend les habitations individuelles dont les niveaux n'excèdent pas R+1. Les habitations individuelles de plus de deux niveaux (> R+1) et celles égales à R+1 construites en bande dont les structures sont liées appartiennent à la 2^{ème} famille.

La 3^{ème} famille inclut les constructions au-delà de R+4 sans excéder une hauteur de 28 m et est divisée en deux sous-familles (3A et 3B).

La 4^{ème} famille regroupe les habitations collectives dont la hauteur au dernier plancher est comprise entre 28 et 50 m par rapport au niveau d'accès engins dont la voie ne peut pas être éloignée de plus de 50 m.

1. Le bâtiment comporte au plus trois étages sur RDC (ou plancher bas du logement le plus haut H > 8m)



2^{ÈME} FAMILLE :

STRUCTURE :

- Les éléments porteurs verticaux : R 30 (SF 1/2h)
- Les planchers (sauf à l'intérieur d'un même logement) : RE 30 (CF 1/2h)

CLOISONNEMENT :

Les parois verticales séparatives :

- Entre logements EI 30 (CF 1/2h)
- Encloisonnement des escaliers non situés en façade et cages d'ascenseur : EI 30 (CF 1/2h)
- Encloisonnement des escaliers situés en façade : E30 (PF 1/2h)
- Les blocs-portes des logements : E 15 (PF 1/4h)

FAÇADES ET COUVERTURES :

Les parements extérieurs des façades doivent être classés en catégorie M3 ou en bois, sauf dérogation prévue à l'article 15c (inclinaison >30°).

Les revêtements de couverture classés en catégorie M1, M2, M3 peuvent être utilisés s'ils sont mis en œuvre sur un support en matériau incombustible ou en bois et dérivés. Pour les matériaux classés M4, la classe de pénétration doit être T/15 ou T/30.

2. Le bâtiment est de hauteur inférieure à 28 m et satisfait les trois conditions suivantes :

R + 7 max Il comporte au plus sept étages sur RDC

D ≤ 7 Les circulations horizontales sont telles que la distance entre la porte palière de logement la plus éloignée et l'accès de l'escalier est au plus égale à 7 mètres.

3ÈME FAMILLE A :

STRUCTURE :

- les éléments porteurs verticaux : R 60 (SF 1h)
- les planchers (sauf à l'intérieur d'un même logement) : REI 60 (CF 1h)

CLOISONNEMENT :

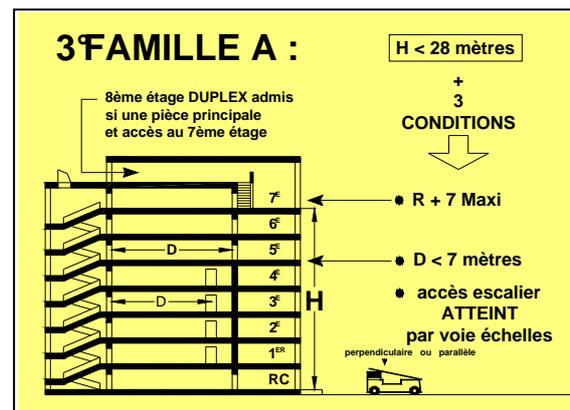
les parois verticales séparatives :

- entre logements : EI 30 (CF 1/2h)
- encloisonnant les escaliers non situés en façade et cages d'ascenseur : EI 60 (CF 1h)
- encloisonnant les escaliers situés en façade EI 30 (PF 1/2h)
- les blocs-portes des logements : EI 15 (PF 1/4h)

FAÇADES ET COUVERTURES :

Les parements extérieurs des façades doivent être classés, en fonction du prospect, soit en catégorie M2, soit en catégorie M3 ou en bois.

Les revêtements de couverture classés en catégorie M1, M2, M3 peuvent être utilisés s'ils sont mis en œuvre sur un support en matériau incombustible ou en bois et dérivés. Pour les matériaux classés M4, la classe de pénétration doit être T/30



3. La hauteur du bâtiment est inférieure à 28 m et l'accès aux escaliers est réalisable depuis une voie engins à moins de 50 m et l'une des trois conditions du point 2 n'est pas remplie.

n > R+7 Il comporte plus de sept étages sur RDC
D > 7 Les circulations horizontales sont telles que la distance entre la porte palière de logement la plus éloignée et l'accès de l'escalier est supérieur à 7 mètres.

3ÈME FAMILLE B

STRUCTURE :

- Les éléments porteurs verticaux : R 60 (SF 1h)
- Les planchers (sauf à l'intérieur d'un même logement) : REI 60 (CF 1h)

CLOISONNEMENT :

Les parois verticales séparatives

- Entre logements : EI 30 (CF 1/2h)
- Encloisonnement des escaliers non situés en façade et cages d'ascenseur : EI 60 (CF 1h)
- Encloisonnement des escaliers situés en façade E 30 (PF 1/2h)
- Les blocs-portes des logements : E 15 (PF 1/4h)

FAÇADES ET COUVERTURES :

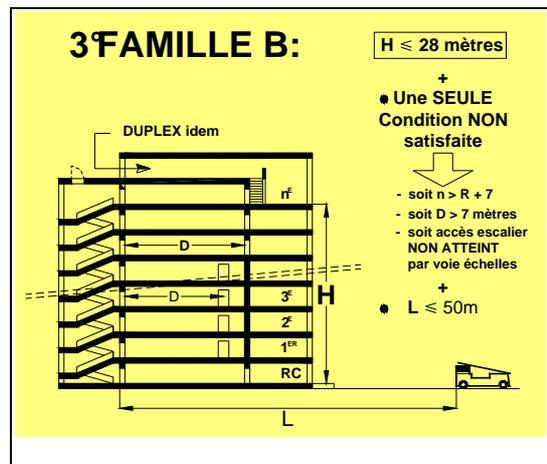
Les parements extérieurs des façades doivent être classés en fonction du prospect, soit en catégorie M2, soit en catégorie M3 exclusivement.

Les revêtements de couverture classés en catégorie M1, M2, M3 peuvent être utilisés s'ils sont mis en œuvre sur un support en matériau incombustible ou en bois et dérivés. Pour les matériaux classés M4, la classe de pénétration doit être T/30

4. la hauteur du bâtiment est comprise entre 28 m et 50 m et l'accès aux escaliers est réalisable depuis une voie engins à moins de 50 m.

n > R+7 Il comporte plus de sept étages sur RDC
D > 7 Les circulations horizontales sont telles que la distance entre la porte palière de logement la plus éloignée et l'accès de l'escalier est supérieure à 7 mètres.

4ÈME FAMILLE



STRUCTURE :

- Les éléments porteurs verticaux : R 90 (SF1h30)
- Les planchers (Sauf à l'intérieur d'un même logement) : REI 90 (CF 1h30)

CLOISONNEMENT :

Les parois verticales séparatives :

- Entre logements : EI 60 (CF 1h)
- Encloisonnement des escaliers non situés en façade: EI 60 (CF 1h)
- Encloisonnement des escaliers situés en façade E 30 (PF 1/2h)
- Les blocs portes des logements : E 15 (PF 1/4h)

FAÇADES ET COUVERTURES :

Les parements extérieurs des façades doivent être classés en fonction du prospect, soit en catégorie M2, soit en catégorie M3 exclusivement.

Les revêtements de couverture classés en catégorie M1, M2, M3 peuvent être utilisés s'ils sont mis en œuvre sur un support en matériau incombustible ou en bois et dérivés. Pour les matériaux classés M4, la classe de pénétration doit être T/30

Bilan des exigences

FAMILLE			1	2	3 A	3 B	4
STRUCTURE	ÉLÉMENTS PORTEURS VERTICAUX	R	15	30	60	60	90
	PLANCHERS	REI	15	30	60	60	90
ENVELOPPE	RECOUPEMENTS VERTICAUX (45 m MAXI)	REI	30	60	90	90	90
	SEPARATIONS ENTRE LOGEMENTS	EI	15	30	30	30	60
ESCALIERS	NON SITUÉS EN FAÇADE	REI	-	30	60	60	60
	SITUÉS EN FAÇADE	RE	-	30	30	30	30
COUVERTURE			T5	T15	T30	T30	-
FAÇADES	REVÊTEMENT ET MENUISERIES		M2		M2	M2	M2
			M4	M2 M3	M3	M3	M3

LES ETABLISSEMENTS RECEVANT DU PUBLIC (ERP)

Selon l'article R123-3 du Code de la Construction et de l'Habitation (CCH), les établissements recevant du public (ERP) sont définis comme étant « *tous bâtiments, dans lesquels des personnes sont admises, soit librement, soit moyennant une rétribution ou une participation quelconque, ou dans lesquels sont tenues des réunions payantes ou non.* » Ainsi, parmi les populations fréquentant un ERP on distinguera le personnel et le public.

Classement en fonction du type et de la catégorie

L'application des dispositions réglementaires s'opère ensuite selon le classement des ERP qui s'obtient à l'aide des deux paramètres suivants :

- ❑ **la catégorie :** La catégorie est relative à l'effectif susceptible d'être présent dans l'exploitation considérée. Il en existe 5 formant deux groupes distincts. Par ailleurs, on entend par effectif, le public et le personnel.

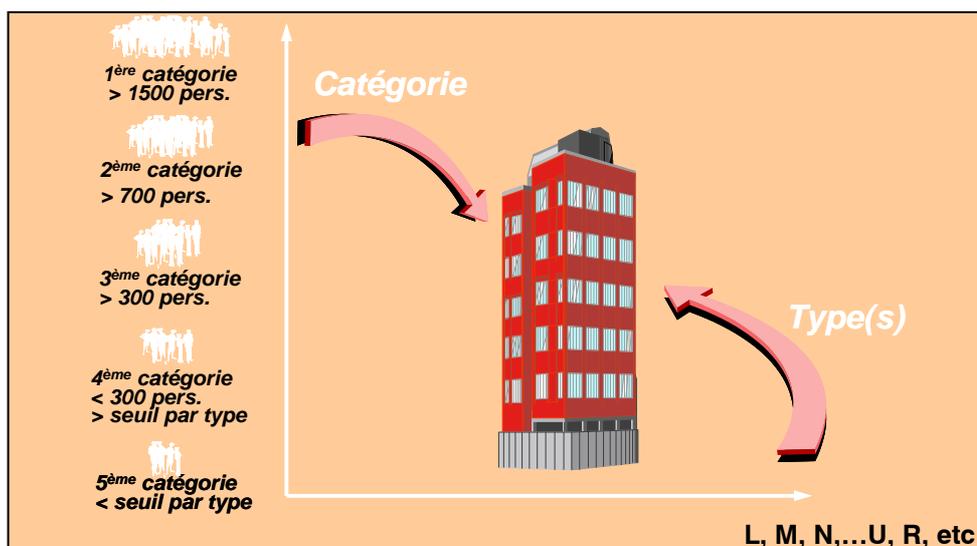
ERP du 1^{er} groupe (arrêté du 25/06/1980) 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} catégories ⇨ PUBLIC + PERSONNEL

ERP du 2nd groupe (arrêté du 22/06/1990 modifié) 5^{ème} catégorie ⇨ PUBLIC UNIQUEMENT

- ❑ **le type :** Le classement par type est basé sur la nature de l'exploitation. Il existe 14 types d'établissement, plus 8 types d'établissements spéciaux, décrits dans le tableau ci-dessous.

ERP	Types d'établissement : dénomination et description succincte
J	Structures d'accueil pour personnes âgées et pour personnes handicapées
L	Salles à usage d'audition, de conférences, de réunions, de spectacles ou à usages multiples
M	Magasins de vente, centre commerciaux
N	Restaurants, débits de boissons
O	Hôtels et pensions de famille
P	Salles de danse et salles de jeux
R	établissements d'enseignement, colonies de vacances
S	Bibliothèques, centre de documentation et de consultation d'archives
T	Salles d'expositions
U	Etablissement de soins
V	Etablissements de culte
W	Administrations, banques, bureaux
X	Etablissements sportifs couverts
Y	Musées
ETABLISSEMENTS SPECIAUX	
PA	Etablissements de Plein Air
CTS	Chapiteaux, Tentes et Structures
SG	Structures Gonflables
OA	Hôtels Restaurants d'altitude
BS	Bases de stationnement

Finalement, le classement du bâtiment concerné est obtenu en mêlant ces deux paramètres :



Principes de prévention et les dispositions réglementaires

Les principes de prévention reposent sur 4 objectifs :

1. éviter l'écllosion d'un incendie,
2. limiter la propagation du feu
3. permettre l'évacuation sûre et rapide du public,
4. faciliter l'intervention des secours

La structure des textes réglementant la sécurité incendie des ERP fait apparaître différents types de dispositions :

- ❑ Dispositions applicables à tous les ERP:
 - Extraits du code de l'urbanisme 14 articles
 - Extraits du Code de la Construction et de l'Habitation 55 articles du CCH
 - Articles GN GN 1 à GN 14
- ❑ Dispositions générales applicables aux ERP du 1er groupe :
 - GE : Généralités GE 1 à GE 9
 - CO : Construction CO 1 à CO 57
 - AM : Aménagements intérieurs AM 1 à AM 19
 - DF : Désenfumage DF 1 à DF 10
 - CH : Chauffage, ventilation, CH 1 à CH 58
 - GZ : Installations aux gaz et aux hydrocarbures liquéfiés GZ 1 à GZ 30
 - EL : Installations électriques EL 1 à EL 23
 - EC : Éclairage EC 1 à EC 15
 - AS : Ascenseurs, escaliers AS 1 à AS 11
 - GC : Installations d'appareils de cuisson GC 1 à GC 22
 - MS : Moyens de secours contre l'incendie MS 1 à MS 75
- ❑ Dispositions applicables aux ERP du 2ème groupe (arrêté du 22/06/1990 modifié)
 - PE : Textes classés en 8 sections PE 1 à PE 37
- ❑ Dispositions spécifiques, applicables aux ERP du 1er groupe, par type

Le présent document n'a pas pour objet d'exposer les détails de toutes ces dispositions susceptibles de s'appliquer aux ERP, mais nous proposons d'illustrer chacune des 10 sections qui composent les 57 articles Construction.

Extraits des articles construction (CO)

La section 1 traite de la conception et des dessertes, précisant notamment le nombre de façades en fonction de la hauteur et de l'effectif du public reçu.

La section 2 a pour objectif d'éviter la propagation de l'incendie depuis l'ERP vers un autre bâtiment.

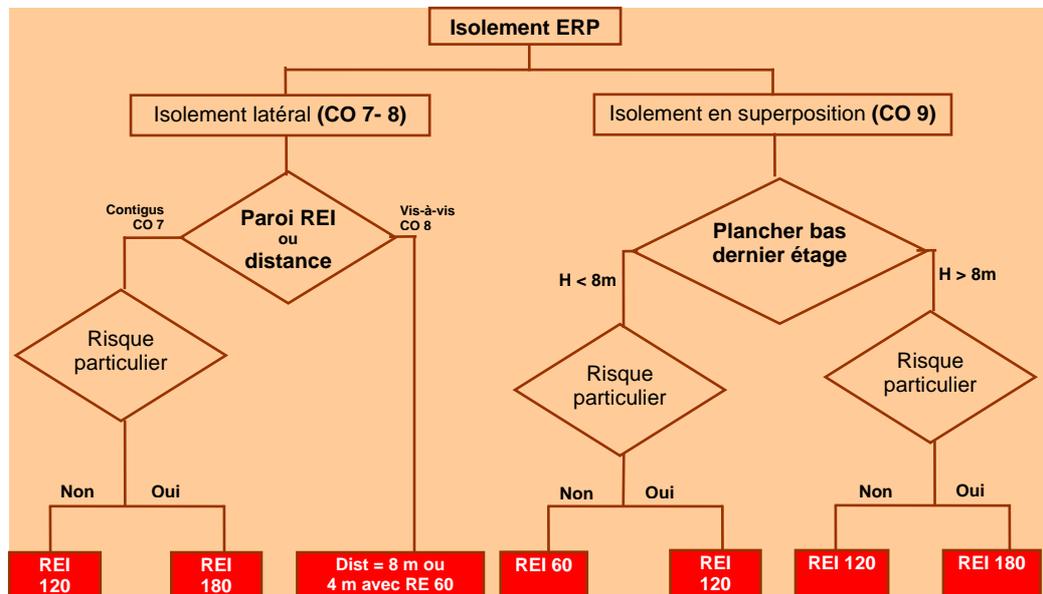


Figure E-6 : Article CO 6 : Isolement par rapport aux tiers

La section 3 indique les exigences de résistance au feu des structures

Etablissement occupant entièrement le bâtiment	Etablissement occupant partiellement le bâtiment	Catégorie	Résistance au feu
Simple RDC	Etablissement à un niveau	Toutes catégories	Structures R 30 Plancher REI 30
Plancher bas du niveau le plus haut à plus de 8 m et moins de 28 m	H < 8 m	1ère catégorie	Structures R60 Plancher REI 60
		2ème catégorie	Structures R 30 Plancher REI 30
		3ème catégorie	
		4ème catégorie	

Tableau 7-12 : Article CO 12 : Résistance au feu des structures et planchers.

La section 4 fournit les indications relatives aux couvertures

Catégorie et destination de l'établissement	Distance d'éloignement entre les bâtiments	
	D < 8 m	D > 8 m
ERP 1er groupe (locaux réservés au sommeil)	T 30 Indice 1	T 15 Indice 1
ERP de 2ème, 3ème et 4ème catégorie (absence de locaux réservés au sommeil)	T 30 Indice 2	T 15 Indice 2

Tableau 7-13 : Article CO 16 : Protection de la couverture par rapport à un feu extérieur.

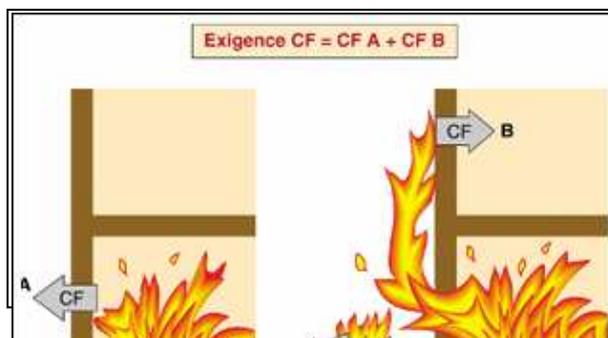
La section 5 porte sur les façades et leur résistance à la propagation verticale du feu

Pour cela, la section 5 traite des qualités de réaction au feu des matériaux utilisés pour les revêtements extérieurs de façade, les éléments d'occultation des baies, les menuiseries, les éléments transparents (vitrages) des baies et les garde-corps. Dans le but de faire obstacle à la propagation, la masse combustible mobilisable est utile à la détermination des valeurs C et D, déjà évoquées pour le classement en habitation. Dans le cas des ERP, la règle du C + D est applicable :

- Aux bâtiments comportant des locaux réservés au sommeil.
- Aux bâtiments dont le plancher bas du dernier niveau accessible est à plus de 8 m du sol et qui, en outre, sont divisés en secteurs ou compartiments.
- Aux parties de façades situées au droit des planchers hauts des locaux à risques importants, quelles que soient la configuration et l'activité du bâtiment.
- Aux parties de façades situées au droit des planchers d'isolement avec un tiers pour ne pas amoindrir cet isolement au niveau des façades.

ERP h < 8 m EI (ou REI) = 30

ERP h > 8 m EI (ou REI) = 60 min



La section 6 concerne la distribution intérieure des bâtiments

Les dispositions de cette section prennent en compte trois modes de conception possible pour la distribution intérieure :

- Cloisonnement traditionnel,
 - Sectorisation
 - Compartimentage
- Mesure compensatoire due à l'absence de réalisation de voies échelles classiques et plus généralement à des difficultés opérationnelles
- Mesure compensatoire due à l'absence de parois résistant au feu au sein d'un ensemble de locaux, pour des motifs fonctionnels (bureaux).

Pour chaque mode les niveaux d'exigences sont déterminés, précisant un certain nombre de conditions particulières (surfaces, distances, bloc-porte ou non,...)

Degré de stabilité au feu exigé pour la structure du bâtiment ou de l'ERP	Parois entre locaux et dégagements accessibles au public	Parois entre locaux accessibles au public et locaux non accessibles au public classés à risques courants	
		Non réservés au sommeil (*)	Réservés au sommeil
Aucune exigence	E 15	E 15	EI 15
R 30	EI 30	E 30	EI 30
R 60	EI 60	E 30	EI 60
R 90	EI 60	E 30	EI 60

Tableau 7-14: Article CO 24 : Caractéristiques des parois verticales et des portes.

La section 9 définit le mode de calcul des unités de passage et traite de la conception et de la répartition des dégagements. En particulier, elle permet de déterminer la répartition des sorties, les distances maximales à parcourir en présence ou non d'escaliers protégés.

LES ETABLISSEMENTS INDUSTRIELS ET COMMERCIAUX SOUMIS AU CODE DU TRAVAIL

Définition

Définis à l'article L.231-1 du Code du Travail, les bâtiments abritant des activités à caractère industriel et commercial doivent satisfaire à une série d'exigences relatives à la sécurité et à la santé :

- à observer lors de la construction de lieux de travail (articles R235-4 à R235-4-17),
- à mettre en application sur les lieux de travail (articles R232-12 à R232-12-22)

Sont concernés :

- Les établissements industriels, commerciaux et agricoles et leurs dépendances, de quelque nature que ce soit, publics ou privés, laïques ou religieux, même s'ils ont un caractère coopératif, d'enseignement professionnel ou de bienfaisance, y compris les établissements où ne sont employés que les membres de la famille ;
- Les offices publics ou ministériels, professions libérales, sociétés civiles, syndicats professionnels, associations et groupements de quelque nature que ce soit, ainsi que les établissements mentionnés à l'article 2 de la loi n° 86-33 du 9 janvier 1986, portant dispositions statutaires relatives à la fonction publique hospitalière et les établissements de soins privés ;
- Les établissements publics à caractère industriel et commercial et les établissements publics déterminés par décret qui assurent tout à la fois une mission de service public à caractère administratif et à caractère industriel et commercial, lorsqu'ils emploient du personnel dans les conditions du droit privé ;
- Les ateliers des établissements publics dispensant un enseignement technique ou professionnel.

Extraits des principales exigences réglementaires

Le contenu des articles R232-12 à R232-12-22 décrit notamment les dispositions relatives aux dégagements et moyens d'évacuation des personnes en fonction des effectifs de l'établissement et les moyens de prévention et de lutte contre l'incendie à mettre en œuvre.

Thème	Sous-thème	Exigences descriptives	Articles	Principe de Maîtrise des Risques
Distribution intérieure et compartimentage	Cloisonnement traditionnel <ul style="list-style-type: none"> • parois verticales • circulations horizontales 	<ul style="list-style-type: none"> • CF1 h entre locaux et dégagements ; • Lorsque l'un des locaux du même compartiment excède 300 m², PF1/2h entre locaux sans risque et CF1/2h pour les locaux à risque • Regroupement tous les 30 m par parois et blocs-portes PF1/2h en va-et-vient munis de ferme-portes 	Arrêté du 5 août 1992 : art. 6 I	Garantir l'évacuation des occupants sans atteinte liée à la propagation interne de l'incendie (flammes et effluents)
	Compartiments	<ul style="list-style-type: none"> • si surface ≤ 500 m² au même niveau, un seul compartiment • si 500 m² < surface ≤ 1000 m², deux compartiments • si surface > 1000 m², par compartiment 1000 m² • un compartiment peut s'étendre sur deux niveaux • parois verticales limitant les compartiments, sauf façades, au moins CF1h • issues judicieusement réparties et proportionnées à l'effectif dans le compartiment 		
	Locaux à risques particuliers	<ul style="list-style-type: none"> • parois CF1h • portes CF1/2h 	Arrêté du 5 août 1992 : art. 6 III	
Isolement	Par rapport au tiers contigu	<ul style="list-style-type: none"> • paroi d'isolement CF1h • portes d'intercommunication CF1/2h munies de ferme-portes • lorsque le bâtiment tiers domine la couverture du bâtiment et possède une façade non aveugle, couverture PF1/2h sur une largeur horizontale de 4 m • lorsque le bâtiment domine la couverture d'un bâtiment tiers non traitée, façade CF1h sur 8 m de hauteur au-dessus • pas d'effondrement en chaîne • l'intercommunication avec les parcs de stationnement couverts peut être réalisée avec des sas munis de portes PF1/2h 	Arrêté du 5 août 1992 : art. 4	Eviter les risques de propagation horizontale et verticale d'un incendie entre un ouvrage à un tiers
	Par rapport au tiers en vis-à-vis	<ul style="list-style-type: none"> • la distance entre les bâtiments ≥ 5 m 		
Résistance au feu des éléments de construction	Structures et Planchers	<ul style="list-style-type: none"> • Lorsque le dernier plancher est à plus de 8 m du sol : structure SF1h ; plancher CF1h • Lorsque le dernier plancher se situe au plus à 8 m du sol (directement accessible par une échelle courante des services d'incendie et de secours) : <ul style="list-style-type: none"> • aucune exigence 	Code du travail : art. R. 235-4-14	Garantir l'évacuation des personnes sans atteinte liée à une déformation des éléments de construction de l'ouvrage
		<ul style="list-style-type: none"> • Lorsque le dernier plancher est à plus de 8 m du sol : • La structure du bâtiment doit être telle que l'effondrement du bâtiment tiers n'entraîne pas celui du bâtiment 	Arrêté du 5 août 1992 : art. 4	

Thème	Sous-thème	Exigences descriptives	Articles	Principe de Maîtrise des Risques
Aménagements intérieurs (pour les ouvrages de la	Revêtements muraux	Au moins de catégorie M2	Arrêté du 5 août 1992 : art. 9	Garantir l'évolution rapide et sûre des occupants en situation d'évacuation à travers l'ouvrage

ouvrages dont le dernier plancher se situe à plus de 8 m)	Revêtement de sol	Au moins de catégorie M4	Arrêté du 5 août 1992 : art. 9	travers l'ouvrage sans atteinte liée à l'incendie (déformation d'éléments d'aménagement intérieur, propagation interne des flammes et fumées)
	Revêtement des matériaux isolants	Isolants acoustique et thermique directement exposés au moins de catégorie M1	Arrêté du 5 août 1992 : art. 9	
	Plafond	Eléments constitutifs au moins M1 et pas plus de 25% en matériaux M3 ou M4 non gouttant	Arrêté du 5 août 1992 : art. 9	
	Parties translucides et transparentes incorporées dans le plafond	Matériaux constituant les parties translucides ou transparentes incorporées dans les plafonds et les plafonds suspendus au moins de catégorie M3, ou M4 s'ils ne produisent pas de gouttes inflammables et la surface de ces parties doit être inférieure à 25% de la surface totale	Arrêté du 5 août 1992 : art. 9	Limiter les risques de développement et de propagation de l'incendie (flammes et effluents) à l'intérieur de l'ouvrage
	Éléments de décoration	<p>Éléments de décoration fixés sur les parois verticales :</p> <ul style="list-style-type: none"> • au moins de catégorie M2 pour les dégagements protégés • au moins de catégorie M2 pour les locaux et d'autres dégagements si leur surface totale dépasse 20% de la surface totale des parois verticales <p>Éléments de décoration flottant de surface supérieure à 0,5 m² au moins de catégorie M1 dans les locaux dont la surface est supérieure à 50 m² ou dans les dégagements</p>	Arrêté du 5 août 1992 : art. 9	
	Tentures, portières, rideaux, voilages	<p>De catégorie minimale :</p> <ul style="list-style-type: none"> • M2 s'ils recouvrent les portes PF • M1 dans les escaliers encloués • M2 dans les autres dégagements et locaux de plus de 50 m² <p>Interdits en travers des dégagements</p>	Arrêté du 5 août 1992 : art. 9	

IMMEUBLES DE GRANDE HAUTEUR (IGH)

Définition

Ils sont définis à l'article R.122-2 du CCH. Ils sont assujettis au code de l'urbanisme (art R111-4) et doivent satisfaire aux exigences de l'arrêté du 18 octobre 1977 portant règlement de sécurité pour la construction des IGH et leur protection contre les risques d'incendie et de panique, modifié par l'arrêté du 22 octobre 1982.

Est concerné :

Tout corps de bâtiment dont le plancher bas du dernier niveau, par rapport au niveau du sol le plus haut utilisable par les engins de secours et de lutte contre l'incendie :

- est à plus de 50 mètres pour les immeubles à usage d'habitation ;
- est à plus de 28 mètres pour tous les autres immeubles.

Les IGH sont assujettis à des prescriptions spécifiques selon la classification de l'article R122-5 du CCH :

- G.H mesures communes à toutes les classes d'IGH ;
- G.H.A. immeubles à usage d'habitation ;
- G.H.O. immeubles à usage d'hôtel ;
- G.H.R. immeubles à usage d'enseignement ;
- G.H.S. immeubles à usage de dépôt d'archives ;
- G.H.U. immeubles à usage sanitaire ;
- G.H.W.1 immeubles à usage de bureaux (hauteur comprise entre 28 et 50 mètres) ;
- G.H.W.2 immeubles à usage de bureaux (hauteur supérieure à 50 mètres) ;
- G.H.Z. immeubles à usage mixte.

Selon l'article R122-4 du CCH, l'arrêté du 18 octobre 1977 était rétroactif pour les bâtiments existants.

Extraits des principales exigences réglementaires

Les tableaux ci-dessous résument les principales exigences réglementaires applicables aux IGH.

Thème	Sous-thème	Exigences descriptives	Articles	Principe de Maîtrise des Risques
Isolement de l'IGH par rapport aux tiers	Isolement des bâtiments en vis-à-vis	CF 2H (paroi et sol Niv RDC) <i>OU</i> Volume de protection < 8 m dans lequel : <ul style="list-style-type: none"> ne doit pas empiéter sur volume voisin ne doit pas comporter de combustible (excepté. végétation) pas de construction excepté celles conformes au GH 8 §2 ou 3 	GH7 §1 OU GH7 §2 GH 7 §3 GH 8 §1 GH 8§2&3	Eviter les risques de propagation d'un incendie entre un IGH et un tiers
	Isolement des bâtiments contigus	CF 2H (Paroi et sol Niv RDC) <i>OU</i> Volume d'isolement façade < 8 m dans lequel : <ul style="list-style-type: none"> ne doit pas empiéter sur volume voisin ne doit pas comporter de combustible (excepté végétation) Pas de construction excepté celles conformes au GH 8 §2 ou 3 <i>ET</i> En cas de contiguïté : <ul style="list-style-type: none"> SAS Parking CF 4H Façades des deux bâtiments formant un angle α, protégées de l'arête jusqu'à une largeur l et de la chaussée jusqu'à 8 m au dessus du bâtiment le plus bas par : <ul style="list-style-type: none"> PF 0h si $\alpha > 180^\circ$ PF 1h et l=1 m si $135 \leq \alpha \leq 180^\circ$ PF 1h et l=2 m si $100 \leq \alpha < 135^\circ$ PF 1h et l=4 m si $\alpha < 100^\circ$ <i>OU</i> <ul style="list-style-type: none"> les deux immeubles sont totalement sprinklés <i>OU</i> <ul style="list-style-type: none"> à un niveau, les compartiments délimités en partie par ce dièdre ne comportent pas plus de la moitié du potentiel moyen normalement admis et sont séparés par du CF 1H et des portes PF 1/2H + ferme porte. 	GH7 §1 OU GH7 §2 GH 7 §3 GH 8 §1 GH 8§2&3 ET en cas de GH10§1 R 122-2 (habitation) GH13 - §2a- - §2b- OU -§3 OU -§3	

Thème	Sous-thème	Exigences descriptives	Articles	Principe de Maîtrise des Risques
Comportement au feu des éléments de construction	Structures	<p>Tout élément par défaut SF 2H (sauf parking 4H) <i>OU</i> Dans ou en contiguïté d'un local vérifiant GH61 §2a-b-d-e :</p> <ul style="list-style-type: none"> SF 3H si $600 < Q < 800 \text{ MJ/m}^2$ ou SF 2H si compartiment sprinklé SF 4H si $800 < Q < 1200 \text{ MJ/m}^2$ ou SF 2H si compartiment sprinklé SF 6H si $1200 < Q < 1600 \text{ MJ/m}^2$ ou SF 2H si compartiment sprinklé <p><i>OU</i> Dans ou en contiguïté d'un local qui est uniquement destiné à l'archivage et qui vérifie GH61 §2a-d-e, SF 6H</p>	<p>GH9 OU GH61 §2 GH61 §3</p>	Garantir l'évacuation des personnes sans atteinte liée à une déformation des structures de l'ouvrage
	Matériaux de construction	<p>Tout matériau par défaut M2 au moins <i>OU</i> M3 pour les bloc-portes, parquet et revêtements de sol M4 pour les matériaux sans contact avec l'air <i>ET</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Potentiel calorifique (hors revêtement au sol sur support M0) au maximum de 225 MJ/m^2 en moyenne sur la surface au sol du compartiment. Possibilité d'ajouter la différence entre ce max et le réel, au potentiel calorifique mobilier 	<p>GH15 GH15 ET GH16§1 GH16§2</p>	
	Façades	<p>M0, sauf pour</p> <ul style="list-style-type: none"> les stores M1 les menuiseries : M1 ou 2 voire M3 pour le bois <p><i>ET</i> $< 25 \text{ MJ/m}^2$ de façade <i>ET</i> $C+D < 1.2 \text{ m}$ ou analogie IT <i>OU</i> Test LEPIR</p>	<p>GH12 §1 GH12 §2 GH12 §3, C. A. 10/09/70 et D. A. 22/10/82 IT GH12 §4, D. A. 22/10/82 IT</p>	Eviter les risques de propagation d'un incendie entre un IGH et un tiers et entre les étages de l'IGH
	Couverture	<p>Interdiction d'emploi des matériaux superficiels légers susceptibles de s'arracher enflammés. Protection contre la foudre obligatoire.</p>	GH14	

ANNEXE F TYPOLOGIE DE CONSTRUCTION

ANALYSE DES TYPOLOGIES DE CONSTRUCTIONS PAR PARTIES D'OUVRAGES ET EN FONCTION DES DESTINATIONS DES BATIMENTS

Estimation indicative de la représentativité du produit/système par type de destination (selon légende ci-contre)		rare à très rare
		peu courant à courant
		fréquent à très fréquent

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE			RESIDENTIEL				ETAB. RECEVANT PUBLIC			INDUSTRIEL		IGH		
Situation / Dénomination / Fonction	matériau	Obs. Matériau	INDIVIDUEL	COLLECTIF				CAT.1 + Santé / Enseig	CAT.2	CAT.3	ICPE	COD. TRA- VAIL	LOGEMENT	BUREAUX
				Fam. 2	Fam. 3 A	Fam. 3 B	Fam. 4							
PAROIS LOURDES														
Maçonnerie en pierre naturelle	Pierre	Taille												
		Moellons												
		Meulière												
Placage parement en pierre														
Maçonnerie en terre cuite	Brique	Pleine												
		Creuse												
		Préfabriqué												
Murs en béton coulé	Béton	Banché												
		Léger												
Maçonnerie en blocs agglomérés d'agrégats	Parpaings	Creux												
Maçonnerie en agglomérés isolants		Pleins												
Éléments préfabriqués (voile ou mur)	Béton													
	Torchis													

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE			RESIDENTIEL				ETAB. RECEVANT PUBLIC			INDUSTRIEL		IGH		
Situation / Dénomination / Fonction	matériau	Obs. Matériau	INDI-VIDUEL	COLLECTIF				CAT.1 + Santé / Enseig	CAT.2	CAT.3	ICPE	COD. TRA- VAIL	LOGEMENT	BUREAUX
				Fam. 2	Fam. 3 A	Fam. 3 B	Fam. 4							
PAROIS LEGERES														
Bardage : fixation sur ossature+/- isolant	Bois	Panneaux												
		Clins												
	Acier	Bardage SP												
		Bardage DP												
		Sndwich PUR												
		Sandwich LR												
Béton	Panneaux													
Vêtage : fixation directe support sans isolant	Acier													
	Aluminium													
	Ardoise													
	Béton													
	Bois													
	Fibres-ciment													
	Pierre													
	Terre Cuite													
	Zinc													
Mur-rideau	Verre													
	Plastique													

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE			RESIDENTIEL				ETAB. RECEVANT PUBLIC			INDUSTRIEL		IGH		
Situation / Dénomination / Fonction	matériau	Obs. Matériau	INDIVIDUEL	COLLECTIF				CAT.1 + Santé / Enseig	CAT.2	CAT.3	ICPE	COD. TRA- VAIL	LOGEMENT	BUREAUX
				Fam. 2	Fam. 3 A	Fam. 3 B	Fam. 4							
ISOLATION THERMIQUE et/ou ACOUSTIQUE														
Isolant (produit manufacturé)	L. Verre	rouleau												
		panneau												
	L. Roche	rouleau												
		panneau												
	Polyuréthane													
	Polystyrène expansé													
	Polystyrène extrudé													
	Fibre de bois													
	Liège													
	PVC alvéolaire													
Calcite expansée														
Verre Cellulaire														
CHARPENTE														
Charpente	Bois	Traditionnelle												
		Industrialisée												
	Lamellé-Collé													
	Métal													
Béton														
Pannes et Liteaux (accessoires)	Bois													
	Métal													
	Plastique													

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE			RESIDENTIEL				ETAB. RECEVANT PUBLIC			INDUSTRIEL		IGH		
Situation / Dénomination / Fonction	matériau	Obs. Matériau	INDIVIDUEL	COLLECTIF				CAT.1 + Santé / Enseig	CAT.2	CAT.3	ICPE	COD. TRA- VAIL	LOGEMENT	BUREAUX
				Fam. 2	Fam. 3 A	Fam. 3 B	Fam. 4							
COUVERTURE														
Couverture en petits éléments	Ardoise													
	Bois													
	Terre Cuite	Tuile à emboîtement												
		Tuile à glissement												
		tuile plate												
		Tuile Canal												
	Béton	Tuile à emboîtement												
		Tuile à glissement												
		tuile plate												
	Verre													
Couvertures en grands éléments : feuille, plaque,...	Acier	ondulé, nervuré												
		Sandwich PU												
		Sandwich LR												
	Aluminium	feuille et bande												
	Cuivre	feuille et bande												
	Inox	feuille et bande												
	Zinc	feuille et bande												
	Asphalte	plaque												
	Fibres- Ciment	ondulé, nervuré												
	Polyester	ondulé, nervuré												
	Plastique	ondulé, nervuré												
Plomb	Table													

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE			RESIDENTIEL				ETAB. RECEVANT PUBLIC			INDUSTRIEL		IGH		
Situation / Dénomination / Fonction	matériau	Obs. Matériau	INDI-VIDUEL	COLLECTIF				CAT.1 + Santé / Enseig	CAT.2	CAT.3	ICPE	COD. TRA- VAIL	LOGEMENT	BUREAUX
				Fam. 2	Fam. 3 A	Fam. 3 B	Fam. 4							
Autres types d'éléments	Bitume	Bardeau												
	Chaume													
	Lauze													
Support de couverture	Bois	platelage												
	Fibre-Ciment													
	Métal													
Sur-toiture / Sous-toiture	Synthèse	Pare-vent/pluie												
		Complexe												
TOITURE - ETANCHEITE														
Produits d'étanchéité	Asphalte													
	Bitume	feutre et produit												
	Monocouche													
	Métal	feuille mince + enduit												
Supports d'étanchéité	Métal													
	Polystyrène													
	L. Verre													
	L. Roche													
	Verre cellulaire													
	Plâtre Ciment													
	Béton Cellulaire													
Protections d'étanchéité	Dalle	amovible												
	Plot													
	Gravillons													

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE			RESIDENTIEL				ETAB. RECEVANT PUBLIC			INDUSTRIEL		IGH		
Situation / Dénomination / Fonction	matériau	Obs. Matériau	INDI-VIDUEL	COLLECTIF				CAT.1 + Santé / Enseig	CAT.2	CAT.3	ICPE	COD. TRA- VAIL	LOGEMENT	BUREAUX
				Fam. 2	Fam. 3 A	Fam. 3 B	Fam. 4							
ISOLATION THERMIQUE et/ou ACOUSTIQUE														
Isolant (produit manufacturé)	L. Verre	vrac												
		rouleau												
		panneau												
	L. Roche	vrac												
		rouleau												
		panneau												
	Polyuréthane													
	Polyéthylène													
	Perlite													
	Polystyrène expansé													
	Polystyrène extrudé													
	Fibre de bois													
	Liège													
	PVC alvéolaire													
	Calcite exp													
Verre Cellul														
Vermiculite														
CHASSIS														
Profils pour fenêtre et porte-fenêtre	Acier	ordinaire												
	Inox													
	Aluminium													
	Bois													
	PVC													
	polyuréthane													

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE			RESIDENTIEL				ETAB. RECEVANT PUBLIC			INDUSTRIEL		IGH		
Situation / Dénomination / Fonction	matériau	Obs. Matériau	INDIVIDUEL	COLLECTIF				CAT.1 + Santé / Enseig	CAT.2	CAT.3	ICPE	COD. TRA- VAIL	LOGEMENT	BUREAUX
				Fam. 2	Fam. 3 A	Fam. 3 B	Fam. 4							
VITRERIE, MIROITERIE														
Verre de base	Simple													
	Double	+/- gaz												
	Triple	+/- gaz												
Verre transformé	Glace	flottée, armée												
	Sécurité	trempe/Armé												
	Coupe-feu													
	Composite	+ polycarbon.												
Verre décoratif	Formé à chaud													
	Bloc de verre	pavé, dalle												
	Vitreaux													
Procédés spéciaux	VEC													
Matériaux de synthèse	Polyméthylméthacrylate													
	Polycarbonate													
PORTES														
Portes (ouvrants à la Française)	Bois													
	PVC													
	Métal													
	Verre													
Portes battantes (va-et-vient)														
Portes coulissantes	Verre													
	Métal													
Portes Tambour	Verre													
Portes Industrielles / Garages (coulissante, basculante, à enroulement ou pliante)	Bois													
	PVC													
	Métal													

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE			RESIDENTIEL				ETAB. RECEVANT PUBLIC			INDUSTRIEL		IGH		
Situation / Dénomination / Fonction	matériau	Obs. Matériau	INDIVIDUEL	COLLECTIF				CAT.1 + Santé / Enseig	CAT.2	CAT.3	ICPE	COD. TRA- VAIL	LOGEMENT	BUREAUX
				Fam. 2	Fam. 3 A	Fam. 3 B	Fam. 4							
OCCULTATION														
Volets Battants	Bois													
	PVC													
	Métal													
	Aluminium													
Volets Roulants	Bois													
	PVC													
	Métal													
	Aluminium													
Volets Couissants	Bois													
	PVC													
	Métal													
	Aluminium													
Persiennes	Bois													
	PVC													
	Métal													
	Aluminium													
Jalousies	Bois													
	PVC													
	Métal													
	Aluminium													
Rideau de fermeture	Métal													

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE			RESIDENTIEL				ETAB. RECEVANT PUBLIC			INDUSTRIEL		IGH		
Situation / Dénomination / Fonction	matériau	Obs. Matériau	INDIVIDUEL	COLLECTIF				CAT.1 + Santé / Enseig	CAT.2	CAT.3	ICPE	COD. TRA- VAIL	LOGEMENT	BUREAUX
				Fam. 2	Fam. 3 A	Fam. 3 B	Fam. 4							
PORTEURS VERTICAUX														
Poteau, Colonne, pilier	Acier													
	Inox													
	Béton	armé												
		précontraint												
	Bois													
	Mixte	Acier - béton												
Pierre														
Elément préfabriqué ¹	Béton													
PORTEURS HORIZONTAUX														
Plancher (procédé, élément, prédalle)	Béton	plein												
		alvéolé												
		précontraint												
	Métal													
Bois														
Entrevous et hourdis	Béton	léger												
		normal												
	Terre cuite													
Polypropylène														

¹ NOTA : de nombreux éléments sont déjà cités en "Façade"

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE			RESIDENTIEL				ETAB. RECEVANT PUBLIC			INDUSTRIEL		IGH		
Situation / Dénomination / Fonction	matériau	Obs. Matériau	INDIVIDUEL	COLLECTIF				CAT.1 + Santé / Enseig	CAT.2	CAT.3	ICPE	COD. TRA- VAIL	LOGEMENT	BUREAUX
				Fam. 2	Fam. 3 A	Fam. 3 B	Fam. 4							
Poutres et poutrelles	Acier	pleine												
		cellulaire												
		treillis												
	Béton	armé												
		précontraint												
	Bois													
	Lamellé-collé													
Mixte														
Balcons préfabriqués rapportés	Béton													
	Bois													

ANNEXE G ÉTUDE RELATIVE À LA DÉFINITION DES SEUILS CRITIQUES D'EFFETS THERMIQUES POUR LES ÉLÉMENTS DE STRUCTURES EN ACIER

1 - SYSTEMES CONSTRUCTIFS ÉTUDIÉS

La méthode considère un état stationnaire, soit une durée infinie du feu. Son principe est de déterminer la température maximale de l'élément qui sera comparée à la température critique forfaitaire de l'acier fixée à 500°C, selon la partie 1-2 + DAN de l'Eurocode 3. Cette température correspond à la température critique minimale pour tout type d'élément confondu (poutre, tirant, poteaux, etc.). En outre, cette valeur de la température critique retenue correspond à un taux de chargement maximal pour des structures métalliques multi étagées en situation d'incendie. Dans le cas de bâtiments industriels à simple rez-de-chaussée, une température critique minimale plus représentative serait de 650°C.

Étude

Les calculs portent sur un profilé en acier de petite section du type HEA 200 (donc s'échauffant plus rapidement), dont les propriétés thermiques à hautes températures sont celles données dans l'EUROCODE 3 partie 1.2 (ENV 1993-1-2 + DAN). Les calculs de transferts thermiques considèrent une tenue mécanique appropriée de l'enveloppe du bâtiment. Les systèmes constructifs étudiés sont les suivants :

□ Profilé directement exposé et non protégé :

- **Simulation 1** : Exposition d'un profilé métallique non protégé correspondant à l'exposition d'un pont de tuyauterie ou d'un support de canalisation.

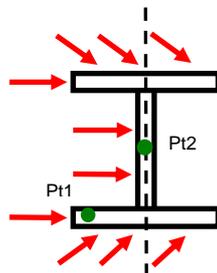


Figure 7-7 : Simulation 1-a (Exposition sur une face, selon l'axe faible)

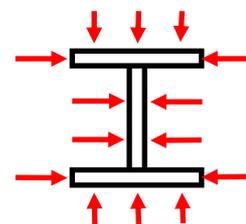


Figure 7-8 : Simulation 1-b (Exposition sur 4 faces)

Remarque : La simulation 1-b, bien que très improbable dans le cadre d'un rayonnement énergétique, correspond à l'exposition la plus défavorable (exposition sur la surface totale du profilé), entraînant l'échauffement le plus important du profilé métallique (hypothèse sécuritaire).

- **Simulation 2** : Exposition d'une semelle d'un profilé métallique, correspondant à l'exposition d'un poteau formant feuillure d'un mur en béton.

Pt1

Figure G-9 : Exposition de l'axe fort

□ Profilé protégé par l'enveloppe du bâtiment :

- **Simulation 3** : Exposition d'un profilé métallique protégé par un parement en acier¹ de 75/100 d'épaisseur correspondant à un bardage simple peau d'un entrepôt.

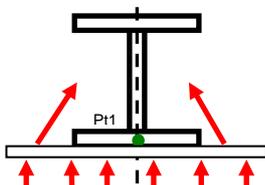


Figure G-10 : Exposition du parement acier

Le rayonnement issu de la paroi interne du bardage sur le profilé a été pris en compte sur une largeur de 6 m, correspondant à un espacement courant de portiques métalliques pour des bâtiments industriels.

- **Simulation 4** : Exposition d'un profilé métallique protégé par un bardage double peau avec une âme isolante en laine de roche Rockwool 100 kg/m³ de 40 mm et 80 mm d'épaisseur, correspondant à des bardages double peau CF ½ h et 1h.

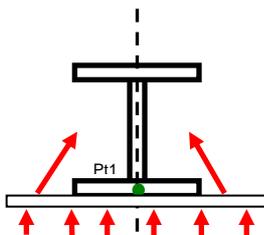


Figure G-11 : Exposition du bardage double peau laine de roche

Les tableaux ci-dessous présentent les propriétés thermiques de la laine de roche utilisées pour l'ensemble des simulations :

Température (°C)	20	100	250	350	450	550	600	900	1300
Conductivité thermique W/(m.K)	0.109	0.109	0.109	0.109	0.241	0.321	0.45	0.595	0.595

Tableau 7-15 : conductivité thermique de la laine de roche (100 kg/m³) en fonction de la température

Température (°C)	20	90	100	110	120	1100	1101	1300
Chaleur spécifique (J/kg.K)	836	836	836	836	836	836	1	1

Tableau 7-16 : Chaleur spécifique de la laine de roche (100 kg/m³) en fonction de la température

Les calculs de transferts thermiques sont effectués à l'aide du logiciel de calculs thermomécaniques aux éléments finis ANSYS®. Pour l'ensemble des simulations, le rayonnement énergétique est considéré stationnaire durant toute la durée de la simulation.

¹ Les propriétés thermiques et mécaniques de l'acier à hautes températures sont celles données dans l'EUROCODE 3 partie 1.2 (ENV 1993-1-2 + Dan)

Dans le cas où l'élément de structure est situé en dehors des flammes, le mode de transfert de chaleur est principalement radiatif du fait des faibles échanges convectifs qui sont essentiellement liés à la température de la paroi exposée. Il a donc été considéré les coefficients d'absorption, d'émissivité et de convection suivants :

	Absorption (α)	Emissivité (ϵ)	Convection (W/m^2K)	Température air ambiant ($^{\circ}C$)
Face exposée	1	1	10	20
Face non exposée	-	0.7	4	20

Tableau 7-17 : Conditions aux limites utilisées pour un feu extérieur où la cible est située en dehors des flammes (faibles échanges convectifs)

2 - INFLUENCE D'UN ÉCLAIREMENT DE 16 KW/M² SUR DIFFÉRENTS SYSTÈMES CONSTRUCTIFS

Les figures 9, à 11 présentent la température maximale d'un profilé HEA 200 (non protégé) exposé sur 3 et 4 faces, soumis à un flux stationnaire de 16 kW/m².

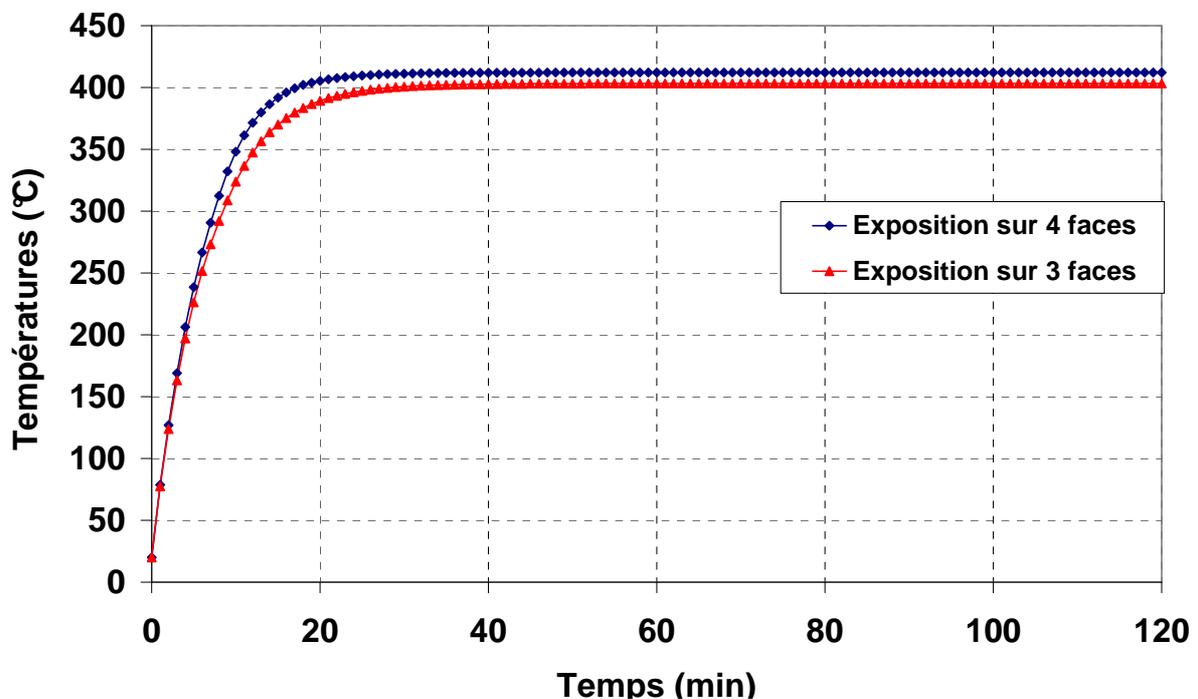


Figure G-12 : Simulation 1 - Température maximale d'un profilé HEA 200 non protégé, exposé à un flux stationnaire de 16 kW/m²

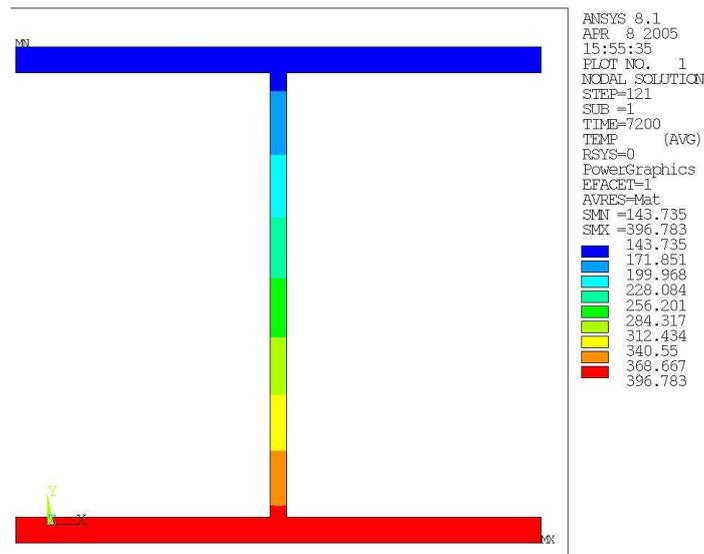


Figure G-16 : Simulation 2 - Échauffement d'un profilé HEA 200 exposé sur 1 face (axe fort) à un flux stationnaire de 16 kW/m²

On constate que pour une exposition sur 1 face, 3 faces et 4 faces, le régime stationnaire est atteint respectivement après 80 min (1 face), 30 minutes (3 faces) et 20 minutes (4 faces). On obtient :

- Une température maximale de **412°C pour une exposition sur 4 faces** (échauffement uniforme du profilé) ;
- Une température maximale de **403°C pour une exposition sur 3 faces**. Toutefois l'échauffement maximal est localisé sur un quart des semelles du profilé, un autre quart n'étant qu'à 360°C ;
- Une température maximale de **396°C pour une exposition sur 1 faces**. Toutefois, l'échauffement maximal reste localisé au niveau de la semelle exposée. Les températures maximales atteintes au milieu de l'âme du profilé et de la semelle opposée sont respectivement de **263°C et de 161°C** .

Les températures maximales atteintes pour une exposition sur 1, 3 et 4 faces sont inférieures à la température critique minimale forfaitaire de l'acier (500°C).

On constate que la température maximale d'un profilé métallique non protégé dépend très peu de la surface d'exposition prise en compte. En effet, elle varie de 396°C (exposition d'une seule face) à 412°C (exposition de 4 faces).

Les figures suivantes présentent les courbes de températures d'un profilé HEA 200 protégé par différents types de bardages exposés à un flux stationnaire de 16 kW/m², ainsi que l'échauffement du profilé jusqu'à 2 h d'exposition.

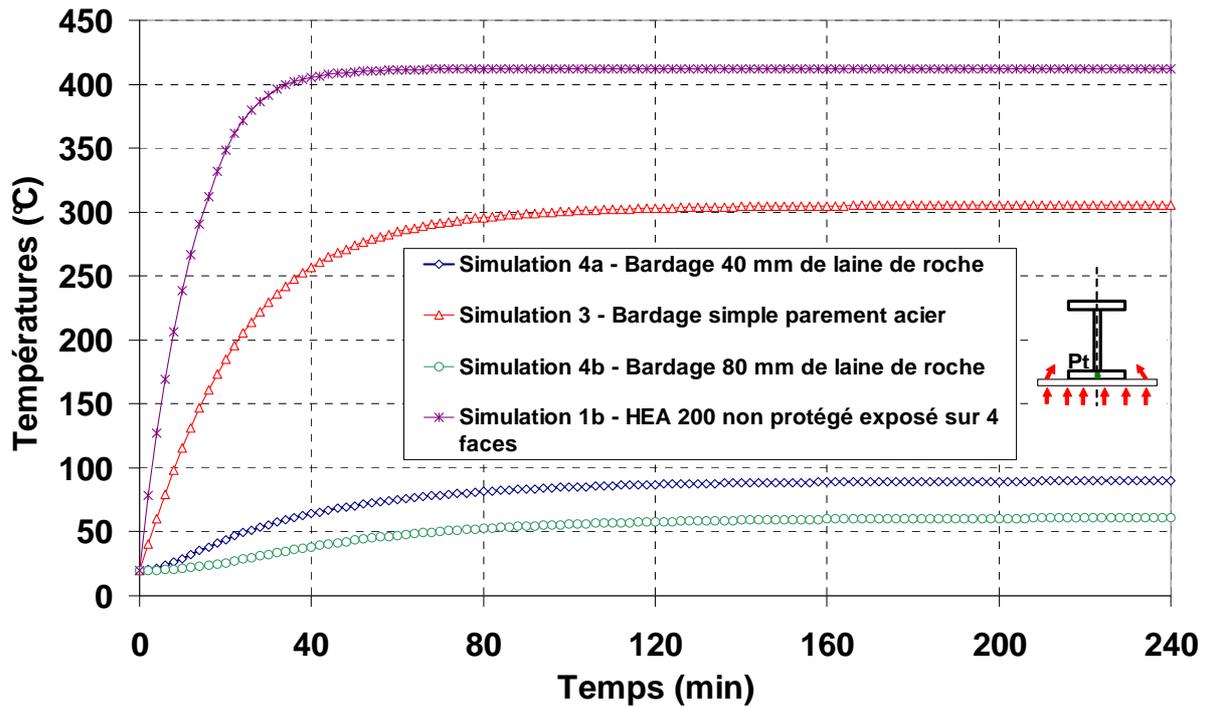


Figure G-17 : Simulations 1, 3 et 4 : Température maximale d'un profilé HEA 200 protégé, exposé à un flux stationnaire de 16 kW/m²

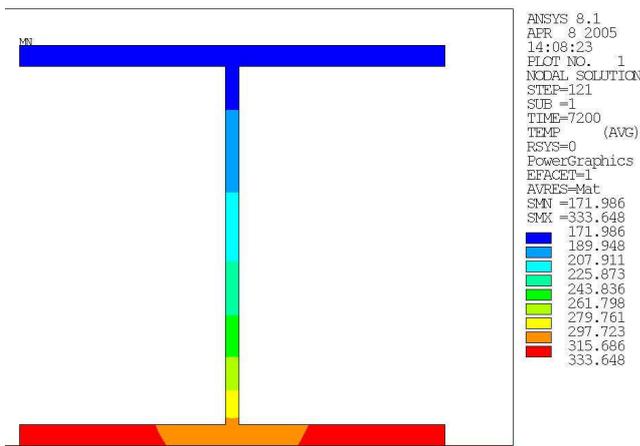


Figure G-18 : Simulation 3 -Échauffement d'un profilé HEA 200 protégé par un parement acier (16 kW/m²)

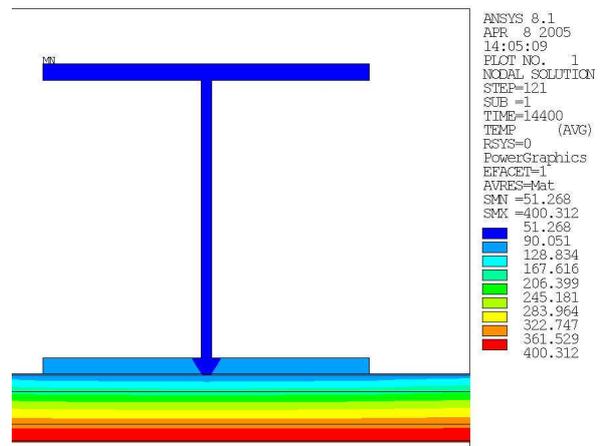


Figure G-19 : Simulation 4-a Échauffement d'un profilé HEA 200 protégé par 40 mm de laine de roche (16 kW/m²)

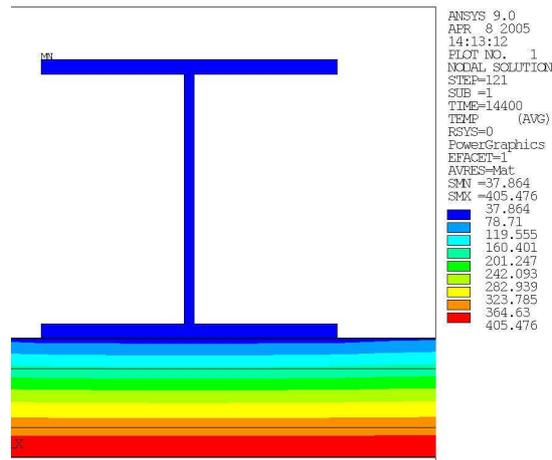


Figure G-20 : Simulation 4-b Echauffement d'un profilé HEA 200 protégé par 80 mm de laine de roche (16 kW/m²)

On constate que dans tous les cas, les températures maximales atteintes sont très inférieures à la température critique forfaitaire de l'acier (500°C) :

- La température maximale est de **305°C** pour un profilé protégé par un simple parement acier ;
- La température maximale est de **90°C** pour un profilé protégé par 40 mm de laine de roche (100 kg/m³) ;
- La température maximale est de **64°C** pour un profilé protégé par 80 mm de laine de roche (100 kg/m³).

La température maximale atteinte par un profilé non protégé et exposé sur 4 faces étant de 412°C, cela signifie qu'un simple parement acier suffit à diminuer de 100°C la température maximale du profilé. De même, un bardage double peau avec une âme isolante de 40 mm de laine de roche limite fortement l'échauffement du profilé, étant donné que la température avoisine 90°C.

Cette première analyse montre que le seuil critique pour les bâtiments ne doit pas être déterminé en fonction de la nature de la structure porteuse, mais en fonction de la nature de l'enveloppe externe du bâtiment (bardage, parois extérieures, couvertures).

La figure ci-dessous présente l'échauffement d'un profilé HEA 200 (non protégé) exposé sur 4 faces, à un flux stationnaire variant de 16 kW/m² à 25 kW/m².

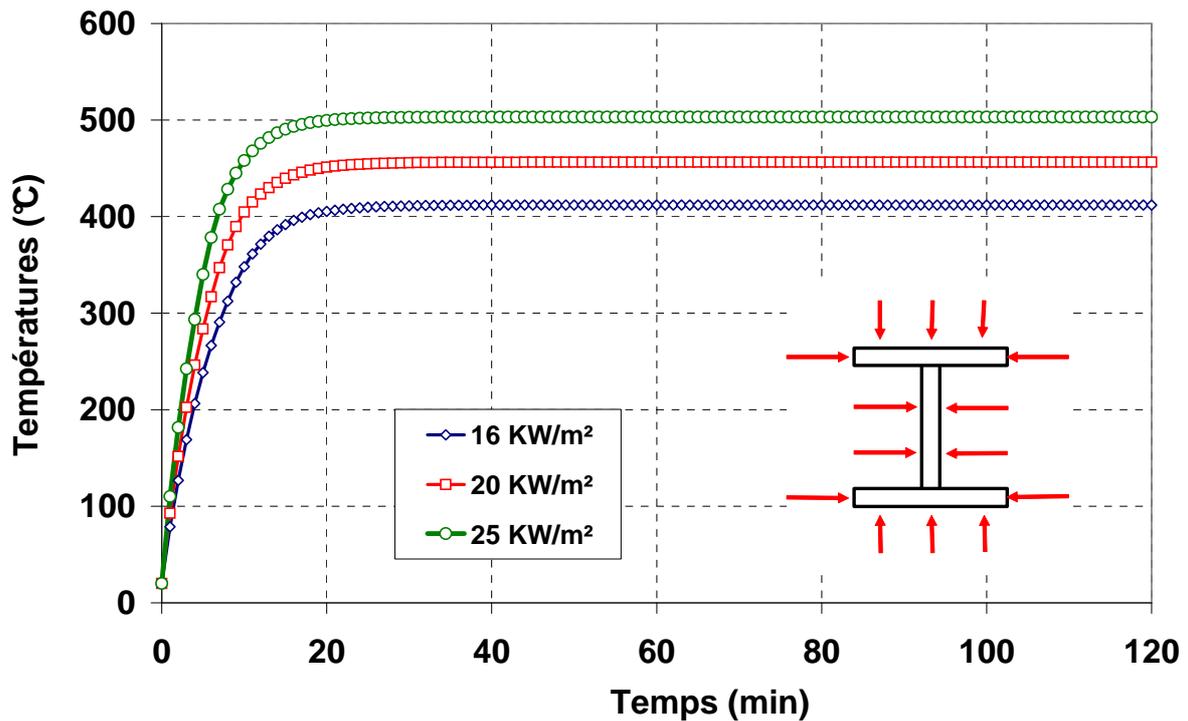


Figure G-21 : Simulation 1b - Température maximale d'un profilé HEA 200 exposé sur les 4 faces à un flux stationnaire variant de 16 à 25 kW/m²

Au vu des résultats, le flux critique minimal d'un profilé métallique HEA directement exposé est de l'ordre de **25 kW/m²**. Cette valeur est similaire à celle annoncée par le TNO (Green book). On peut donc en conclure que cette valeur peut être retenue comme **le seuil devant déclencher une étude plus approfondie pour des structures métalliques directement exposées**.

Les figures ci-dessous présentent l'échauffement d'un profilé HEA 200, pour les simulations 3, 4a et 4b.

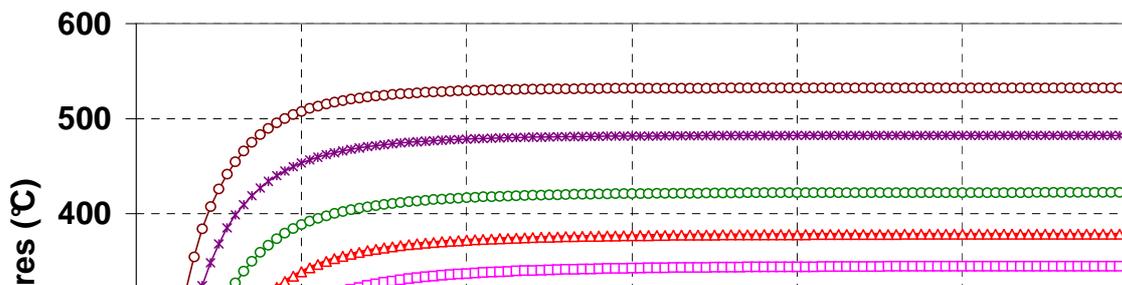


Figure G-22 : Température maximale de la semelle d'un profilé HEA 200 protégé par un simple parement acier exposé à un flux stationnaire variant de 16 kW/m² à 50 kW/m².

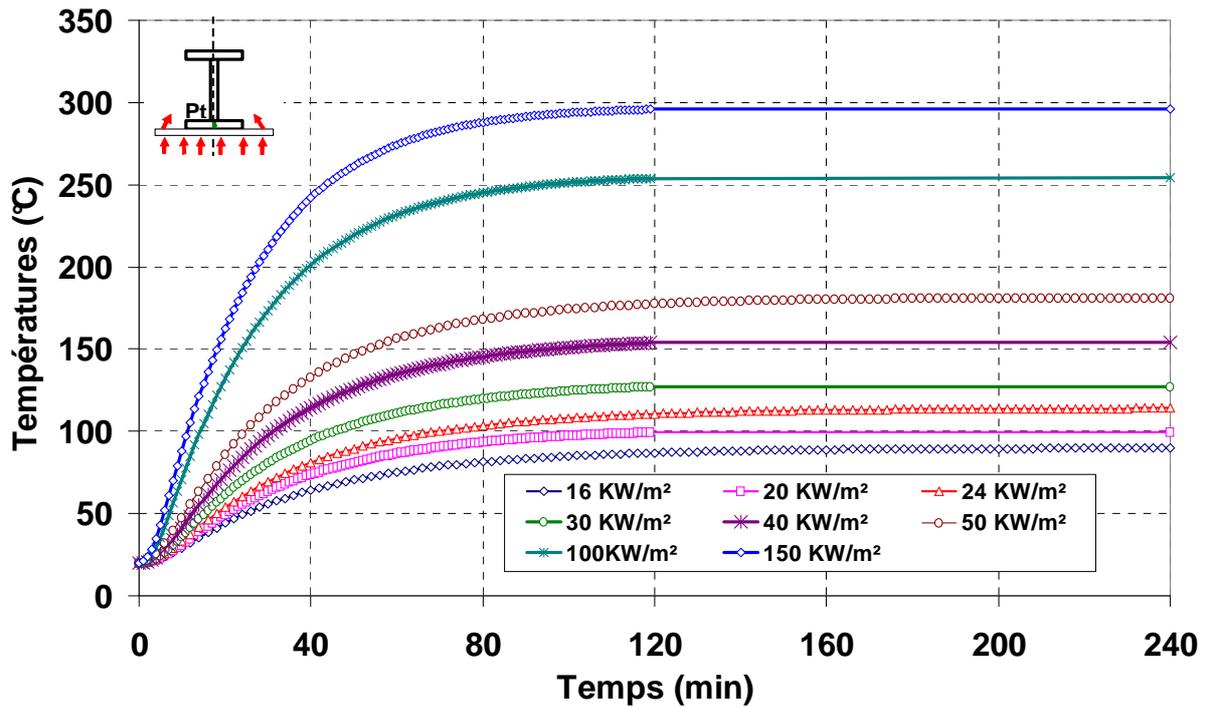


Figure G-23 : Simulation 4a - Température maximale de la semelle d'un profilé HEA 200 protégé par un bardage double peau (40 mm de laine de roche) exposé à un flux stationnaire variant entre 16 kW/m² à 150 kW/m²

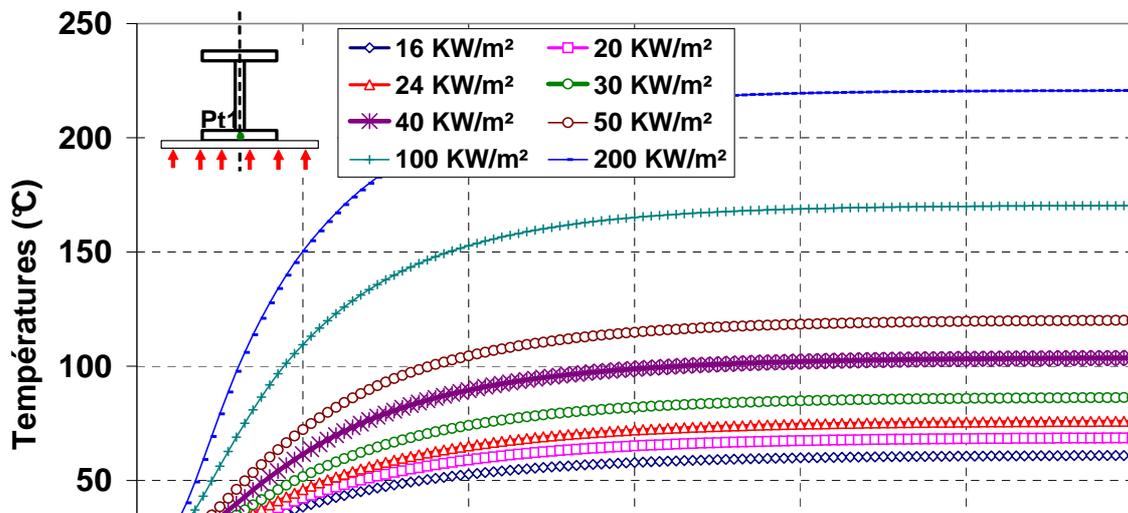


Figure G-24 : Simulation 4a - Température maximale de la semelle d'un profilé HEA 200 protégé par un bardage double peau (80 mm de laine de roche) exposé à un flux stationnaire variant entre 16 kW/m² à 50 kW/m²

Après analyse de ses simulations, on constate :

- Qu'un **simple parement acier** exposé à un flux incident de **40 kW/m²** permet de maintenir l'élément à une température **inférieure à 500°C** (482°C) (cf. figure 19) ;
- Qu'un **bardage double peau avec 40 mm de laine de roche** (Rockwool 100 kg/m³) soumis à un flux de **40 kW/m²** permet de limiter l'échauffement du profilé métallique à **155°C** (cf. figure 20).
- Qu'un **bardage double peau avec 80 mm de laine de roche** (Rockwool 100 kg/m³) soumis à un flux de **40 kW/m²** permet de limiter l'échauffement du profilé métallique à **103°C** (cf. figure 21).

Ces températures ne présentent aucun risque de ruine pour les structures. Toutefois, elles peuvent conduire à l'échauffement de l'air ambiant et par conséquent, présenter un risque pour les personnes situées à l'intérieur du bâtiment.

ANNEXE H ÉTUDE RELATIVE À L'INFLAMMATION DES MATÉRIAUX EN FONCTION DU FLUX.

Échauffement et inflammation des matériaux communs

L'échauffement de 6 matériaux représentatifs des matériaux extérieurs courants de l'habitat domestique est étudié. Les matériaux sont les suivants :

- Un sapin commun, pouvant servir de matériau principal de construction, de charpente légère (fermes et fermettes) ou de bardage lambrissé ;
- Un chêne rouvre, pouvant servir de structure bois ou de poutres de charpente ;
- Un polystyrène d'épaisseur 60 mm et de densité 30 kg/m³, pouvant servir d'isolant extérieur rapporté ;
- Un panneau sandwich à âme polyuréthane classé C-s2 ;d0 d'épaisseur 50 mm et de densité 40 kg/m³, pouvant servir de bardage ;
- Un panneau sandwich à âme polyisocyanurate classé B-s2 ;d0 d'épaisseur 50 mm et de densité 40 kg/m³, pouvant servir de bardage ;
- Un PVC rigide d'épaisseur 5 mm pouvant servir de chenaux, de gouttières et de montants de fenêtre.

Les propriétés des produits étudiés sont reprises dans le tableau présenté en page suivante.

La première partie des travaux a consisté à calculer leur échauffement à l'aide d'un modèle de transfert thermique 1D (hypothèse du mur semi-infini) et l'atteinte de différentes températures critiques relevées dans le présent rapport.

Le calcul a été réalisé à l'aide d'un code en Fortran issu du moteur de transfert thermique de matériaux multi-couches du logiciel FDS 5. Ce code a été validé à de nombreuses reprises dans le cas de thermique instationnaire en cas d'incendie¹. Il permet de prendre en compte l'humidité du matériau et la perte d'énergie liée à la pyrolyse, limitant ainsi la montée en température.

Les calculs ont été réalisés en imposant des flux de surface tels que précisés et en imposant une émissivité et un coefficient d'absorption du rayonnement à 1.

Les résultats sont présentés en comparant les différentes températures critiques du tableau avec les courbes de montée en température.

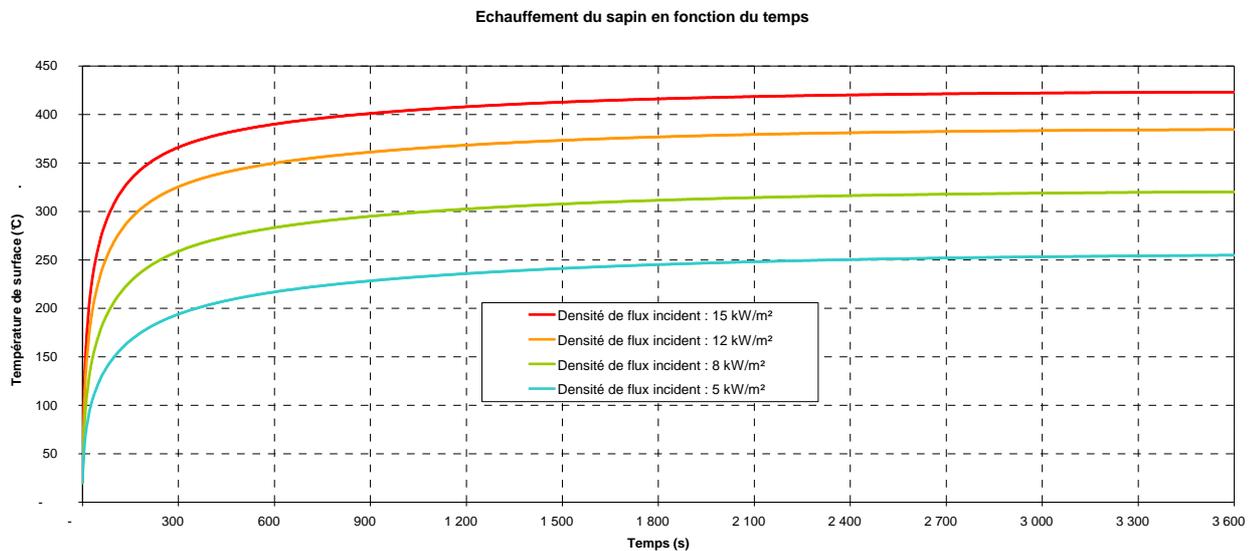
¹ Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Verification & Validation Guide (Draft, June 21, 2007), Mc Grattan *et. al.*

	Sapin	Chêne	Polystyrène	Panneau sandwich PUR C-S2;d0	Panneau sandwich PIR - B-S2;d0	PVC rigide
Origine des données	BD LNE - planche 30 mm	Chêne rouvre, BD LNE, planche 30 mm	Polystyrène extrudé isolant standard BD LNE - 60 mm	Panneau sandwich isolant PUR standard parement acier 0,63 mm BD LNE - 50 mm	Panneau sandwich isolant PIR standard parement acier 0,63 mm BD LNE - 50 mm	PVC rigide fenetres et gouttieres BD LNE - 5 mm
Capacité thermique massique (kJ/kg.K)	1.2 à 20°C 3.0 à 500°C	2.4	1.21	1.41	1.4	0.98 à 20°C 1.06 à 50°C 1.51 à 100°C
Conductivité thermique (W/m.K)	0.13 à 20°C 0.29 à 500°C	0.209	0.031 à 10°C 0.034 à 40°C 0.037 à 70°C 0.040 à 100°C 0.043 à 130°C	0.035	0.035	0.167
Densité des charbons (kg/m ³)	120	240	NA	NA	NA	NA
Capacité thermique massique des charbons (kJ/kg.K)	0.68 à 20°C 1.5 à 400°C 1.8 à 900°C	0.68 à 20°C 1.5 à 400°C 1.8 à 900°C	NA	NA	NA	NA
Conductivité thermique des charbons (W/m.K)	0.077 à 20°C 0.16 à 900°C	0.077 à 20°C 0.16 à 900°C	NA	NA	NA	NA
Epaisseur (m)	0.03	0.03	0.06	0.05	0.05	0.005
Densité (kg/m ³)	450	825	30	40	40	1380
Enthalpie de vaporisation (kJ/kg)	500	2500	1375	2400	2400	2000
Enthalpie de combustion (kJ/kg)	20800	18700	26460	17700	17700	17200
Humidité initiale (% m/m)	1%	1%	0%	0%	0%	0%
Vitesse maximale de combustion (kg/m ² .s)	-	-	-	0.00508	0.00508	0.016
Température de perte de propriétés mécaniques (°C)	250	250	90	170	200	75
Température de début de pyrolyse ¹ (°C)	250	250	250	250	250	175
Température d'inflammation pilotée (°C)	360	360 Relation d'Arrhenius	454	380	426	450

¹ Cela concerne la formation de gaz à la surface du matériau, en l'absence de combustion

Sapin

Le sapin est susceptible de constituer une charpente ou un bardage. La courbe de montée en température du sapin est la suivante :

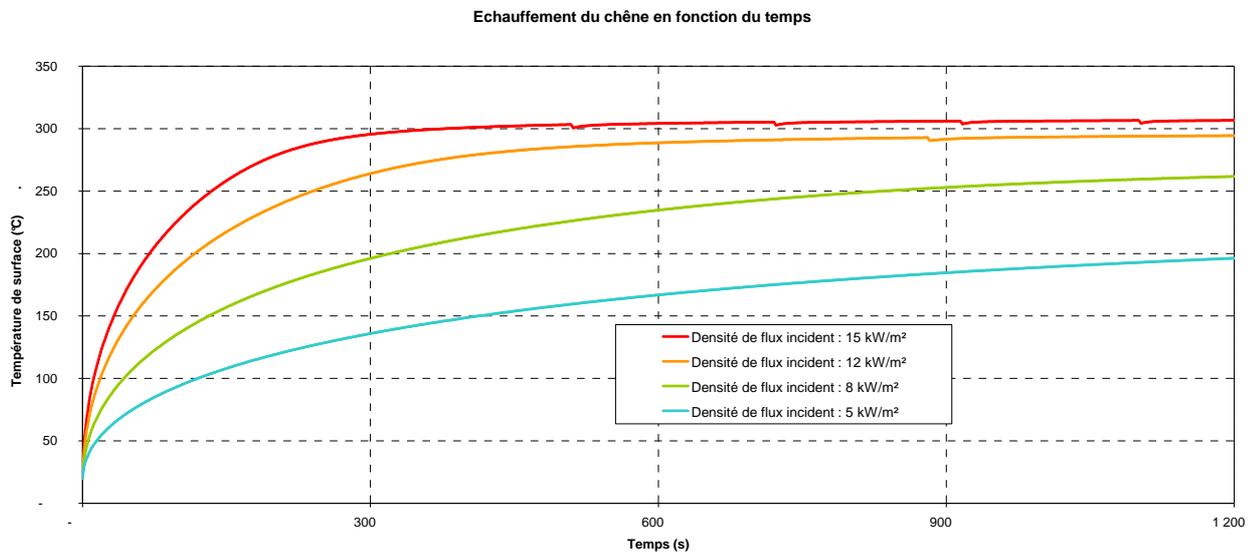


	Délai à la perte des propriétés mécaniques	Délai au début de pyrolyse	Délai à l'inflammation
à 5 kW/m ²	>1200 s	>1200 s	NI
à 8 kW/m ²	241 s	241 s	NI
à 12 kW/m ²	72 s	72 s	860 s
à 15 kW/m ²	43 s	43 s	259 s

Le sapin ne s'enflamme pas pour des flux inférieurs ou égaux à 8 kW/m². Il n'y a aucune perte de propriétés mécaniques, ni de pyrolyse à 5 kW/m², ce qui montre sa possible utilisation dans cette zone. A 8 kW/m², il perd ses propriétés mécaniques et commence à pyrolyser en environ 9 minutes. Pour des flux supérieurs, sa dégradation est rapide et son inflammation possible en moins de 20 minutes. Il n'est donc pas utilisable.

Chêne

Le chêne est principalement susceptible de constituer des parties structurales (poteaux, fermes principales de la charpente). La courbe de montée en température du chêne est la suivante :

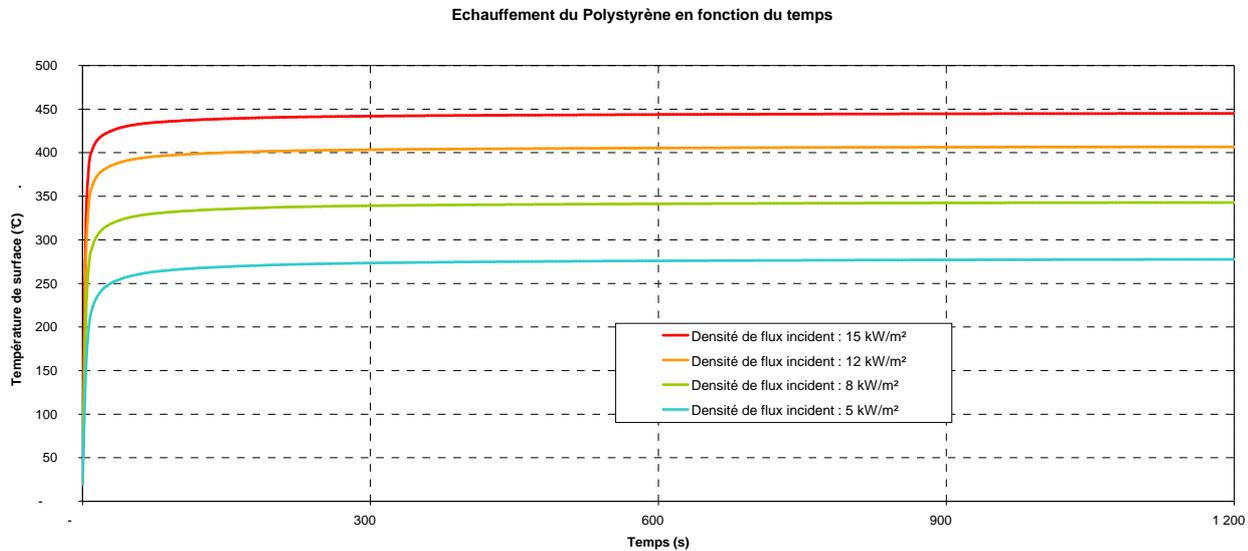


	Délai à la perte des propriétés mécaniques	Délai au début de pyrolyse	Délai à l'inflammation
à 5 kW/m ²	>1200 s	>1200 s	NI
à 8 kW/m ²	841 s	841 s	NI
à 12 kW/m ²	242 s	242 s	886 s
à 15 kW/m ²	137 s	137 s	517 s

Le chêne a un comportement proche de celui du sapin, avec néanmoins une inertie thermique plus importante. Cela engendre une utilisation adéquate dans la zone des 5 kW/m². Dans la zone des 8 kW/m², il perd ses propriétés mécaniques et débute sa pyrolyse avant 20 minutes, mais ne s'enflamme pas. Au-delà, le chêne se révèle peu approprié, car il s'enflamme en moins de 20 minutes. Il est néanmoins à noter qu'il préserve ses propriétés mécaniques plus longtemps que le sapin.

Polystyrène

Le polystyrène peut constituer un isolant de façade ou de toiture. La courbe de montée en température du polystyrène est la suivante :



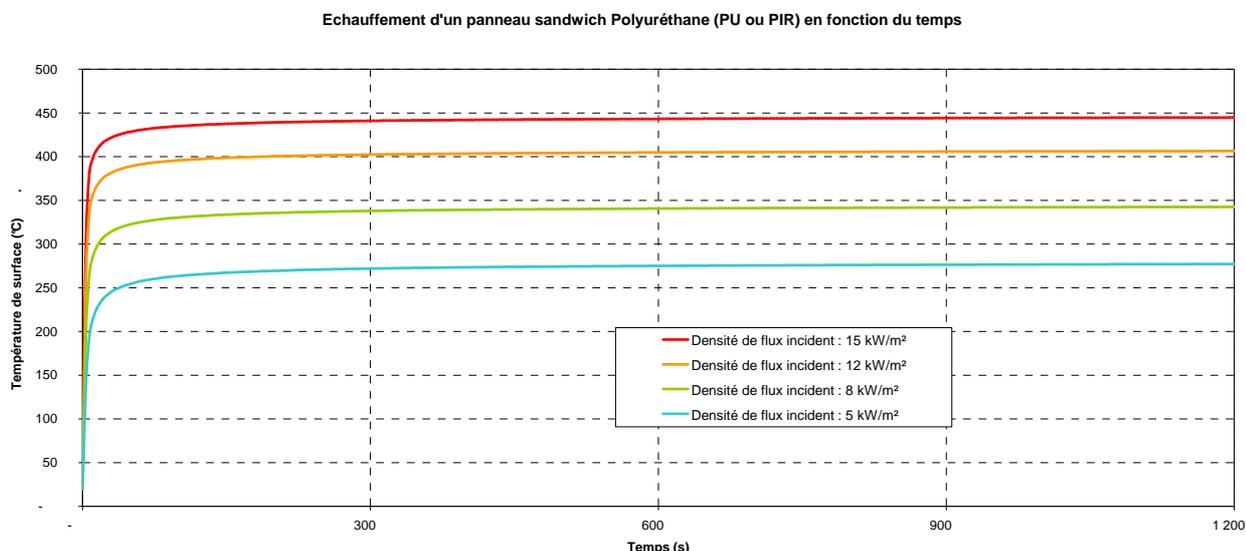
Le polystyrène, du fait de sa faible conductivité thermique et de sa faible densité, s'échauffe rapidement en surface.

	Délai à la perte des propriétés mécaniques	Délai au début de pyrolyse	Délai à l'inflammation
à 5 kW/m ²	< 5 s	32 s	NI
à 8 kW/m ²	< 5 s	7 s	NI
à 12 kW/m ²	< 5 s	< 5 s	NI
à 15 kW/m ²	< 5 s	< 5 s	NI

Dans tous les cas étudiés, le polystyrène s'échauffe très rapidement et pyrolyse rapidement. Il perd ainsi toutes ses propriétés mécaniques presque instantanément lorsqu'il est directement exposé. Néanmoins, même aux flux les plus importants, il ne s'enflamme pas. Il est donc à noter que le polystyrène apposé en parois externes des bâtiments ne fournit aucune protection vis à vis de l'aléa thermique, même dans la zone à 5 kW/m². Il présente en outre un risque combiné thermique/toxique par la génération de gaz et il convient ainsi de veiller à ce que ces gaz ne puissent être repris par l'arrivée d'air frais de l'espace considéré. Néanmoins, le polystyrène n'engendre pas de risque d'inflammation dans ces conditions.

Panneau sandwich polyuréthane ou polyisocyanurate

La courbe de montée en température du panneau sandwich polyuréthane (PUR et PIR) est la suivante :



Le polyuréthane et le polyisocyanurate sont très proches thermiquement et leurs courbes d'échauffement sont identiques. Néanmoins, leurs températures caractéristiques diffèrent. Les deux matériaux sont de très bons isolants thermiques et de ce fait s'échauffent rapidement en surface. Les résultats obtenus pour le polyuréthane (PUR) sont repris ci-dessous :

	Délai à la perte des propriétés mécaniques	Délai au début de pyrolyse	Délai à l'inflammation
à 5 kW/m ²	7 s	39 s	NI
à 8 kW/m ²	< 5 s	7 s	NI
à 12 kW/m ²	< 5 s	< 5 s	29 s
à 15 kW/m ²	< 5 s	< 5 s	7 s

Les résultats obtenus sur le polyisocyanurate (PIR) sont repris ci-dessous :

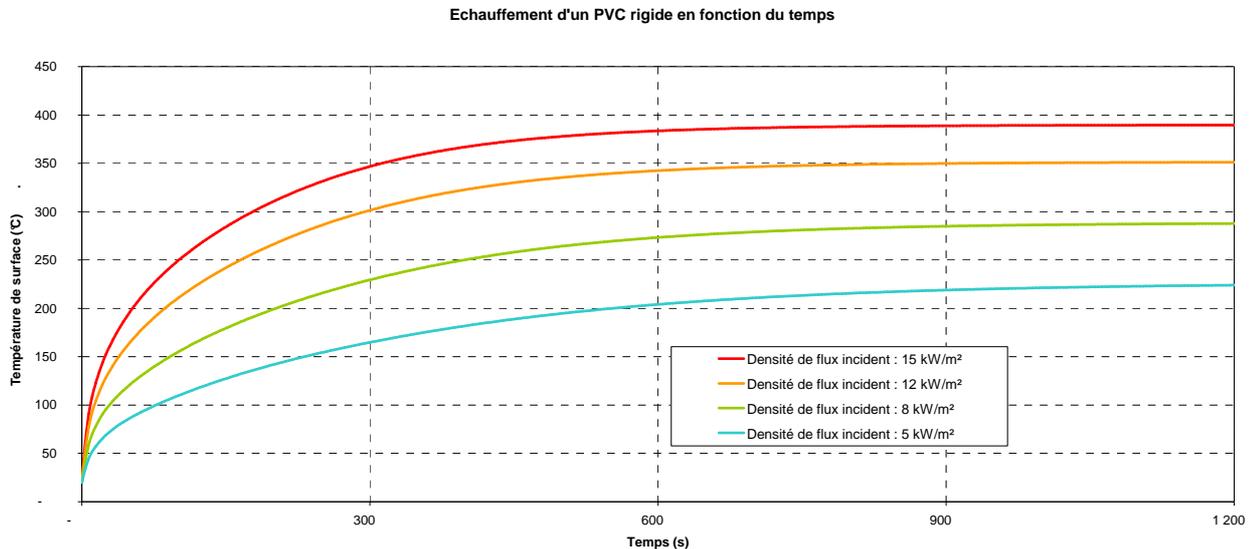
	Délai à la perte des propriétés mécaniques	Délai au début de pyrolyse	Délai à l'inflammation
à 5 kW/m ²	8 s	39 s	NI
à 8 kW/m ²	< 5 s	7 s	NI
à 12 kW/m ²	< 5 s	< 5 s	NI
à 15 kW/m ²	< 5 s	< 5 s	43 s

Pour le polyuréthane, les résultats sont similaires à ceux du polystyrène. Le produit s'échauffe très rapidement et pyrolyse rapidement. Il perd ainsi toutes ses propriétés mécaniques presque instantanément lorsqu'il est directement exposé. Aux flux les plus importants, il s'enflamme très rapidement. Le polyisocyanurate présente une meilleure tenue à l'inflammation et ne s'enflamme pas à 12 kW/m², bien qu'il se dégrade rapidement. Au regard de ces résultats, le PUR et le PIR sont à proscrire en bardage extérieur dans les zones exposées même à des flux de l'ordre de 5 kW/m². Ils présentent un risque combiné thermique-toxique et perdent leurs propriétés mécaniques. Ces produits

s'enflamment difficilement, mais rapidement si le flux est suffisant. En particulier, le PIR nécessite des flux supérieurs à 12 kW/m² pour s'enflammer.

PVC rigide

Le PVC rigide constitue des petits éléments comme les chenaux et gouttières, mais aussi des éléments plus lourds comme les portes et les montants des fenêtres. La courbe de montée en température du PVC est la suivante :



	Délai à la perte des propriétés mécaniques	Délai au début de pyrolyse	Délai à l'inflammation
à 5 kW/m ²	32 s	356 s	NI
à 8 kW/m ²	13 s	140 s	NI
à 12 kW/m ²	7 s	60 s	NI
à 15 kW/m ²	5 s	39 s	NI

Dans toutes les situations étudiées, le PVC perd rapidement ses propriétés mécaniques, puis se met à dégager des produits de pyrolyse. Néanmoins, il ne s'enflamme pas, même à 15 kW/m². Ainsi, il présente un risque de perte d'intégrité mécanique et de phénomène combiné thermique / toxique. Il peut néanmoins être utilisé pour certains éléments extérieurs comme les gouttières et les chenaux, sous réserve que la position des entrées d'air du local à protéger ne soit pas exposée. Une huisserie de fenêtre en PVC pose des problèmes d'intégrité mécanique très rapidement, même à 5 kW/m² et est donc à proscrire dans cette zone.

Situation de référence étudiée

Afin d'étudier le comportement de ces matériaux dans une situation réaliste d'environnement d'incendie industriel, des calculs numériques ont été réalisés en prenant en compte les propriétés des matériaux évoqués.

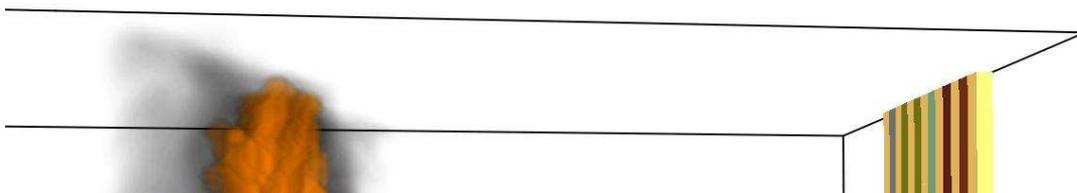
Ces simulations permettent d'analyser l'aptitude des matériaux à effectivement s'enflammer en situation réaliste, mais ne donnent pas d'indications sur le comportement mécanique des produits.

Hypothèse de simulation

Les calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel FDS version 4.0.8. Ce code est un outil de mécanique des fluides appliquée à l'incendie développé par le NIST (USA) et le VTT (Finlande). Il prend en compte le rayonnement issu des flammes et des suies. Le rayonnement est traité par une équation RTE non diffusante et l'intégration par la méthode des volumes finis. La convection provenant des autres surfaces impactées par le rayonnement est traitée par un bilan simplifié selon une formulation de Newton à coefficient de convection dynamique.

La situation étudiée est définie pour se rapprocher d'une exposition semi-infinie. La source de feu est constituée d'un système de dimensions conséquentes : 30 m de largeur, 5 m de hauteur et 5 m de profondeur. A cet environnement est appliqué un feu de 1000 kW/m², ce qui engendre un débit calorifique de l'ordre de 470 MW et des flammes de 15 à 20 m de hauteur environ. Ces flammes sont semi-transparentes au rayonnement, aussi les surfaces exposées reçoivent-elles une quantité d'énergie supérieure aux hypothèses traditionnelles de « mur de flamme ». Afin de traiter le rayonnement des flammes et la génération de suies et d'espèces, l'hypothèse a été prise de considérer un feu de polyoléfine. Au-delà de 20 m de haut, le rayonnement des fumées n'est plus pris en compte dans le calcul.

Les matériaux sont disposés à une distance variable de cette source, et forment des éléments de 20 m de haut et de 1 m de large. L'objectif est de reproduire leur comportement sur toute la hauteur possible d'exposition, celle-ci étant nettement supérieure à la hauteur de la surface génératrice de l'incendie. Dans cette situation, les matériaux sont séparés de matériaux inertes thermiquement, afin que l'échauffement de chaque élément soit indépendant. Le flux reçu par les matériaux est identique, mais il varie fortement en fonction de la hauteur et de l'angle de vue de la source considérée.



Scénario d'exposition des matériaux étudié

Quatre hypothèses ont été réalisées, correspondant à quatre distances d'éloignement de la source :

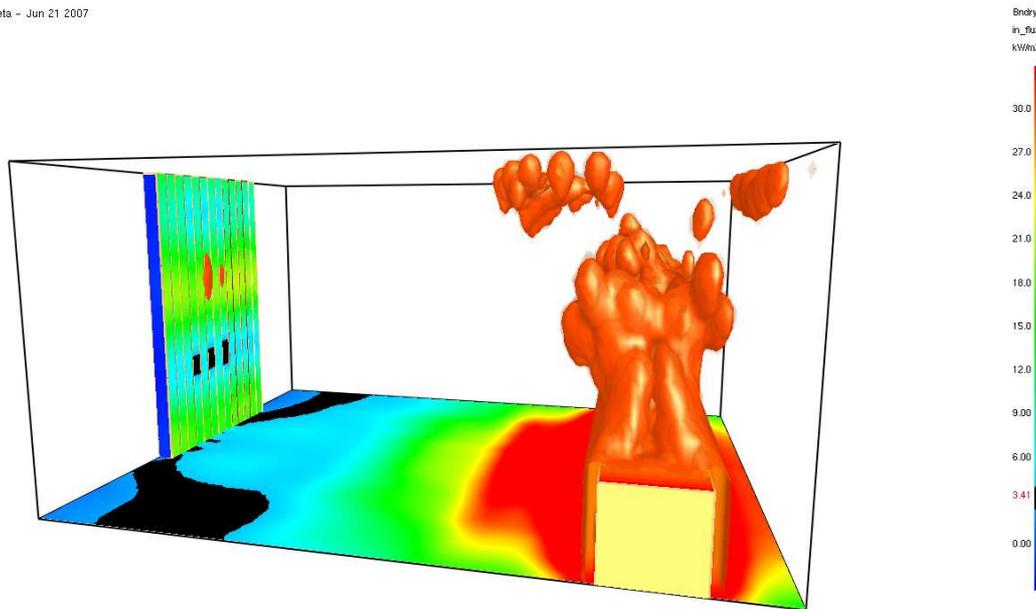
- Cas A : La source est placée à une distance de 40 m de la cible.
- Cas B : La source est placée à une distance de 50 m de la cible.
- Cas C : La source est placée à une distance de 60 m de la cible.
- Cas D : La source est placée à une distance de 70 m de la cible.

Les simulations sont réalisées pour une durée d'exposition de 1200 secondes.

Cartographie des flux d'exposition

Afin de vérifier le profil d'exposition de la paroi, une cartographie des flux d'exposition est réalisée. Celle-ci montre une homogénéité du flux dans le plan horizontal et une forte hétérogénéité dans le plan vertical.

Smokeview 5.0.0 Beta - Jun 21 2007

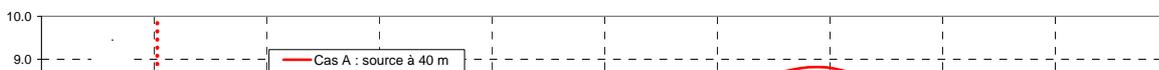


Frame: 13
Time: 3.9

Vue aux surfaces solides du flux thermique lors d'un calcul

Les résultats sont détaillés dans les courbes et tableaux ci-dessous :

Flux thermique en fonction de la hauteur de la cible



Cartographie des densités de flux énergétiques en fonction de la hauteur de la cible.

	Flux mesuré à 2 m (kW/m ²)	Flux maximum mesuré (kW/m ²)
Cas A : source à 40 m	3.7	8.8
Cas B : source à 50 m	1.7	8.1
Cas C : source à 60 m	0.9	7.5
Cas D : Source à 70 m	0.6	6.7

Les résultats montrent une forte différence entre les flux reçus à différentes hauteurs de cibles. A proximité du sol, les éléments reçoivent la part radiative directe, mais aussi la réflexion radiative et la convection issue du sol. La densité de flux énergétique est à son minimum dans les situations étudiées à une hauteur correspondant à celle de la source, puis croît à nouveau car s'ajoutent le rayonnement issu des flammes des deux faces et le rayonnement des fumées. Le flux est alors maximum. Lorsque la source est suffisamment proche (cas A), il est au maximum vers 14 mètres dans le cas considéré. Lorsque la source s'éloigne, le facteur de vue diminue et ce maximum est visible à une hauteur plus importante. Il présente alors une densité de flux diminuant.

Délais d'inflammation constatés

Sur les matériaux étudiés, les délais d'inflammation constatés figurent dans le tableau ci-après.

Délai d'inflammation (s)	Sapin	Chêne	Polystyrène	Panneau sandwich PUR	Panneau sandwich PIR	PVC rigide
Cas A : source à 40 m	358	>1200	62	44	>1200	>1200
Cas B : source à 50 m	>1200	>1200	356	216	>1200	>1200
Cas C : source à 60 m	>1200	>1200	>1200	442	>1200	>1200
Cas D : Source à 70 m	>1200	>1200	>1200	>1200	>1200	>1200

Les résultats montrent que dans ces conditions d'échauffement, le panneau sandwich PIR, le PVC rigide et le chêne ne s'enflamment pas.

Le sapin s'enflamme en moins de 20 minutes dans le cas d'exposition au plus proche. Cela est compatible avec les premiers résultats présentés sur le transfert thermique du sapin, qui s'enflammait à 8 kW/m². Dans cette situation, le chêne ne s'est pas enflammé. Le polystyrène s'enflamme aux expositions les plus proches, mais ne s'enflamme pas lorsque la distance est suffisante. Elle correspond alors à un flux maximum de 7,1 kW/m². Il est à noter que le polystyrène ne s'enflammait pas à 5 kW/m² dans l'étude préliminaire. Du fait de sa réponse thermique, le panneau sandwich PUR s'enflamme même dans le cas C. Le panneau sandwich PIR, bien qu'ayant un comportement thermique proche, est bien plus résistant à l'inflammation et ne s'enflamme pas. Comme dans l'étude préliminaire, le PVC ne s'enflamme pas.

En ce qui concerne l'inflammation, le comportement thermique simplifié analysé précédemment est donc suffisant pour caractériser la potentialité d'inflammation. Dans une situation plus réaliste de feu de grande dimension, le comportement des matériaux est reproduit de manière relativement satisfaisante. Néanmoins, cette étude ne fournit pas d'informations quant à la tenue mécanique des produits considérés.

ANNEXE I ÉTUDE RELATIVE AUX SOLUTIONS D'ATTÉNUATION DU FLUX THERMIQUE.

SYSTÈMES D'ATTÉNUATION PAR PERFORATION

Base théorique

Les tôles perforées ou des toiles enduites peuvent être utilisées comme pare-soleil, et par extension comme système d'atténuation du flux thermique. Néanmoins, leur utilisation engendre certaines limites.

Thermiquement un corps peut être classés, comme *corps mince* ou *corps épais*, à partir du critère proposé par Biot. Le nombre de Biot est le rapport de la résistance thermique interne du corps (conduction) et sa résistance thermique de surface (convection et rayonnement) dans la direction de la propagation de la chaleur.

$$Bi = \frac{h\delta}{k}$$

avec

h : coefficient d'échange de chaleur par convection ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$),

k : conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-4}$)

δ : longueur caractéristique, ici l'épaisseur de la toile (m)

On admet qu'un système est mince lorsque $Bi < 0.1$ et épais sinon. Dans le cas traité, le corps est systématiquement considéré comme mince. Pour les corps thermiquement minces, la température peut être considérée comme uniforme dans l'épaisseur du matériau. Elle ne dépend alors que du temps et est définie par :

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\dot{q}_e'' - \dot{q}_{rr}'' - \dot{q}_{conv}'' - \dot{m}'' \Delta H_v}{\rho C_p \delta}$$

avec :

\dot{q}_e'' : densité de flux incident, arrivant sur une face de l'élément (kW/m^2)

\dot{q}_{rr}'' : pertes par rayonnement, sur les deux faces de l'élément (kW/m^2)

\dot{q}_{conv}'' : pertes par convection, sur les deux faces de l'élément (kW/m^2)

\dot{m}'' : débit de pyrolyse du produit ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

ΔH_v : enthalpie de vaporisation du produit ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)

ρ : densité du produit ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

C_p : Chaleur spécifique ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

Le dernier terme n'est présent que si le produit est combustible. Les pertes par rayonnement, sur les deux faces de l'élément, peuvent être estimées par la formule suivante :

avec :

ε : émissivité du produit ;

σ : Constante de Stephan Boltzmann ($5,67\cdot 10^{-8} \text{ kW}/\text{m}^2\cdot\text{K}^4$)

T_s : température de l'élément (K)

T_o : température ambiante (K)

Les pertes par convection, sur les deux faces de l'élément, peuvent être estimées par la formule suivante :

h , coefficient de convection, peut être défini, dans le cas d'un élément placé verticalement et d'un écoulement naturel, par la formule :

$$h = 0,95 \cdot |T_s - T_o|^{1/3}$$

Si le produit est combustible, les effets de la vaporisation sont calculés à partir d'une relation d'Arrhenius liant débit de pyrolyse de la toile à la température. Cette relation est de la forme :

$$\dot{m}'' = A \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}}$$

Les paramètres A et E_a sont déterminés à partir des bases de donnée du LNE, donnant le débit de pyrolyse en fonction de la température pour de nombreux produits et déterminés par analyse thermogravimétrique.

Toiles perforées

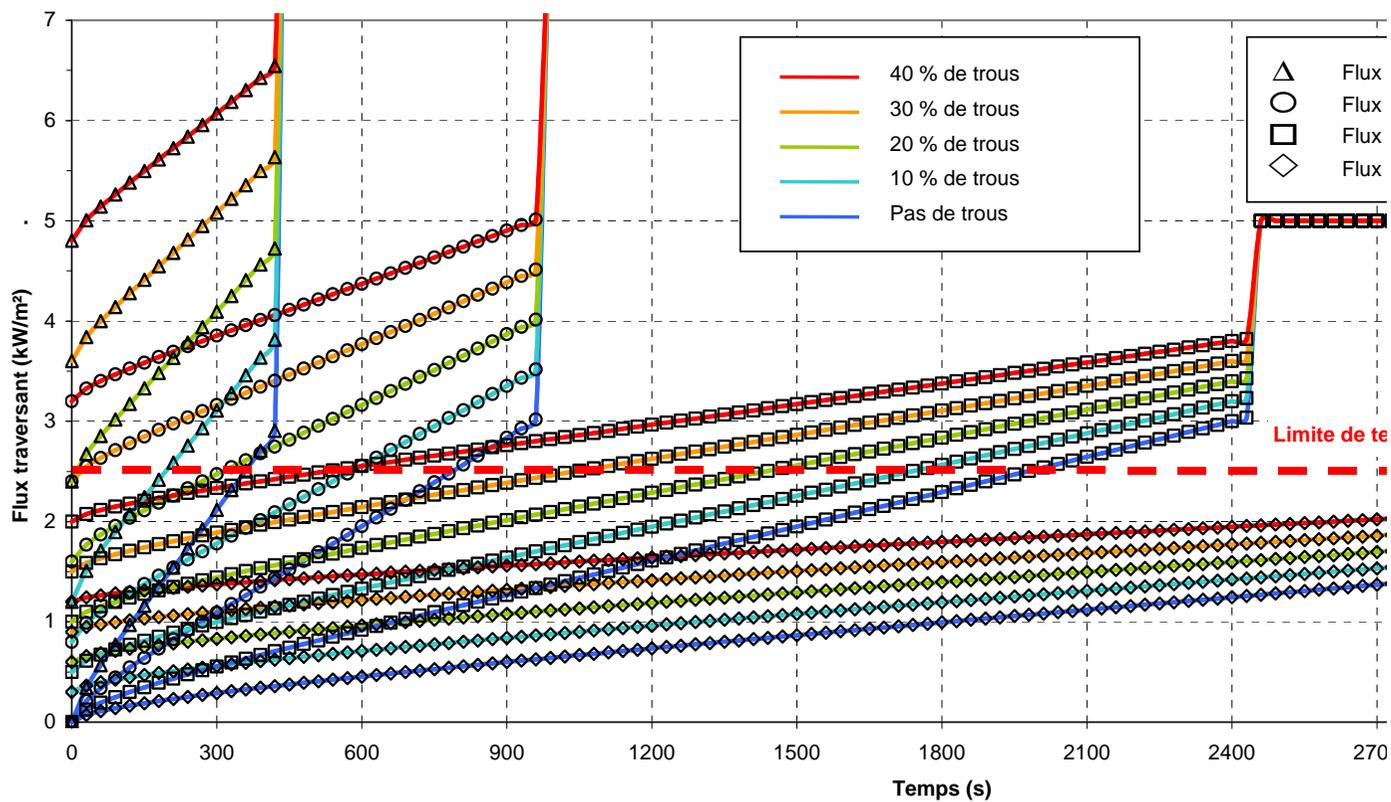
Les toiles perforées sont des systèmes constructifs utilisés en général comme écrans pare-soleil. Elles sont principalement composées de fibres de verre enduites de PVC. Les perforations correspondent alors aux écartements entre les fils de la toile de verre enduite et la cohésion est assurée par le PVC souple. Elles représentent de 10 à 40 % de la surface.

Ces produits procurent une résistance au flux fonction de la densité de trous. En négligeant les phénomènes de diffraction au travers de ceux-ci, il est possible d'estimer que le flux traversant correspond au flux passant directement par les trous (proportionnel au pourcentage de trous de la toile) auquel on ajoute le flux réémis correspondant à l'échauffement de la toile. Au-delà d'une température critique, le produit n'assure alors plus sa fonction par perte d'intégrité. Pour le PVC souple, cette température est de 230°C. Cette donnée provient d'une étude réalisée par le LNE pour un industriel.

Dans le cas d'une toile verre-PVC, il est alors possible d'établir des abaques comme celle présentée ci-contre.

Ce type d'abaque montre que pour un flux incident de 3 kW/m², toutes les toiles étudiées permettent d'atténuer le flux pour passer sous le critère de 2,5 kW/m² pour les personnes, pour une heure d'exposition. Pour des flux supérieurs, il convient de bien analyser le temps de protection fourni par la toile, qui devient rapidement très faible.

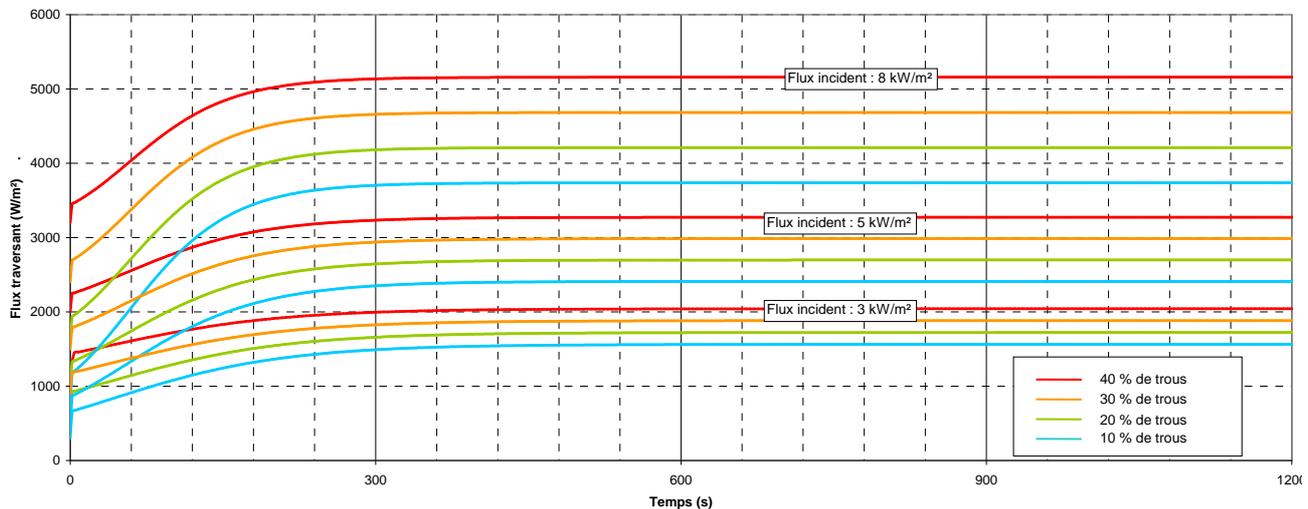
Densité de flux traversant une toile enduite verre-PVC perforée



Tôles perforées

Les tôles perforées ont un comportement différent. Elles sont composées d'une plaque d'acier ou d'aluminium peint d'environ 1 mm d'épaisseur et perforé à hauteur de 10 à 40 %. Ces tôles absorbent la chaleur en s'échauffant et réémettent vers l'intérieur de l'environnement.

Réponses des tôles perforées en fonction du flux incident - Exemple d'une tôle acier de 1 mm d'épaisseur



Les résultats montrent que les tôles perforées jusqu'à 30% de trous permettent de réduire l'intensité de flux radiatifs vers le niveau inférieur (de 8 à 5 kW/m², de 5 à 3 kW/m²). Si la surface trouée est trop importante la réduction du flux n'est pas aussi performante.

A une densité de flux incidente de 3 kW/m², le critère de tenabilité humaine (2,5 kW/m²) n'est jamais atteint, quelle que soit la proportion de trous considérée.

On peut ainsi envisager que ces tôles perforées puissent être employées comme écran thermique pour les façades translucides afin de conserver une certaine luminosité.

SYSTÈMES D'ATTÉNUATION PAR AVANCÉES ARCHITECTURALES

Les systèmes d'atténuation par volets comprennent les avancées architecturales (ou écrans), les volets brise-soleil et les persiennes. Tous ces systèmes ont pour but d'atténuer le rayonnement arrivant dans une ouverture, en général une fenêtre.

Dans les écrans sont à distinguer les écrans horizontaux et les écrans verticaux. Les écrans ne sont d'aucun effet lorsque le facteur de vue entre foyer et fenêtre est de l'ordre de 1. Sinon, ils atténuent l'angle de vue de la source et donc le rayonnement. Il faut néanmoins toujours veiller à considérer que l'avancée absorbe et réémet du rayonnement.

Les profils d'ombre d'un écran horizontal dépendent de deux angles principaux, définissant l'angle minimum d'incidence α et l'angle maximum d'incidence β .

Zone pour laquelle le flux incident est totalement atténué (hors réémission)

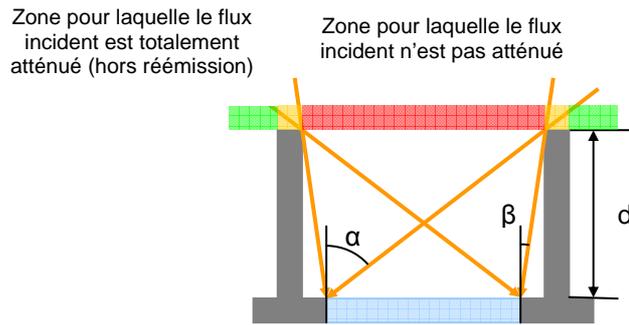
d

β

Zone pour laquelle le flux incident n'est pas atténué

α

Les profils d'ombre d'un écran vertical se calculent de la même manière. Ils réduisent l'angle de vue de la source par la fenêtre et atténuent ainsi le rayonnement.



SYSTÈMES D'ATTÉNUATION PAR PERSIENNES, STORES ET VOILETS

Les stores à lamelles peuvent être traités de la même manière. Néanmoins, ils sont constitués souvent de matériaux fins et peuvent s'échauffer rapidement et ainsi réémettre une grande partie du rayonnement incident. Leur effet est donc à évaluer au cas par cas, en fonction de leurs coefficients d'absorption et d'émissivité, mais aussi des propriétés thermiques des éléments constitutifs.

