



RAPPORT D'ÉTUDE

28/10/2009

INERIS- DRA-09-103154-07092D

Cahier technique de la vulnérabilité du bâti aux
effets thermiques transitoires

INERIS

Cahier technique de la vulnérabilité du bâti aux effets thermiques transitoires

Verneuil en Halatte

Client : Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

- INERIS : F. Antoine, G. Chantelauve, F. Mercier, S. Richomme.
- EFECTIS France et C. Perrot, économiste

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

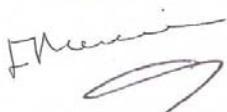
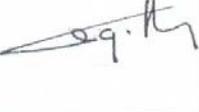
	Rédaction	Relecture	Vérification	Approbation
NOM	F. MERCIER G. CHANTELAUVE	M. REIMERINGER	M. A. KORDEK	B. PIQUETTE
Qualité	Délégué aux Prestations Appui à l'Administration Direction des Risques Accidentels	Ingénieur à l'Unité REST Direction des Risques Accidentels	Appui à l'Administration Direction des Risques Accidentels	Directeur Adjoint Direction des Risques Accidentels
Visa				

TABLE DES MATIÈRES

1	CONTEXTE DE L'ETUDE	11
2	ACRONYMES ET DEFINITIONS	15
3	PRESENTATION DU CAHIER TECHNIQUE	17
3.1	Contexte réglementaire et méthodologique.....	17
3.2	Objet du cahier technique	18
3.3	Limites du cahier technique.....	18
3.4	Approche sommaire de la vulnérabilité	19
3.4.1	Démarche de l'approche sommaire	19
3.4.2	Champ d'application : typologie bâtementaire	19
3.4.3	Champ d'application : caractérisation de l'agression	22
3.4.4	Principaux éléments de l'approche sommaire de la vulnérabilité.....	26
3.4.4.1	Niveaux d'aléas de Fai à F+	26
3.4.4.2	Niveaux d'aléas de F+ à TF+	27
3.4.4.3	Synthèse	27
3.5	Structure du présent document	28
4	CARACTERISATION DE L'AGRESSION.....	31
4.1	Limites.....	31
4.2	Caractérisation recherchée	31
4.3	Données d'entrée et outil	31
4.4	Utilisation.....	31
5	CARACTERISATION DU BATI.....	33
5.1	Etapas de déroulement de la caractérisation	33
5.2	Identification des parties d'ouvrage	33
5.3	Relevé des facteurs de vulnérabilité des parties d'ouvrage	34
5.3.1	Introduction.....	34
5.3.2	Tableaux des relevés terrain	38
5.4	Synthèse des relevés terrain.....	39
6	FINALISATION DE L'APPROCHE SOMMAIRE DE LA VULNERABILITE...41	
6.1	Principes de l'approche sommaire de la vulnérabilité.....	41
6.2	Tableau des principes de l'approche sommaire de la vulnérabilité	41

7 MOYENS DE RENFORCEMENT (HORS ETUDE SPECIFIQUE)	45
7.1 Renforcement des structures vis-à-vis des phénomènes de type boule de feu	45
7.1.1 Cas du bâti non soumis à une onde de surpression	45
7.1.2 Cas du bâti soumis à une onde de surpression	49
7.2 Faces à prendre en compte.....	50
8 ETUDE DE VULNERABILITE APPROFONDIE	53
8.1 Mode d'intervention du bureau d'études spécialisé	53
8.2 Critères	53
8.3 Règles de traitement	54
9 ESTIMATION DU COUT DES SOLUTIONS DE RENFORCEMENT	59
9.1 Films filtrants	59
9.2 Flocage protecteurs.....	59
9.3 Habillage par plaques.....	60
10 REFERENCES	61
11 LISTE DES ANNEXES	63

LISTE DES MODIFICATIONS APPORTEES PAR RAPPORT A LA VERSION ANTERIEURE DU CAHIER TECHNIQUE DE LA VULNERABILITE DU BATI AUX EFFETS THERMIQUES TRANSITOIRES

Page	Paragraphe ou sujet	Modification	Page
version DRA-09-103154-07092A		version DRA-09-103154-07092D	
Tout le document	Verre monolithique	Verre recuit	Tout le document
22	<p><u>Le cas 1</u></p> <p>Le cas 1 pour les structures non métalliques, les structures métalliques porteuses apparentes nues, les bardages métalliques (façade et couverture) et les couvertures (en absence d'effets combinés surpression - thermique) ;</p>	<p><u>Le cas 1</u></p> <p>Le cas 1 pour les structures non métalliques, les structures métalliques porteuses apparentes nues et les couvertures non métallique (en absence d'effets combinés surpression - thermique)</p>	26
22	<p><u>Le cas 1 ou le cas 2</u></p> <p>Des facteurs de vulnérabilité et leurs critères associés permettent de préciser le cas. Il s'agit du type de châssis pour les fenêtres (le cas 2 étant rencontré quelque soit la nature du translucide, verre ou polymère). Il s'agit de la nature de l'isolant et de son mode de fixation pour les couvertures en petits éléments (en cas d'effets combinés). Il s'agit enfin de la combustibilité des éléments non-structuraux (parements, enduit, menuiseries extérieures).</p>	<p><u>Le cas 1 ou le cas 2</u></p> <p>Des facteurs de vulnérabilité et leurs critères associés permettent de préciser le cas. Il s'agit du type de châssis pour les fenêtres (le cas 2 étant rencontré quelque soit la nature du translucide, verre ou polymère). Il s'agit de la nature de l'isolant et de son mode de fixation pour les couvertures en petits éléments (en cas d'effets combinés). Il s'agit également de la combustibilité des éléments non-structuraux (parements, enduit, menuiseries extérieures). Enfin, pour les bardages métalliques, les facteurs de vulnérabilité résultent de la présence ou non d'isolant non combustible en face non exposée.</p>	26
33	<p>Nature de l'isolant (épaisseur, combustibilité) et mode de fixation de l'isolant pour couverture en petits éléments.</p>	<p>Nature de l'isolant (épaisseur, combustibilité) et mode de fixation de l'isolant pour couverture en petits éléments si il y a des effets combinés pression et thermique. Il convient en effet de s'assurer que l'envol de la toiture sous l'effet du souffle d'une explosion ne va pas laisser ses habitants sans protection vis-à-vis du phénomène thermique qui suivrait. La présence d'isolant solidaire avec la charpente n'est indispensable que dans le cas où les combles sont habités et/ou que le plancher de</p>	37

		séparation avec les étages inférieurs est inexistant ou non résistant aux effets de pression.	
34	Relevé Eléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments Tableau Couverture / Toiture - Isolant	Tableau Couverture / Toiture – Isolant - Caractéristiques du comble	39
35 Tableau	<u>Synthèse des relevés terrain – Phénomène de type boule de feu / Eléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments</u> Nature des matériaux Petits éléments : Nature de l'isolant (épaisseur, combustibilité) et mode de fixation	<u>Synthèse des relevés terrain – Phénomène de type boule de feu / Eléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments</u> Nature des matériaux Petits éléments : Nature de l'isolant (épaisseur, combustibilité) et mode de fixation Présence et nature des combles	40
38	Tableau des principes de l'approche sommaire de la vulnérabilité – Phénomène de type boule de feu Eléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments Cas 1 (sans surpression) Cas 2 (si effets combinés avec petits éléments) <ul style="list-style-type: none"> • Isolant combustible • Isolant non solidaire 	Tableau des principes de l'approche sommaire de la vulnérabilité – Phénomène de type boule de feu Eléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments Cas 1 (sans surpression) Si effets combinés avec petits éléments : <ul style="list-style-type: none"> • Cas 1 : si interface entre extérieur et dernier volume habité résistante aux effets de pression et non combustible Cas 2 : sinon.	42
38		Note de bas de page De manière générale, la vulnérabilité d'un bâtiment doit être analysée de manière séparée vis-à-vis de chacun des trois types d'effet. Les différentes prescriptions doivent alors être prises en compte	42
45	1. De s'assurer qu'un isolant est présent derrière les petits éléments pour jouer le rôle d'écran face au rayonnement thermique après leur envol ; 2. Que cet isolant est non combustible et qu'il est fixé à la charpente de manière solidaire.	1. De s'assurer qu'une interface (isolant ou plancher) est présente derrière les petits éléments pour jouer le rôle d'écran face au rayonnement thermique après leur envol ; 2. Que cette interface soit non combustible et qu'elle soit solidaire de la structure. Dans le cas d'un isolant, cela signifie qu'il doit être fixé à la charpente de manière solidaire.	49
45	Les vitrages feuilletés classiques ont une résistance similaire à celle des vitrages monolithiques.	Les vitrages feuilletés classiques ont une résistance similaire à celle des vitrages en verre recuit. Néanmoins,	49

		la présence de films intercalaires leur autorise un comportement élastoplastique sous l'effet d'une onde de pression : les essais réalisés à l'INERIS ont ainsi montré que les vitrages rompaient pour des niveaux de pression, mais que les morceaux étaient maintenus en place par les films. Cela permet aux vitrages en verre feuilleté de rester en place pour des niveaux de pression supérieurs à ceux atteints par les vitrages en verre recuit.	
45	Les éléments légers, de type panneaux en fibrociment ou en translucide, ne résistant pas à la surpression de bris de vitre doivent être remplacés par des éléments plus résistants, dans le respect des autres réglementations (exutoires de désenfumage vis-à-vis de la réglementation incendie, surface ajourée vis-à-vis du code du travail, etc.).	Les éléments légers, de type panneaux en fibrociment ou en translucide, ne résistant pas à la surpression doivent être remplacés par des éléments plus résistants, dans le respect des autres réglementations (exutoires de désenfumage vis-à-vis de la réglementation incendie, surface ajourée vis-à-vis du code du travail, etc.).	50
Annexe – page 1	Du point de vue réglementaire, dans un feu de nuage, les seuils des effets létaux et létaux significatifs sont confondus. Un ouvrage soumis à un feu de nuage se trouve donc dans une zone d'aléa au moins F+. Il correspond donc à des niveaux d'aléas permettant de mettre en œuvre des mesures foncières possibles.	Du point de vue réglementaire, dans un feu de nuage, les seuils des effets létaux et létaux significatifs sont confondus. Le feu de nuage correspond donc à des niveaux d'aléas permettant de mettre en œuvre des mesures foncières possibles (F à TF+).	Annexe – page 1
Annexe page 4	Trois aspects sont à considérer pour les couvertures : 1. La nature de la couverture ; 2. L'isolant dans le cas où la couverture est métallique, de manière analogue avec le traitement préconisé pour les bardages (combustibilité, non combustibilité de l'isolant) ; 3. La nature (épaisseur, combustibilité) et le mode de fixation de l'isolant pour le cas où la couverture en petits éléments pourrait être soumise à des phénomènes combinant surpression et effet thermique.	Plusieurs aspects sont à considérer pour les couvertures : 1. La nature de la couverture ; 2. L'isolant dans le cas où la couverture est métallique, de manière analogue avec le traitement préconisé pour les bardages (combustibilité, non combustibilité de l'isolant) ; 3. La nature (épaisseur, combustibilité) et le mode de fixation de l'isolant pour le cas où la couverture en petits éléments pourrait être soumise à des phénomènes combinant surpression et effet thermique. 4. De manière analogue avec les phénomènes de type boule de feu dans le cas d'effets combinés, la présence d'un comble habité et ou d'un plancher résistant.	Annexe page 4

Annexe page 5	Relevé Eléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments Tableau Couverture / Toiture - Isolant	Relevé Eléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments Tableau Couverture / Toiture – Isolant - Caractéristiques du comble	Annexe page 5
Annexe page 9	1. De s'assurer qu'une interface (isolant ou plancher) est présente derrière les petits éléments pour jouer le rôle d'écran face au rayonnement thermique après leur envol ;	1. De s'assurer qu'une interface (isolant ou plancher de type béton ou hourdis) est présente derrière les petits éléments pour jouer le rôle d'écran face au rayonnement thermique après leur envol ;	Annexe page 9
Annexe page 10	1. De s'assurer qu'un isolant est présent derrière les petits éléments pour jouer le rôle d'écran face au rayonnement thermique après leur envol ; 2. Que cet isolant est non combustible et qu'il est fixé à la charpente de manière solidaire.	1. De s'assurer qu'une interface (isolant ou plancher) est présente derrière les petits éléments pour jouer le rôle d'écran face au rayonnement thermique après leur envol ; 2. Que cette interface soit non combustible et qu'elle soit solidaire de la structure. Dans le cas d'un isolant, cela signifie qu'il doit être fixé à la charpente de manière solidaire.	Annexe page 10

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Principes de réglementation applicable au bâti existant (référence [1]).....	17
Figure 2 : Structure métallique avec structure porteuse apparente (exposée) ©Archiguide Guide Architecture	35
Figure 3 : Type de profilés possibles.....	35
Figure 4 : Exemple de facteur de massiveté d'éléments IPE.....	36
Figure 5 : Mode d'occultation des vitrages tels que définis dans [15].....	48
Figure 6 : Faces à prendre en compte vis-à-vis d'un phénomène de type boule de feu.....	50
Figure 7 : Faces à prendre en compte vis-à-vis d'un phénomène de type boule de feu.....	55
Figure 8 : Faces à prendre en compte vis-à-vis d'un phénomène de type feu de nuage	55
Figure 9 : Modèle thermique pour les éléments opaques	56
Figure 10 : Modèle thermique pour les éléments translucides.....	57
Figure 11 : Bardage simple peau	69
Figure 12 : Exemple de façade translucide	70
Figure 13 : Couverture en fibrociment	70
Figure 14 : Couverture métallique.....	70
Figure 15 : Type de vitrages	75
Figure 16 : Faces à prendre en compte vis-à-vis d'un phénomène de type feu de nuage	76

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Typologie des phénomènes transitoires et mode de prise en compte	25
Tableau 2 : Synthèse des relevés terrain et des principes de l'approche sommaire (©MBe)...	27
Tableau 3 : Synthèse des relevés terrain - Phénomène de type boule de feu	40
Tableau 4 : Tableau des principes de l'approche sommaire de la vulnérabilité - Phénomène de type boule de feu.....	42
Tableau 5 : Tableau des principes de l'approche sommaire de la vulnérabilité - Phénomène de type feu de nuage.....	43
Tableau 6 : Synthèse des relevés terrain - Phénomène de type feu de nuage.....	72
Tableau 7 : Tableau des principes de l'approche sommaire de la vulnérabilité - Phénomène de type feu de nuage.....	73

1 CONTEXTE DE L'ETUDE

La loi "Risques" n°2003-699 du 30 juillet 2003, relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages, a créé une nouvelle approche de maîtrise de l'urbanisation autour des installations à risques soumises à autorisation avec servitudes : les Plans de Préventions des Risques Technologiques (PPRT).

Le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire (MEEDDAT) a mis en ligne, en décembre 2005, un « *Guide méthodologique* » [1] pour l'élaboration des PPRT, qui explique la démarche à suivre. Le PPRT délimite notamment, autour des installations classées concernées, des zones à l'intérieur desquelles des prescriptions peuvent être imposées aux constructions existantes ou futures, dans le but de protéger les personnes.

Dans ce contexte, le MEEDDAT a commandé à plusieurs organismes des compléments techniques pour que les services instructeurs puissent définir simplement la vulnérabilité du bâti aux effets d'agressions thermiques [2], toxiques [3] et de surpression [5, 6].

La société EFECTIS France et le Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE) ont produit le complément technique relatif aux effets thermiques (*Guide de prescriptions techniques pour la résistance du bâti face à un aléa technologique thermique avec pour unique but la protection des personnes*, septembre 2008 [2]). Ce complément a pour objet de proposer des prescriptions techniques de protection du bâti face à un aléa technologique thermique. Il est proposé à travers ce guide de :

- Indiquer la stratégie de renforcement du bâti face à un aléa technologique thermique en fonction du niveau de sécurité choisi ;
- Caractériser les parties d'ouvrages dont la connaissance est nécessaires à évaluer la vulnérabilité ;
- Fournir des exigences constructives pour l'urbanisation future et des prescriptions techniques pour le renforcement du bâti existant en fonction du niveau de l'aléa ;
- Proposer une méthodologie alternative pour la caractérisation et la réduction de la vulnérabilité pour les aléas dont le niveau d'intensité de l'effet thermique est supérieur ou égal à 12 kW/m².

Il faut retenir que la caractérisation du bâti concerne essentiellement les parties d'ouvrages directement exposées aux flux radiatifs thermiques dus à des phénomènes dangereux dits « thermiques stationnaires ». En ce sens, la démarche qui a été proposée est tout à fait cohérente. En revanche, en tant que telle, cette démarche ne peut pratiquement s'appliquer qu'aux phénomènes continus. En effet, comme cela a été souligné dans le document d'analyse de ce complément [6], l'impact des phénomènes « thermiques transitoires » sur les bâtiments, et par voie de conséquence sur leurs occupants, est beaucoup plus faible, à seuil équivalent, que celui des phénomènes continus.

Deux approches distinctes existent effectivement pour estimer les effets liés aux agressions thermiques. Ceci résulte principalement de la prise en compte nécessaire ou non de la durée des phénomènes qui en sont à l'origine, ainsi que de la variabilité dans le temps de leurs flux :

- Dans le cas où la durée du phénomène permet d'atteindre un régime permanent, le calcul des distances d'effets est effectué en termes de densités de flux thermiques, exprimées en kW/m². C'est le cas des phénomènes dits « stationnaires » - notamment feux de nappe, incendies de stockage, feux torches ou feux de solide – objet du complément technique d'EFECTIS France et du LNE.
- La réglementation [8, 9] qualifie de transitoire tout phénomène thermique d'une durée inférieure à deux minutes. Le calcul des distances d'effets pour la vie humaine doit être effectué en termes de doses thermiques, exprimées en [(kW/m²)^{4/3}].s. C'est le cas des phénomènes, de type :
 - Flash fire (ou feu éclair) ;
 - UVCE (ou explosion de gaz) ;
 - BLEVE (ou changement de phase explosif) ;
 - Boule de feu liée à un effet piston ou Boil Over, classique ou en couche mince ;
 - Pressurisation lente de bacs.

Pour ces raisons, le MEEDDAT a demandé à l'INERIS de développer un cahier pour préciser les éléments de caractérisation de la vulnérabilité du bâti aux effets thermiques transitoires.

Cette intervention de l'INERIS s'inscrit dans le cadre de son expertise dans le domaine du risque accidentel puisqu'elle s'appuie sur :

- Le retour d'expérience qu'il a tiré de ses interventions sur sites après des accidents industriels ou assimilés, l'explosion de camions citernes à Montluel (2007) par exemple, ainsi que de ses échanges avec différents partenaires sur le même thème dans le cadre de groupes de travail sur la vulnérabilité des structures à l'incendie ;
- Les études de vulnérabilité qu'il a réalisées, avant que le cadre des investigations complémentaires (approche de la vulnérabilité) des PPRT ne soit mis en œuvre : résistance d'un groupe scolaire vis-à-vis de phénomènes dangereux thermiques, toxiques et de surpression, etc. ;
- Les études de vulnérabilité qu'il a réalisées dans le cadre des investigations complémentaires (approche de la vulnérabilité) des PPRT ;
- La note « *Analyse de l'étude des prescriptions techniques pour la résistance du bâti face à un aléa technologique thermique avec pour unique but la protection des personnes* » [7] ;

- Le document « *Cahier scientifique du cahier technique de la vulnérabilité du bâti aux effets thermiques transitoires* » [10].

Sont à noter également les contributions de :

- EFACTIS France concernant un complément au guide de prescriptions techniques sur la protection du bâti face aux effets thermiques issus de phénomènes dangereux transitoires ;
- Christian PERROT - Economiste de la construction sur la faisabilité et le coût des mesures de renforcement.

2 ACRONYMES ET DEFINITIONS

BLEVE	<p>Boiling Liquid Expanding Vaporization Explosion</p> <p>Un BLEVE correspond à la ruine complète d'un réservoir pressurisé contenant un liquide dont la température est très supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique. C'est un phénomène qui peut associer, dans le cas de fluides inflammables, des effets de pression et des effets thermiques, notamment par suite de la formation d'une boule de feu.</p>
Boil Over	<p>Le 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 en feu. Ce phénomène est à l'origine d'effets purement thermiques, à savoir formation d'une boule de feu et projections enflammées.</p>
Boule de feu	<p>Les phénomènes de type « boule de feu » comprennent les BLEVEs, les Boil Over (classiques, couches minces) et la pressurisation lente de bacs.</p>
Densité de flux thermique ou flux thermique surfacique	<p>Quantité d'énergie par unité de temps et de surface. En kW/m²</p>
Dose thermique	<p>Traduit la densité de flux thermique reçue pendant une certaine durée T. Habituellement employée pour les personnes, la dose thermique est employée pour les enjeux dans le présent document. Elle s'exprime comme :</p> $DT = \int_{t=0}^T [\phi(t)]^{\frac{4}{3}} \cdot dt \text{ en } (kW/m^2)^{\frac{4}{3}} \cdot s$
ERP	<p>Etablissement Recevant du Public</p>
Facteur de massiveté	<p>Ce terme est codifié pour les matériaux métalliques (acier et aluminium) dans les Eurocodes. Il s'agit d'un facteur traduisant la capacité d'échauffement d'un élément de structure soumis à un feu. Il s'exprime comme le rapport entre la surface exposée au feu et le volume de l'élément. En pratique, on considère un élément de longueur unitaire et le facteur de massiveté s'écrit comme le rapport du périmètre sur la section du profilé. Plus le facteur de massiveté est important, à flux thermique égal, plus sa vitesse de montée en température est importante. En m⁻¹.</p>

Flash fire ou feu éclair	Combustion « lente » d'un nuage de vapeurs inflammables. Le principal effet de ce phénomène dangereux est thermique, les effets de pression associés étant négligeables.
Feu de nuage	Les phénomènes de type « feu de nuage » sont les flash fire et les UVCEs.
GI	Gaz Inflammable
GLI	Gaz Liquéfié Inflammable
LI	Liquide Inflammable
LII	Limite Inférieure d'Inflammabilité
PhD continu / stationnaire	Phénomène dangereux dont la durée des effets thermiques excède deux minutes
PhD transitoire	Phénomène dangereux dont la durée des effets thermiques est inférieure deux minutes
Pressurisation lente de bac	Ce phénomène se caractérise par une montée en pression lente, du fait de la vaporisation du produit contenu dans un réservoir pris dans un feu enveloppant. La pression atteinte par le gaz peut alors être importante et lorsque l'enveloppe du réservoir cède, des effets thermiques sont produits : une boule de feu liée à une vaporisation partielle instantanée et une inflammation des produits peut être générée.
UVCE	Unconfined Vapour Cloud Explosion. Explosion d'un nuage de gaz/vapeurs non confiné. Il s'agit d'un phénomène qui suppose l'inflammation accidentelle d'un nuage ou panache de gaz/vapeurs combustibles mélangés avec l'oxygène de l'air. Suite à l'inflammation, une flamme se propage dans le nuage ou panache et engendre une combustion des vapeurs et une onde de surpression aérienne, qui sont susceptibles de produire respectivement des effets de rayonnement thermique et des effets mécaniques.

3 PRESENTATION DU CAHIER TECHNIQUE

3.1 CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET METHODOLOGIQUE

La loi du 30 juillet 2003 [11] a créé les Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT). A l'intérieur du périmètre d'exposition aux risques, le PPRT peut « *prescrire les mesures de protection des populations face aux risques encourus, relatives à l'aménagement, l'utilisation ou l'exploitation des constructions, des ouvrages, des installations et des voies de communication existant à la date d'approbation du plan, qui doivent être prises par les propriétaires, exploitants et utilisateurs dans les délais que le plan détermine.* » (Art L515-16-IV du Code de l'Environnement).

L'article IV du décret PPRT [12] précise que ces travaux de protection « *ne peuvent porter que sur des aménagements dont le coût n'excède pas 10% de la valeur vénale du bien...* ».

Le guide PPRT [1] précise les principes de réglementation relative aux mesures physiques sur le bâti existant :

	Niveaux d'aléas	TF+	TF	F+	F	M+	M	Fai
Mesures physiques sur le bâti existant	Effet toxique	Prescriptions TF+ et TF : confinement obligatoire des locaux d'activités tolérés (rappel : habitations expropriées). F+ et F : confinement obligatoire pour les établissements sensibles et les ERP. Confinement obligatoire selon des critères simples pour les locaux d'activités et les habitations.				Prescriptions Confinement des établissements sensibles et des ERP à adapter au contexte local. Confinement des locaux d'activités. Recommandations Confinement des habitations des particuliers.		Recommandations
	Effet thermique	Prescriptions Mesures de protection contre l'effet thermique obligatoires, même si ces mesures techniques ne permettent de faire face qu'à un aléa moins important Identification obligatoire d'une zone de mise à l'abri dans chaque bâtiment				Prescriptions Identification d'une zone de mise à l'abri obligatoire dans chaque bâtiment résidentiel et à enjeux importants.		Recommandations
	Effets de surpression	Prescriptions Mesures de renforcement des structures du bâti obligatoires, même si ces mesures techniques permettent de faire face uniquement à un aléa moins important.				Prescriptions Mesures de renforcement des structures du bâti obligatoires.		Recommandations de renforcement des vitrages

Figure 1 : Principes de réglementation applicable au bâti existant (référence [1])

Ce guide méthodologique prévoit des investigations complémentaires de deux types : approche de la vulnérabilité et estimation de la valeur des biens immobiliers, dont l'objectif est « *d'apporter des éléments complémentaires de*

réflexion permettant aux différents acteurs du PPRT de mieux adapter le projet de réponse réglementaire».

Selon le guide, les investigations complémentaires de type « approche de la vulnérabilité » « *doivent permettre de déterminer si des mesures peuvent réduire la vulnérabilité des personnes au travers d'un renforcement des bâtis* ». L'objet de ces investigations est notamment d'apprécier l'état général des bâtiments et la possibilité de cibler les mesures techniques adaptées. Il est précisé que l'approche développée « *ne s'apparente en aucune manière à une expertise du bâti qui, pour être menée, nécessiterait une analyse fine de chaque construction. Les investigations menées restent nécessairement à un niveau d'approche globale* ».

3.2 OBJET DU CAHIER TECHNIQUE

Le présent cahier technique s'inscrit dans cette démarche d'approche de la vulnérabilité. Son application doit permettre :

- De préciser si des mesures de renforcement pouvant réduire la vulnérabilité sont nécessaires et possibles techniquement et économiquement ;
- Une réalisation pratique simple à deux niveaux :
 - Un niveau d'approche sommaire et une première étape, réalisable par les services instructeurs, d'évaluation de la nécessité de renforcement des bâtis et éventuellement de définition d'un programme de diagnostics à mener ;
 - Un niveau d'approche détaillé et une seconde étape, le cas échéant, de réalisation de diagnostics ciblés par des bureaux d'études.

Ce cahier propose ainsi différents principes quant à l'approche de vulnérabilité adéquate. Il contient également des propositions techniques de stratégies de protection et des estimations économiques des solutions de renforcement. Les données économiques permettent de disposer d'une indication sur le coût global du renforcement envisageable et déterminer si les investissements nécessaires sont à la hauteur des 10% de la valeur vénale du bien.

3.3 LIMITES DU CAHIER TECHNIQUE

Le cahier technique ne répond pas à toutes les difficultés techniques qui peuvent être rencontrées sur le terrain. Ces limites et incertitudes sont précisées au sein du document.

Du point de vue des caractéristiques du bâti, les catégories structurelles des constructions retenues sont celles rencontrées le plus fréquemment. Elles ne couvrent donc pas l'ensemble des cas qui pourraient être rencontrés. Le document renvoie donc à des études spécifiques pour les cas non prévus.

La vulnérabilité du bâti a été estimée au moyen de la modélisation des phénomènes dangereux telle que préconisée par la réglementation et en l'état des connaissances actuelles au moment de la rédaction du cahier. Une amélioration de ces modèles pourrait éventuellement conduire à des résultats différents.

Concernant les estimations économiques, les données sont à considérer uniquement comme des ordres de grandeurs.

Enfin, la liste des propositions de mesures techniques n'est pas exhaustive et leur mise en œuvre nécessite l'intervention d'une maîtrise d'œuvre spécifique.

3.4 APPROCHE SOMMAIRE DE LA VULNERABILITE

3.4.1 DEMARCHE DE L'APPROCHE SOMMAIRE

Le présent cahier technique vise à proposer aux services instructeurs une méthode d'approche sommaire de la vulnérabilité du bâti aux effets thermiques transitoires permettant de déterminer la capacité des constructions à protéger ou non les personnes. Elle permet de ranger le bâti analysé dans une des quatre classes suivantes :

- **Cas 1.** La protection des personnes ne nécessite pas de travaux de renforcement ;
- **Cas 2.** La protection des personnes peut être obtenue par la réalisation de travaux ne nécessitant pas d'étude préalable ;
- **Cas 3.** La protection des personnes peut être obtenue par la réalisation de travaux nécessitant au préalable un diagnostic « sommaire » par un bureau d'études généraliste ;
- **Cas 4.** La protection des personnes nécessite la réalisation d'une étude de vulnérabilité approfondie par un bureau d'études spécialisé afin de définir la faisabilité et les mesures de renforcement possibles.

Ces principes sont mis en œuvre en fonction du type bâtementaire et des zones d'intensité. Le détail de ces principes fait l'objet du **chapitre 6** du présent cahier.

Cette approche sommaire de la vulnérabilité nécessite la conduite de relevés terrain. La nécessité et le niveau de détail des relevés dépendent des niveaux d'intensité rencontrés et du type de bâti. Ces relevés sont basés sur des observations non-destructives des bâtiments permettant l'identification de facteurs de vulnérabilité architecturaux et structuraux.

Par ailleurs, le cahier technique fournit également des éléments relatifs à l'intervention de bureaux d'études « structures » généralistes ou de bureaux d'études spécialisés. Ces données seront utiles à la suite de l'approche sommaire de la vulnérabilité :

- Pour les services instructeurs et les propriétaires d'ouvrage dans le cadre de l'élaboration de cahiers des charges techniques en vue de la réalisation de diagnostics ;
- Pour les bureaux d'études afin de dimensionner leur action et de mettre en œuvre des moyens adaptés.

3.4.2 CHAMP D'APPLICATION : TYPOLOGIE BATIMENTAIRE

La mise en œuvre de la classification (Cas 1, 2, 3 ou 4) de l'approche sommaire de la vulnérabilité nécessite de caractériser le bâtiment étudié. Les principaux points de cette caractérisation sont les éléments constitutifs de l'enveloppe du

bâtiment. La classification proposée dans le présent cahier repose sur la typologie bâtiminaire suivante :

- **Structures non métalliques**

Il s'agit de structures dont les façades sont essentiellement constituées de matériaux opaques peu conductifs, c'est-à-dire d'une conductivité similaire à celle du béton. Dans le cahier technique LNE / EFECTIS France, ces façades sont qualifiées de « façades opaques lourdes ».

Ces façades sont soit autoportantes, soit de remplissage, mais avec une structure porteuse non apparente (par exemple mixtes acier-béton au sens de l'Eurocode 4 [12]) ou déjà traitée contre une agression thermique.

Les matériaux constitutifs de ces façades peuvent ainsi être :

- Tous types de bétons courants dans le domaine de la construction¹ ;
- Maçonneries au sens de l'Eurocode 6 partie 1-1 [14] : éléments de terre cuite, de silico-calcaire, en béton (de granulats courants ou légers), en béton cellulaire, en pierre manufacturée ou naturelle, en pierre de taille et moellons équarris ;
- Tous types de terres et de torchis (avec paille non apparente) ;

Le cas particulier des façades coupe-feu d'ERP est également abordé dans cette partie².

- **Structures métalliques**

Ce volet concerne tous les bâtiments disposant :

- Soit d'une ossature métallique apparente nue. Il s'agit des structures porteuses (poteaux ou poutres) non enrobées ou non protégées par un caisson, dans le cas où elles sont apparentes vis-à-vis du phénomène agresseur ;
- Soit de façades ou couverture en bardages ou panneaux métalliques rapportés, qualifiées de « façades opaques légères » dans le cahier LNE / EFECTIS France.

- **Structures translucides**

Ce volet concerne tous les aspects liés :

- Aux vitrages et à leur châssis qu'ils forment partie d'une fenêtre ou d'une porte vitrée ;

¹ Les bétons particuliers de type béton haute performance (BHP) ou béton fibré ne sont pas visés par le présent cahier : ils font en effet déjà l'objet d'études particulières de comportement à l'incendie.

² Compte tenu de leur caractéristique coupe feu, les parois sont supposées résister aux agressions thermiques, de la même manière que le béton. Toutefois, en cas d'effet combinés, il conviendra de vérifier leur résistance aux effets de surpression.

- Aux éléments et façades transparentes, qu'ils soient en verre ou en matériaux polymères de type combustibles transparents (polycarbonate, polypropylène, PMMA, etc.).
 - En raison de leur inclinaison qui les rend particulièrement sensibles, les puits de lumière réalisés en verre doivent l'objet d'une étude spécifique.
- **Eléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments**
 Dans cette partie, les couvertures peuvent être :
 - Classiques : tuiles, ardoises et autres petits éléments non combustibles ;
 - Des dalles de béton (toitures terrasses) ;
 - Des toitures végétalisées avec support non combustible (béton armé) ;
 - Des tôles métalliques ou en fibrociment.

Pour les couvertures métalliques, leur traitement est similaire à celui des bardages et des panneaux métalliques (façades opaques légères).

Le cas des toitures en chaume ou en autre matériau combustible n'est pas traité ici et nécessite une étude spécifique (étude de vulnérabilité approfondie par un bureau d'études, cas 4).
 - **Eléments non-structuraux : parements, enduit et menuiseries extérieures**
 Dans cette partie, les éléments suivants sont étudiés en termes d'isolant thermique et de réaction au feu :
 - Les parements ;
 - Tous les types habituels d'enduit extérieurs ;
 - Les menuiseries extérieures (hors châssis traités dans le type des structures translucides) : porte non translucide, occultant et contrevent (volet, store, etc.).

- **Structures particulières**

Ce volet concerne l'ensemble des structures qui ne correspondent pas aux types précédemment définis (structures non-métalliques, structures métalliques, structures translucides). Elles nécessitent une étude spécifique (étude de vulnérabilité approfondie par un bureau d'études). Il s'agit notamment des structures suivantes :

- Les puits de lumières réalisés en verre ;
- Les bâtiments en bois ;
- Les bâtiments à structure porteuse apparente en bois.

Toutefois, pour ces deux derniers types de bâtiment, l'attention des services instructeurs est attirée sur le fait que les techniques modernes³ de mise en œuvre du matériau lui permettent souvent de résister favorablement à des conditions d'incendie.

3.4.3 CHAMP D'APPLICATION : CARACTERISATION DE L'AGRESSION

- **Éléments sur le flux thermique radiatif**

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 [9], retient les valeurs suivantes pour les effets sur l'homme :

- 3 kW/m² ou 600 [(kW/m²)^{4/3}].s, seuil des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine » ;
- 5 kW/m² ou 1 000 [(kW/m²)^{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/m² ou 1 800 [(kW/m²)^{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.

Pour des expositions qui perdurent (temps supérieur à deux minutes), les seuils d'effets ne dépendent pratiquement plus du temps. On se réfère alors aux seuils des effets thermiques en termes de densité de flux thermique.

Lors d'un phénomène dangereux transitoire (**temps inférieur à deux minutes**), le calcul de la dose thermique D se fait en intégrant la densité de flux thermique à chaque pas de temps, soit :

$$DT = \int_{t=0}^T [\phi(t)]^4 \cdot dt$$

³ L'âge du bâti et les techniques constructives sont alors à considérer avec attention.

Dans le cadre du présent cahier, la vulnérabilité des structures sera analysée sur la base des seuils qui viennent d'être exposés. L'impact de doses thermiques appliquées sur une structure se fait en employant un modèle thermique classique tel que décrit au chapitre 8. Le calcul est réalisé en prenant en compte la variation de la densité de flux thermique à chaque pas de temps.

- **Typologie de phénomènes et mode de prise en compte**

Les phénomènes considérés dans cette étude sont de deux types :

- **Boule de feu** dans le cas des BLEVEs, des Boil Over (classiques, couches minces) et de la pressurisation lente de bacs ;
- **Feu de nuage** dans le cas des feux éclairs et des explosions non confinées (UVCE)⁴. En l'absence d'effets de pression, les dommages dus aux effets thermiques hors du nuage, tant aux structures qu'aux êtres humains sont extrêmement limités. C'est ce que traduisent les valeurs de seuils retenus dimensionnés non par la dose, mais par la distance à la Limite Inférieure d'Inflammabilité (LII) [15] :
 - Distance au seuil des effets létaux significatifs (SELS) = distance à la LII ;
 - Distance au seuil des effets létaux (SEL) = distance à la LII ;
 - Distance au seuil des effets irréversibles (SEI) = 1,1 x distance à la LII.

La létalité de l'homme intervient principalement par brûlures internes.

Le Tableau 1 suivant dresse un panorama des phénomènes dangereux considérés en fonction des produits, avec, en regard, les limites de capacité considérées dans la présente étude.

Tout produit pouvant être à l'origine d'un ou de plusieurs des phénomènes recensés dans le Tableau 1, mais ne figurant pas dans la liste des produits visés devra faire l'objet d'une modélisation spécifique.

Les limites sont basées sur la durée maximale de deux minutes qui peut être atteinte par le phénomène. Au-delà, en effet, le phénomène ne répond plus aux critères fixés pour l'établissement des doses thermiques. Une étude spécifique (Cas 4) devra alors être envisagée pour de tels phénomènes particuliers.

⁴ Il s'agit dans les deux cas de la combustion d'un mélange inflammable. Cependant, dans le premier cas, le mélange ne se trouvant pas dans le domaine d'explosivité, sa combustion ne produit pas d'effet de pression, à la différence de ce qui est observé dans le cas des UVCEs.

- **Effets combinés**

Lorsque des phénomènes dangereux mettent en œuvre des effets combinés (surpression / thermique) tels que les BLEVEs et les UVCEs, les solutions proposées ci-après n'ont pris en compte que de manière qualitative les effets de la surpression. Le lecteur souhaitant les prendre en compte de manière explicite est invité à baser sa réflexion sur une utilisation combinée des cahiers pratiques de vulnérabilité aux effets thermiques et à ceux de surpression ([5]).

Ce document fait néanmoins une distinction entre les effets uniquement thermiques et les effets combinant une onde de surpression suivie par des effets thermiques.

PhD	Produits visés	Référence MEEDDAT	Suppression	Limites (quantités)
Phénomènes de type boule de feu				
BLEVE	GLI : <ul style="list-style-type: none"> Butane, butènes, butadiènes, chlorure de méthyle, chlorure d'éthyle et CVM Propane, propylène 	Circulaire du 23/07/2007	Oui. Effets de suppression de portée inférieure aux effets thermiques.	5000 m ³ La limite fixée à 5000 m ³ correspond aux volumes les plus importants rencontrés en France, mais ne constitue pas une limite pour ce qui est du calcul de la dose thermique.
Boil classique Over	<ul style="list-style-type: none"> Fiouls lourds Fiouls lourds réchauffés Bruts Produits présentant des caractéristiques similaires 	Circulaire du 23/07/2007 Formule : IT89	Non.	<ul style="list-style-type: none"> Bruts lourd et léger : 200 000 m³ FO2 : 115 000 m³
Boil Over Couche Mince	<ul style="list-style-type: none"> Gazole FOD Jet A-1 	Circulaire du 23/07/2007	Non.	A priori, la limite de 2 minutes n'est jamais rencontrée dans les installations actuelles.
Pressurisation lente de bac	Tous les LI dans des bacs non munis d'évents correctement dimensionnés	Circulaire du 23/07/2007 : LI Formule : BO IT89	Non.	A priori, la limite de 2 minutes n'est jamais rencontrée dans les installations actuelles.
Phénomènes de type feu de nuage				
UVCE/Flash fire	GI : Alcanes/Paraffines (méthane, éthane, propane, butane), Naphtènes/Cyclo-alcanes (cyclopropane, cyclobutane), Alcènes/Oléfines (méthane, éthène, propène, butène), Diène/Dioléfines (butadiène). LI donnant des vapeurs après épandage : Alcanes/Paraffines (pentane, hexane, heptane... dodécane), Naphtènes/Cyclo-alcanes (cyclopentane, cyclohexane...), Alcènes/Oléfines (pentène, hexène, heptène...dodécène), Diène/Dioléfines (pentadiène), Aromatiques (benzène, toluène, xylènes), Alcools, éthers, Essences, kérosènes, jets.	Circulaire du 23/07/2007 Annexes II et III : UVCE LI	Non dans le cas du flash fire. Oui dans le cas de l'UVCE : Effets de suppression de portée supérieure aux effets thermiques.	Pas de limite raisonnable.

Tableau 1 : Typologie des phénomènes transitoires et mode de prise en compte

3.4.4 PRINCIPAUX ELEMENTS DE L'APPROCHE SOMMAIRE DE LA VULNERABILITE

Les principes de l'approche sommaire de la vulnérabilité sont mis en œuvre en fonction du type bâtementaire et de la caractérisation de l'agression. L'approche sommaire permet de distinguer de manière générique 4 cas. Dans le cadre spécifique de ce cahier technique, les cas 1, 2 et 4 sont rencontrés.

3.4.4.1 NIVEAUX D'ALEAS DE FAI A F+

Dans les zones d'intensité des phénomènes de type :

- boule de feu en deçà du seuil des effets létaux significatifs
- des phénomènes de type feu de nuage en deçà du seuil des effets létaux,

l'approche sommaire relative aux phénomènes thermiques transitoires permet de distinguer spécifiquement 2 cas⁵ :

- **Cas 1.** La protection des personnes ne nécessite pas de travaux de renforcement ;
- **Cas 2.** La protection des personnes peut être obtenue par la réalisation de travaux ne nécessitant pas d'étude préalable.

Ces cas 1 et 2 sont fonction de la caractéristique bâtementaire et de ses facteurs de vulnérabilité associés. Dans les zones d'intensité définies considérées (relatives à des niveaux d'aléas de Fai à F+), sont rencontrés :

- **Pour les phénomènes de type boule de feu**

- **Le cas 1** pour les structures non métalliques, les structures métalliques porteuses apparentes nues⁶, et les couvertures⁷ (en absence d'effets combinés surpression - thermique) ;
- **Le cas 1 ou le cas 2** pour les structures translucides et les couvertures (pour les petits éléments en cas d'effets combinés surpression – thermique), les bardages métalliques (façade et couverture), ainsi que pour les éléments non-structuraux (parements, enduit, menuiseries extérieures).

Des facteurs de vulnérabilité et leurs critères associés permettent de préciser le cas. Il s'agit du type de châssis pour les fenêtres (le cas 2 étant rencontré quelque soit la nature du translucide, verre ou polymère). Il s'agit de la nature de l'isolant et de son mode de fixation pour les couvertures en petits éléments (en cas d'effets combinés). Il s'agit également de la combustibilité des éléments non-structuraux (parements, enduit, menuiseries extérieures). Enfin, pour les bardages métalliques, les facteurs de vulnérabilité résultent de la présence ou non d'isolant non combustible en face non exposée.

⁵ Hors structures particulières nécessitant une étude spécifique (cas 4).

⁶ Hors éléments constitués de petits profilés, comme, par exemple, des racks définis par un facteur de massiveté supérieur à 1500m^{-1} nécessitant une étude spécifique (cas 4).

⁷ Hors couverture en matériau combustible de type chaume nécessitant une étude spécifique (cas 4).

- **Pour les phénomènes de type feu de nuage**
 - **Le cas 1** pour l'ensemble des types bâtimentaires définis dans ce cahier.

Le lecteur pourra par conséquent retenir dès à présent que, en dehors des zones d'intensité supérieure au seuil des effets létaux significatif, la réalisation de travaux concernera potentiellement les structures translucides (châssis et verre-polymère) et les couvertures (en cas d'effets combinés). La nécessité de ces travaux repose principalement sur le relevé d'un nombre de facteurs de vulnérabilité limité.

3.4.4.2 NIVEAUX D'ALEAS DE F+ A TF+

Pour les niveaux d'aléa les plus élevés (TF+, TF, F+) relatifs au seuil des effets létaux significatifs, il est proposé à travers ce cahier :

- **Pour les phénomènes de type boule de feu**, la nécessité de recourir à une étude spécifique (Cas 4) ou de vérifier que le bâti existant ou des moyens de protection permettent de faire face à une intensité moins importante ;
- **Pour les phénomènes de type feu de nuage**, une annexe⁸ permet de réaliser les relevés terrain si une approche de la vulnérabilité s'avère nécessaire.

3.4.4.3 SYNTHÈSE

Le tableau suivant résume la nécessité de visite terrain et les cas rencontrés en fonction des intensités des phénomènes de type boule de feu et feu de nuage.

	SEI	SEL	SELS
Boule de feu	Relevé terrain (Tableau 3 : Synthèse des relevés terrain – Phénomène de type boule de feu) Cas 1, 2 ou 4 (Tableau 4 : Tableau des principes de l'approche sommaire de la vulnérabilité – Phénomène de type boule de feu)		Cas 4 Cas 1 ou 2 [Intensité inférieure]
Feu de nuage	Cas 1	(Annexe 1 - Le bâti soumis à un feu de nuage au Seuil des Effets Létaux)	

Tableau 2 : Synthèse des relevés terrain et des principes de l'approche sommaire (©MBe)

⁸ Pour l'ensemble du bâti, il convient de contrôler en premier lieu la perméabilité de la structure. Ce contrôle, réalisé de manière intuitive et visuelle, permet de s'assurer que les gaz pouvant générer un feu de nuage ne peuvent pénétrer facilement dans le bâti avant son inflammation. Si cette condition n'est pas respectée, toute mesure de renforcement du bâti vis-à-vis d'une agression extérieure est inutile, le nuage pouvant s'enflammer à l'intérieur du bâtiment.

- **Cas 1.** La protection des personnes ne nécessite pas de travaux de renforcement ;
- **Cas 2.** La protection des personnes peut être obtenue par la réalisation de travaux ne nécessitant pas d'étude préalable ;
- **Cas 4.** La protection des personnes nécessite la réalisation d'une étude de vulnérabilité approfondie par un bureau d'études spécialisé afin de définir la faisabilité et les mesures de renforcement possibles.

3.5 STRUCTURE DU PRESENT DOCUMENT

Ce document s'articule autour des parties suivantes. Elles sont présentées selon la chronologie d'une investigation complémentaire de type étude de vulnérabilité.

- **Caractérisation de l'agression [Chapitre 4]**

Cette caractérisation consiste à produire deux cartographies des enveloppes d'intensité :

- La cartographie relative aux phénomènes de type boule de feu ;
- La cartographie relative aux phénomènes de type feu de nuage.

- **Caractérisation du bâti [Chapitre 5]**

Cette partie présente l'approche à réaliser en matière :

- D'identification du type bâtementaire ;
- De relevés terrain ciblés de facteurs de vulnérabilité de certaines caractéristiques des bâtiments.

- **Finalisation de l'approche sommaire de la vulnérabilité [Chapitre 6]**

Cette phase constitue le cœur de l'approche sommaire de la vulnérabilité au sens où elle présente les principes de l'approche, en fonction de la typologie bâtementaire et de la caractérisation de l'agression, permettant d'évaluer la capacité d'un bâti à protéger les personnes et les suites éventuelles à donner. Cette action vise à préciser la capacité des bâtis à protéger les personnes et, éventuellement, à définir un programme de diagnostics complémentaires.

La formalisation de ces choix s'appuie sur un tableau des principes de l'approche de la vulnérabilité à partir du croisement des caractéristiques bâtementaires et des caractéristiques de l'agression.

Cette étape finalise l'approche sommaire de la vulnérabilité.

- **Moyens de renforcement (hors étude spécifique) [Chapitre 7]**

Ce chapitre fournit des éléments nécessaires pour l'établissement des moyens de renforcement direct ou par des bureaux d'études.

- **Etude de vulnérabilité approfondie [Chapitre 8]**

Ce chapitre fournit les éléments permettant l'établissement des études de vulnérabilité approfondies dans le cas où les limites de l'approche sommaire de vulnérabilité sont atteintes.

- **Estimation du coût des moyens de renforcement [Chapitre 9]**

Ce chapitre propose des estimations du coût de certaines des mesures de renforcement possibles en support des chapitres 7 et 8.

4 CARACTERISATION DE L'AGRESSION

4.1 LIMITES

Il est rappelé ici que la limite fixée à l'agression est celle liée à sa durée qui doit impérativement être inférieure à deux minutes.

La signification de cette limite en termes de volumes de stockage est à rechercher pour chacun des phénomènes dans le Tableau 1.

4.2 CARACTERISATION RECHERCHEE

Afin de pouvoir déterminer la capacité du bâti à protéger les personnes au regard des phénomènes thermiques transitoires, il s'agit de caractériser les zones d'intensité en terme de seuils de doses thermiques selon :

- **Les phénomènes dangereux produisant des boules de feu** (BLEVE, Boil Over, Boil Over couche mince, pressurisation lente) ;
- **Les phénomènes de type feu de nuage** produits par des phénomènes dangereux de type feu éclair ou explosion de gaz (UVCE).

4.3 DONNEES D'ENTREE ET OUTIL

Ce travail débute à l'issue de la caractérisation des aléas et sur la base d'informations de l'étude de dangers pour caractériser les phénomènes dangereux à l'aide d'un module dédié sous SIGALEA.

Afin de pouvoir utiliser ce module dédié, il est préalablement nécessaire de renseigner la colonne "commentaires" des fichiers Excel de phénomènes dangereux utilisés avec les mots clés (habituellement rencontrés) suivants :

- **Pour les phénomènes de type boule de feu** : BLEVE, Boil Over, Pressurisation lente, Boil Over en couche mince ;
- **Pour les phénomènes de type feu de nuage** : Flash Fire, UVCE, VCE, Feu de nuage.

Sur la base des mots clefs correctement renseignés, SIGALEA produit les cartes d'intensité pour chacun des types de phénomènes thermiques transitoires (boule de feu, feu de nuage). Il produit également la durée des phénomènes de type feu de nuage.

4.4 UTILISATION

Les cartes résultant de l'étude réalisée sous SIGALEA servent de base à :

- La caractérisation des bâtis [**Chapitre 5 – Caractérisation du bâti**] ;
- La mise en œuvre du tableau des principes de l'approche sommaire de la vulnérabilité [**Chapitre 6**].

5 CARACTERISATION DU BATI

L'approche préconisée dans le présent document reprend celle préconisée par LNE / EFECTIS France dans le complément technique relatif à la vulnérabilité aux effets thermiques : « *elle s'appuie sur un relevé terrain qui pourra être réalisé par un technicien du bâtiment avec une identification visuelle sans sondage destructif possible, ainsi qu'avec un accès restrictif et aléatoire des bâtiments étudiés. L'appréciation ne pourra alors être valablement fondée que sur une partie d'empirisme et de connaissance du domaine de la construction.* ».

Le croisement ultérieur **[Chapitre 6]** avec les informations relatives aux phénomènes dangereux permettra de déterminer la capacité à protéger les personnes et les suites éventuelles à donner à l'approche sommaire de la vulnérabilité.

5.1 ÉTAPES DE DEROULEMENT DE LA CARACTERISATION

Ce travail débute à l'issue de l'analyse des enjeux et en connaissance de zones précises dans lesquelles les visites terrain complémentaires seront menées. Pour les effets thermiques transitoires, elles dépendent de :

- **L'intensité pour les phénomènes de type « boule de feu » ;**
- **La limite inférieure d'inflammabilité pour les phénomènes de type « feu de nuage ».**

Les cartographies pour les relevés terrain sont fournies par l'Inspection des Installations Classées.

Afin de pouvoir déterminer la capacité du bâti à protéger les personnes au regard des phénomènes thermiques transitoires, la caractérisation du bâti par des relevés terrain devra permettre de classer l'enveloppe extérieure du bâtiment selon les familles de parties d'ouvrage et d'évaluer des facteurs de vulnérabilité. Elle est développée suivant deux étapes :

- **Une étape d'identification des parties d'ouvrage ;**
- **Une étape de relevé des facteurs de vulnérabilité** pour certaines parties d'ouvrage dans les zones définies par les doses de 600 à 1800 (kW/m²)^{4/3}.s pour les phénomènes de type boule de feu.

Les informations récoltées lors de ces deux étapes sont synthétisées dans le Tableau 3 en fin de chapitre.

5.2 IDENTIFICATION DES PARTIES D'OUVRAGE

Cette identification passe par la reconnaissance de la partie d'ouvrage étudiée en fonction de la typologie bâimentaire.

Les parties d'ouvrages sont classées en famille comme suit :

- **Structures non métalliques ;**
- **Structures métalliques ;**
- **Structures translucides ;**
- **Éléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments ;**
- **Éléments non-structuraux : parements, enduit et menuiseries extérieures ;**
- **Structures particulières.**

La description précise de chacune de ces parties d'ouvrage est donnée au paragraphe 3.4.2. Dans la caractérisation, il conviendra d'identifier et d'assurer la traçabilité de l'ensemble des types de structures rencontrées.

5.3 RELEVÉ DES FACTEURS DE VULNÉRABILITÉ DES PARTIES D'OUVRAGE

5.3.1 INTRODUCTION

Les facteurs de vulnérabilité, permettant de déterminer la capacité d'un bâti à protéger les personnes dans les zones de 600 à 1800 (kW/m²)^{4/3}.s pour les phénomènes de type boule de feu, sont présentés pour chacune des parties d'ouvrages :

- **Structures non métalliques**
 - Néant.

- **Structures métalliques porteuses apparentes**



*Figure 2 : Structure métallique avec structure porteuse apparente (exposée)
©Archiguide Guide Architecture*

- Facteur de massivité des éléments porteurs apparents.
Ce point concerne les structures porteuses (poteaux ou poutres) dans le cas où elles sont apparentes vis-à-vis du phénomène agresseur. Les structures porteuses peuvent être nues, remplies, enrobées de béton ou protégées par un caisson (voir Figure 3). Les profilés remplis, enrobés ou en caisson ont un bon comportement au feu.

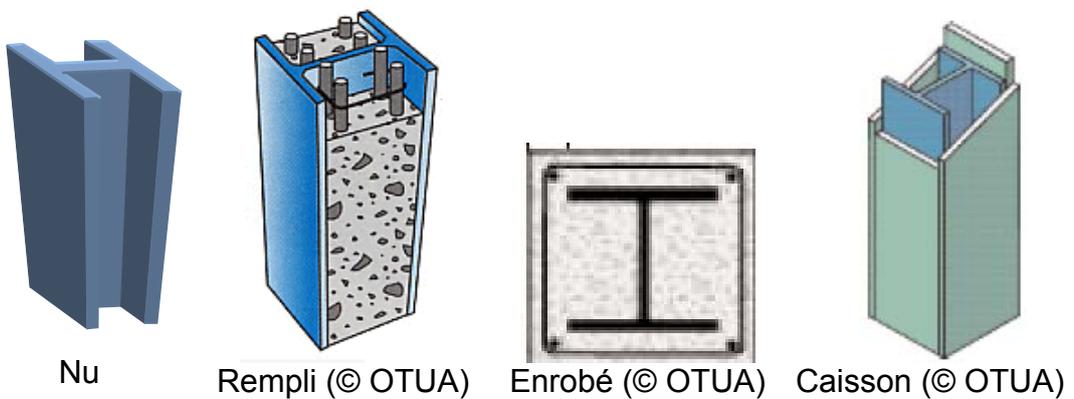


Figure 3 : Type de profils possibles

Leur caractérisation vis-à-vis de l'agression thermique se fait en employant le concept de facteur de massivété, calculé par le quotient du périmètre par l'aire de la section. Le facteur de massivété traduit la capacité d'échauffement d'un profilé par sa surface d'échange avec le phénomène thermique.

Cette donnée peut également s'acquérir en connaissant le type de poteau via des abaques habituellement disponibles auprès du fournisseur (voir la Figure 4 pour un IPE).

Pour des profilés standards (IPE, HE, IPN, HL, HD, HP, UPE, UPN, UB, U, W...), la valeur du facteur de massivété est quasiment toujours inférieure à 500, le plus souvent de l'ordre de la centaine.

A titre d'exemple, les abaques des constructeurs de profilés donnent les facteurs de massivété de ces derniers comme sur la Figure 4. Sur cette figure, les profilés sont de type IPE. Les facteurs de massivété communiqués sont, de gauche à droite :

1. Un élément enrobé soumis à la flamme sur trois côtés (rappelons que la notion de facteur de massivété est associée à l'incendie).
2. Un élément enrobé soumis à la flamme sur tous ses côtés ;
3. Un élément protégé par un caisson soumis à la flamme sur trois côtés ;
4. Un élément protégé par un caisson soumis à la flamme sur quatre côtés.

Les deux cas qui intéressent ce cahier sont les deux premières colonnes pour lesquels le facteur de massivété est le même que celui de l'élément nu.

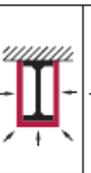
IPE				
IPE 80 A	437	509	317	389
IPE 80	369	429	270	330
IPE A 100	389	452	286	349
IPE 100	334	387	247	300
IPE A 120	370	428	271	329
IPE 120	311	360	230	279
IPE A 140	354	409	260	314
IPE 140	291	335	215	259
IPE A 160	332	382	245	295
IPE 160	269	310	200	241

Figure 4 : Exemple de facteur de massivété d'éléments IPE (tableau tiré de la référence [4])

Des valeurs plus élevées peuvent se rencontrer pour des éléments constitués de petits profilés, comme, par exemple, des racks. Au dessus de 1500 m^{-1} , il convient de réaliser une étude spécifique (Cas 4).

- **Structures métalliques (bardage et couverture)**

Pour les structures métalliques, deux éléments sont considérés :

1. Le bardage (façades et couverture) ;
2. L'isolant et ses caractéristiques pour les bardages simple peau.

- **Structures translucides**

Des moyens de renforcement sont proposés quelque soit le type de translucide : type de vitrage (verre recuit, feuilleté, double ou triple vitrage) ou de polymère. Ce facteur de vulnérabilité mène automatiquement à un cas 2.

Du fait de leur sensibilité, les puits de lumière ne sont pas pris en compte dans cette partie, mais dans les structures particulières.

- Matériau du châssis

Le châssis constitue le facteur de vulnérabilité des structures translucides.

- **Eléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments**

- Nature des matériaux ;
- Nature de l'isolant (épaisseur, combustibilité) et mode de fixation de l'isolant pour couverture en petits éléments si il y a des effets combinés pression et thermique. Il convient en effet de s'assurer que l'envol de la toiture sous l'effet du souffle d'une explosion ne va pas laisser ses habitants sans protection vis-à-vis du phénomène thermique qui suivrait. La présence d'isolant solidaire avec la charpente n'est indispensable que dans le cas où les combles sont habités et/ou que le plancher de séparation avec les étages inférieurs est inexistant ou non résistant aux effets de pression.

Pour les couvertures métalliques, leur traitement est similaire à celui des bardages et des panneaux métalliques (façades opaques légères).

- **Eléments non-structuraux : parements, enduit, menuiseries extérieures**

- Nature des matériaux (combustibilité).

5.3.2 TABLEAUX DES RELEVÉS TERRAIN

Dans cette partie, les tableaux des relevés terrains sont présentés pour chaque partie de structure.

- **Structures métalliques (bardage et couverture)**

Bardage métallique	
Peau	Simple <input type="checkbox"/> Simple+isolant <input type="checkbox"/> Double <input type="checkbox"/>
Isolant	Combustible <input type="checkbox"/> Non combustible <input type="checkbox"/> Epaisseur ... cm

- **Structures porteuses métalliques**

- Facteur de massivité

Le tableau des éléments à relever sur le terrain doit permettre de calculer le facteur de massivité.

Structure porteuse métallique apparente	
Périmètre	_____ m
Section	_____ m ²
Facteur de massivité (calcul ou donnée constructeur)	_____ m ⁻¹

- **Structures translucides**

Des moyens de renforcement sont proposés quelque soit le type de translucide : type de vitrage (verre recuit, feuilleté, double ou triple vitrage) ou de polymère. Ce facteur de vulnérabilité mène automatiquement à un cas 2. Du fait de leur sensibilité, les puits de lumière ne sont pas étudiés ici.

- Matériau du châssis

Le tableau correspondant aux structures translucides à remplir lors des relevés terrain sera le suivant.

Matériau du châssis
Bois <input type="checkbox"/> Aluminium <input type="checkbox"/> PVC <input type="checkbox"/> Autre <input type="checkbox"/>
Puits de lumière <input type="checkbox"/>

- **Éléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments**

Le tableau correspondant aux couvertures petits et grands éléments à remplir lors des relevés terrain sera le suivant.

Couverture / Toiture⁹	
Classique (tuile, ardoise et autres petits éléments non combustibles) <input type="checkbox"/>	
Béton <input type="checkbox"/> Métallique <input type="checkbox"/> Toiture végétalisée <input type="checkbox"/> Fibrociment <input type="checkbox"/>	
Autres matériaux (combustibles) <input type="checkbox"/>	
Isolant⁹ pour couverture en petits éléments	
Épaisseur ____ cm Non combustible <input type="checkbox"/>	
Fixation solidaire avec la charpente <input type="checkbox"/>	
Caractéristiques du comble⁹ pour couverture en petits éléments	
Habité <input type="checkbox"/>	
Plancher béton ou hourdis <input type="checkbox"/> Autre (bois seul, métallique...) <input type="checkbox"/>	

5.4 SYNTHÈSE DES RELEVÉS TERRAIN

Le tableau suivant synthétise les relevés terrain en termes d'identification des parties d'ouvrage et en termes de relevé de facteurs de vulnérabilité dans les zones d'intensité définies par des doses de 600 à 1800 (kW/m²)^{4/3}.s pour les phénomènes de type boule de feu.

⁹ Si effets combinés.

Seuil	Identification ¹⁰	Facteur de vulnérabilité (Zones d'intensité définies par des doses de 600 à 1800 (kW/m ²) ^{4/3} .s)
Structure non métallique	Matériaux	Néant
Structure métallique porteuse apparente	Matériaux	Facteur de massivité ¹¹
Structure métallique (bardage et couverture)	Matériaux	Si dose thermique >SEL nature de l'isolant (épaisseur, combustibilité)
Structure translucide	Matériaux	Matériau châssis ¹²
Eléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments	Matériaux	Nature des matériaux ⁹ Petits éléments ¹³ : <ul style="list-style-type: none"> • Nature de l'isolant (épaisseur, combustibilité) et mode de fixation • Présence et nature des combles
Eléments non-structuraux : parements, enduit, menuiseries extérieures	Matériaux	Nature des matériaux (combustibilité)
Structures particulières	Matériaux ou nature	Etude spécifique

Tableau 3 : Synthèse des relevés terrain – Phénomène de type boule de feu

¹⁰ Ces éléments sont à relever et à conserver pour assurer la traçabilité de l'étude.

¹¹ Des valeurs élevées peuvent se rencontrer pour des éléments constitués de petits profilés, comme, par exemple, des racks. Au dessus de 1500 m⁻¹, il convient de réaliser une étude spécifique (Cas 4).

¹² Des moyens de renforcement sont proposés quelque soit le type de translucide : type de vitrage (verre recuit, feuilleté, double ou triple vitrage) ou de polymère. Ce facteur de vulnérabilité mène automatiquement à un cas 2.

¹³ Si effets combinés

6 FINALISATION DE L'APPROCHE SOMMAIRE DE LA VULNERABILITE

6.1 PRINCIPES DE L'APPROCHE SOMMAIRE DE LA VULNERABILITE

La détermination des stratégies d'approche de la vulnérabilité afin d'évaluer la capacité à protéger les personnes ou la nécessité de renforcement s'appuie sur :

- La caractérisation de l'agression réalisée ;
- La caractérisation du bâti ;
- Des principes d'approche de la vulnérabilité proposés dans ce chapitre.

Ces principes sont mis en œuvre en fonction du type bâtementaire et de la caractérisation de l'agression. L'approche sommaire permet de distinguer 4 principes pour chaque caractéristique bâtementaire :

- **Cas 1.** La protection des personnes ne nécessite pas de travaux de renforcement ;
- **Cas 2.** La protection des personnes peut être obtenue par la réalisation de travaux ne nécessitant pas d'étude préalable ;
- **Cas 3.** La protection des personnes peut être obtenue par la réalisation de travaux nécessitant au préalable un diagnostic « sommaire » par un bureau d'études « structures » généraliste ;
- **Cas 4.** La protection des personnes nécessite la réalisation d'une étude de vulnérabilité approfondie par un bureau d'études spécialisé afin de définir la faisabilité et les mesures de renforcement possibles.

Pour les effets thermiques transitoires seuls sont rencontrés les cas 1, 2 ou 4.

- **Boule de feu.** Un tableau est proposé. Il délimite trois zones principales basées sur les seuils d'intensité. Si les effets de doses thermiques inférieures à $1800 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$ ont pu être quantifiés pour définir des prescriptions techniques, il est par contre nécessaire de recourir à une étude spécifique pour des niveaux d'intensité d'effet thermique supérieurs ou de considérer que la caractéristique bâtementaire permet de faire face à une intensité inférieure à ce seuil. Telle est la signification des cas 4 et cas 1 ou 2 affiché dans la colonne
- **Feu de nuage.** Dans la zone d'intensité inférieure au seuil des effets létaux, l'ensemble des types bâtementaires définis dans ce cahier relève du cas 1. Pour des intensités supérieures, une annexe est disponible si une approche de la vulnérabilité s'avère nécessaire.

6.2 TABLEAU DES PRINCIPES DE L'APPROCHE SOMMAIRE DE LA VULNERABILITE

Seuils	600 à 1000 (kW/m ²) ^{4/3} .s	1000 à 1800 (kW/m ²) ^{4/3} .s	≥1800 (kW/m ²) ^{4/3} .s
Structure non métallique	Cas 1	Cas 1	Cas 4 Cas 1 [Intensité inférieure]
Structure métallique porteuse apparente ¹⁴	Cas 1 si massivité < 1500 m ⁻¹ Cas 4 sinon	Cas 1 si massivité < 1500 m ⁻¹ Cas 4 sinon	Cas 4 Cas 1 [Intensité inférieure]
Bardage métallique (façade et couverture)	Cas 1	Cas 1 Double peau Simple peau avec isolant non-combustible d'épaisseur > 3cm Cas 2 Isolant combustible Ou Epaisseur isolant inférieure à 3 cm	Cas 4 Cas 1 ou cas 2 [Intensité inférieure]
Structure translucide	Cas 1 : Châssis aluminium, bois Cas 2 Verre et polymère Châssis PVC	Cas 1 : Châssis bois Cas 2 Verre et polymère Châssis PVC, Aluminium	Cas 4 Cas 1 ou 2, [Intensité inférieure]
Eléments non-structuraux ¹⁵ : couvertures petits et grands éléments	Cas 1 (sans surpression) Si effets combinés avec petits éléments ¹⁶ : • Cas 1 : si interface entre extérieur et dernier volume habité résistante aux effets de pression et non combustible • Cas 2 : sinon.	Cas 1 (sans surpression) Si effets combinés avec petits éléments : • Cas 1 : si interface entre extérieur et dernier volume habité résistante aux effets de pression et non combustible • Cas 2 : sinon.	Cas 4 Cas 1 (sans surpression) [Intensité inférieure] Cas 1 ou 2 (si effets combinés) [Intensité inférieure]
Eléments non-structuraux : parements, enduit, menuiseries extérieures	Cas 1 si matériau non combustible Cas 2 sinon	Cas 1 si matériau non combustible Cas 2 sinon	Cas 4 Cas 1 ou 2 [Intensité inférieure]
Structures particulières	Cas 4	Cas 4	Cas 4

Tableau 4 : Tableau des principes de l'approche sommaire de la vulnérabilité – Phénomène de type boule de feu

¹⁴ Des valeurs élevées peuvent se rencontrer pour des éléments constitués de petits profilés, comme, par exemple, des racks.

¹⁵ Le cas des toitures en chaume ou en autre matériau combustible nécessite une étude spécifique (cas 4)

¹⁶ De manière générale, la vulnérabilité d'un bâtiment doit être analysée de manière séparée vis-à-vis de chacun des trois types d'effet. Les différentes prescriptions doivent alors être prises en compte.

Seuils	Intensité <SEL	Intensité ≥ SEL
Structure non métallique	Cas 1	Voir annexe 1
Structure métallique porteuse apparente ¹⁷	Cas 1	Voir annexe 1
Bardage métallique (façade et couverture)	Cas 1	Voir annexe 1
Structure translucide	Cas 1	Voir annexe 1
Éléments non-structuraux ¹⁸ : couvertures petits et grands éléments	Cas 1	Voir annexe 1
Éléments non-structuraux : parements, enduit, menuiseries extérieures	Cas 1	Voir annexe 1
Structures particulières	Cas 1	Voir annexe 1

Tableau 5 : Tableau des principes de l'approche sommaire de la vulnérabilité – Phénomène de type feu de nuage

¹⁷ Des valeurs élevées peuvent se rencontrer pour des éléments constitués de petits profilés, comme, par exemple, des racks.

¹⁸ Le cas des toitures en chaume ou en autre matériau combustible nécessite une étude spécifique (cas 4)

En fonction de l'utilisation du tableau de principes présenté dans le paragraphe précédent, les éléments suivants peuvent être mis en évidence :

- La capacité à protéger les personnes sans travaux spécifiques (Cas n°1)
- La capacité à protéger les personnes avec des travaux simples ne nécessitant pas l'intervention de bureaux d'études (Cas n°2) **[Chapitre 7]** ;
- Le recours à une étude spécifique par un bureau d'études spécialisé (Cas n°4) **[Chapitre 8]**.

7 MOYENS DE RENFORCEMENT (HORS ETUDE SPECIFIQUE)

Dans cette partie, la notion de renforcement décrit l'ensemble des actions pouvant être mise en œuvre pour abaisser le niveau de vulnérabilité du bâti vis-à-vis de l'agression thermique.

Pour mémoire, est exclu du champ d'application de cette partie, le cas pour lequel le bâti est soumis à une dose thermique supérieure à $1800 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$ produite par un phénomène de type boule de feu (cas 4).

Ce chapitre présente :

- Une liste non exhaustive, mais détaillée, des moyens de renforcement envisageables ;
- Des recommandations spécifiques à l'usage des bureaux d'étude sur les parties du bâti à protéger en fonction de l'exposition au phénomène.

7.1 RENFORCEMENT DES STRUCTURES VIS-A-VIS DES PHENOMENES DE TYPE BOULE DE FEU

7.1.1 CAS DU BATI NON SOUMIS A UNE ONDE DE SURPRESSION

Ce cas concerne :

- Les phénomènes Boil Over ou Boil Over couche mince ;
- Le phénomène de BLEVE à une distance suffisante de la source pour que les effets de surpression puissent être négligés.

Dans ce cas, les seules parties vulnérables sont les bardages métalliques simple peau ainsi que les vitrages et leur menuiserie.

Pour les bardages métalliques :

Pour une dose thermique comprise entre 1000 à $1800 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$, la mise en place (ou le remplacement) d'une couche de 3 cm d'isolant non combustible permet de remplir les conditions de protection des occupants vis-à-vis du phénomène agressif pour les bardages simple peau.

Vitrages et menuiseries

Pour les vitrages et leurs menuiseries, il convient de les traiter pour que :

1. L'échauffement des châssis soit insuffisant pour provoquer leur dégradation chimique ou mécanique (dilatation contrariée) qui entraînerait la chute des vitrages ;
2. La dose thermique qu'ils transmettent à l'intérieur de l'habitat soit inférieure au SEI. Dans ce qui suit, un facteur de transmission corrigé est évalué pour les vitrages et translucides. Ce facteur de transmission corrigé se calcule comme suit :

$$\tau_{\text{corr}} = \left(\frac{\text{SEI}}{\text{Dose incidente}} \right)^{\frac{3}{4}}$$

Pour les châssis :

- Aluminium, entre 1000 et 1800 (kW/m²)^{4/3}.s ;
- PVC entre 600 et 1800 (kW/m²)^{4/3}.s.

Il convient de les traiter, au choix, de l'une des manières suivantes :

- Remplacement par des châssis en bois ;
- Application de peintures adaptées : à faible émissivité ou intumescente ou isolante non inflammable. Si une de ces solutions est retenue, le maintien dans le temps des qualités de la peinture doit être assuré. Par ailleurs, suivant la nature de la peinture, l'application d'une peinture primaire d'accrochage est nécessaire.

Pour les vitrages :

Les moyens de protection visent à réduire la dose transmise au travers du vitrage. Néanmoins, leur mise en œuvre ne doit pas se traduire par une augmentation de température dans le vitrage produisant des contraintes thermiques de nature à le rompre, annihilant de fait la protection procurée. Ce type de phénomène peut se produire si l'absorption du rayonnement incident après traitement devient trop importante.

Les valeurs de températures admissibles dans les vitrages peuvent être tirées du mémento de Saint Gobain Glass au chapitre sur les contraintes thermiques [17].

Les valeurs d'écart de températures admissibles couramment retenues sont les suivantes :

- 20°C pour du verre feuilleté ;
- 35°C pour du verre recuit ;
- 54°C pour du verre durci ;
- 215°C pour du verre trempé.

Ces valeurs sont à pondérer par l'inertie thermique du vitrage, lorsqu'elle est connue, et par l'inclinaison du vitrage. En raison de leur inclinaison, les puits de lumière réalisés en verre sont traités comme des structures particulières et doivent faire l'objet d'une étude spécifique.

Dans ce qui suit, les valeurs de transmission, réflexion et absorption associées aux films filtrants sont communiquées pour des films posés à l'extérieur. Pour certains vitrages, feuilletés notamment, en raison de la présence de feuillets absorbants, la pose de films filtrants en intérieur est déconseillée.

Cas des vitrages en verre recuit et feuilletés :

- Zone de 600 à 1000 (kW/m²)^{4/3}.s :

La mise en place de films filtrants permet de réduire la dose transmise. Pour rester sous le Seuil des Effets Irréversibles, le facteur de transmission du film doit être au plus de l'ordre de 75 %. Associé à un facteur d'absorption inférieur ou égal à 20 %, il permet de conserver au vitrage une température compatible avec les contraintes thermiques admissibles.

Une autre solution peut consister en la mise en place de vitrages filtrants avec un facteur de transmission de l'ordre de 68 %. Le facteur d'absorption du vitrage doit également lui permettre de conserver une température compatible avec les contraintes thermiques admissibles pour le type de vitrage concerné.

- Zone de 1000 à 1800 (kW/m²)^{4/3}.s :

La mise en place de films filtrants permet de réduire la dose transmise. Pour rester sous le Seuil des Effets Irréversibles, le facteur de transmission du film doit être inférieur à 49 %. Associé à un facteur d'absorption inférieur ou égal à 20 %, il permet de conserver au vitrage une température compatible avec les contraintes thermiques admissibles.

Une autre solution peut consister en la mise en place de vitrages filtrants avec un facteur de transmission de l'ordre de 43 %. Le facteur d'absorption du vitrage doit également lui permettre de conserver une température compatible avec les contraintes thermiques admissibles pour le type de vitrage concerné.

Cas des doubles et triples vitrages :

- Zone de 600 à 1000 (kW/m²)^{4/3}.s :

La mise en place de films filtrants permet de réduire la dose transmise. Pour rester sous le Seuil des Effets Irréversibles, le facteur de transmission du film doit être au plus de l'ordre de 91 %. Associé à un facteur d'absorption inférieur ou égal à 20 %, il permet de conserver au vitrage une température compatible avec les contraintes thermiques admissibles.

Une autre solution peut consister en la mise en place de vitrages filtrants avec un facteur de transmission global inférieur à 68 %. Le facteur d'absorption du vitrage doit également lui permettre de conserver une température compatible avec les contraintes thermiques admissibles.

- Zone de 1000 à 1800 (kW/m²)^{4/3}.s :

La mise en place de films filtrants permet de réduire la dose transmise. Pour rester sous le Seuil des Effets Irréversibles, le facteur de transmission du film doit être au plus de l'ordre de 58 %. Associé à un facteur d'absorption inférieur ou égal à 20 %, il permet de conserver au vitrage une température compatible avec les contraintes thermiques admissibles.

Une autre solution peut consister en la mise en place de vitrages filtrants avec un facteur de transmission global inférieur à 43 %. Le facteur

d'absorption du vitrage doit également lui permettre de conserver une température compatible avec les contraintes thermiques admissibles.

Cas des polymères :

- Zone de 600 à 1000 (kW/m²)^{4/3}.s :

La mise en place de films filtrants permet de réduire la dose transmise. Pour rester sous le Seuil des Effets Irréversibles, le facteur de transmission du film doit être au plus de l'ordre de 77 %. Associé à un facteur d'absorption inférieur ou égal à 23 %, il permet au translucide de conserver une température compatible avec sa tenue.

- Zone de 1000 à 1800 (kW/m²)^{4/3}.s :

La mise en place de films filtrants permet de réduire la dose transmise. Pour rester sous le Seuil des Effets Irréversibles, le facteur de transmission du film doit être inférieur à 50 %. Associé à un facteur d'absorption inférieur ou égal à 35 %, il permet au translucide de conserver une température compatible avec sa tenue.

D'autres solutions basées sur l'occultation des vitrages sont possibles. Ces solutions ont été développées dans le complément technique consacré aux effets thermiques, développé par EFACTIS [16]. Elles sont rappelées ci-dessous.

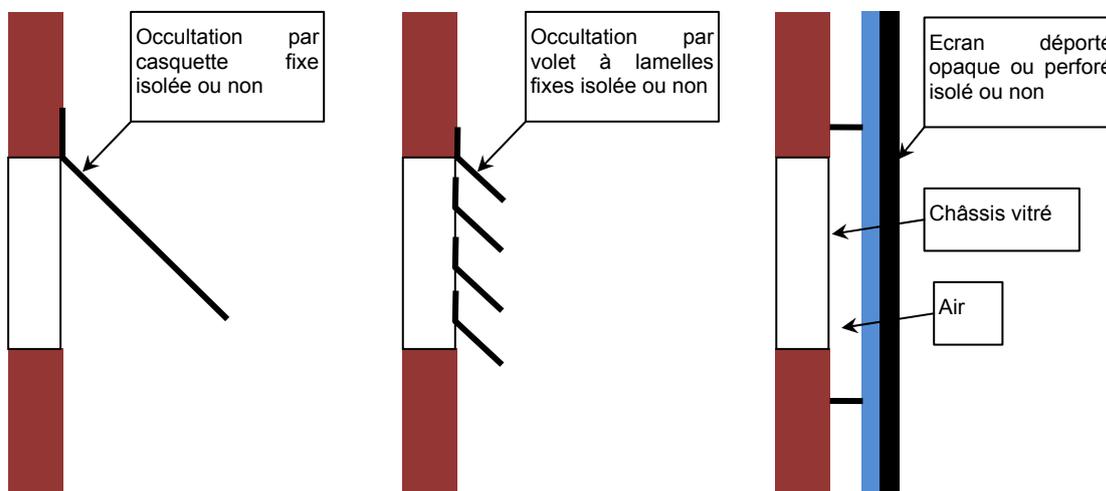


Figure 5 : Mode d'occultation des vitrages tels que définis dans [15]

Cas des éléments non-structuraux : parements, enduit, menuiseries extérieures

L'intérêt de cette rubrique réside dans la participation ou non du parement à une propagation d'incendie. Pour ce faire, il conviendra de renseigner la présence éventuelle de parement en matériaux inflammables : bois, polymères, etc.

De prime abord, il n'est pas possible d'identifier un enduit ou une peinture inflammable par une observation extérieure. Toutefois, en zone d'aléa thermique transitoire, il pourra être préconisé, sur des constructions neuves ou en cas de rénovation, l'emploi d'enduit ou de peintures ininflammables en extérieur.

7.1.2 CAS DU BATI SOUMIS A UNE ONDE DE SURPRESSION

Ce cas concerne le phénomène de BLEVE en un point suffisamment proche de la source pour que les effets de surpression ne soient pas négligés. Il peut également concerner le phénomène d'UVCE pour les structures se trouvant dans le nuage gazeux.

Dans un tel cas, un traitement préalable des structures doit être réalisé pour leur permettre de résister à la surpression incidente. En effet, tout traitement préalable des structures leur permettant de résister au rayonnement pourrait être inutile du fait de leur rupture.

Pour les couvertures en petits éléments :

Le cahier applicatif relatif à la vulnérabilité des structures aux effets de surpression déconseille de solidariser les petits éléments à la charpente, vis-à-vis des effets de surpression, à l'exception des obligations techniques liées à la prévention du risque sismique ou à la protection neige et vent. En effet, il s'agit de soulager la charpente des effets de pression. Dans ce contexte, il est nécessaire :

1. De s'assurer qu'une interface (isolant ou plancher de type béton ou hourdis) est présente derrière les petits éléments pour jouer le rôle d'écran face au rayonnement thermique après leur envol ;
2. Que cette interface soit non combustible et qu'elle soit solidaire de la structure. Dans le cas d'un isolant, cela signifie qu'il doit être fixé à la charpente de manière solidaire.

Pour le traitement des autres parties d'ouvrage, il est recommandé de s'appuyer sur le cahier applicatif de la vulnérabilité du bâti à la surpression. Toutefois, les points suivants peuvent être plus particulièrement soulignés.

Pour les vitrages :

Les vitrages feuilletés classiques ont une résistance similaire à celle des vitrages verre recuit. Néanmoins, la présence de films intercalaires leur autorise un comportement élastoplastique sous l'effet d'une onde de pression : les essais réalisés à l'INERIS ont ainsi montré que les vitrages rompaient pour des niveaux de pression, mais que les morceaux étaient maintenus en place par les films. Cela permet aux vitrages en verre feuilleté de rester en place pour des niveaux de pression supérieurs à ceux atteints par les vitrages en verre recuit.

Dans un tel cas, hormis si des essais permettent de justifier des tenues plus élevées, il vaut mieux utiliser, pour les bas niveaux de pression (inférieurs à 50 mbar), des doubles vitrages feuilletés avec des caractéristiques de filtre de la dose

thermique comparables à celles décrites pour les vitrages en absence de surpression. Pour des niveaux de pression plus élevés, les vitrages employés doivent être en accord avec ceux recommandés dans le cahier applicatif de la vulnérabilité du bâti à la surpression. Par ailleurs, les châssis en bois résistent également bien à de bas niveaux de pression.

Enfin, si des éléments occultants sont mis en place (voir ci-dessus en Figure 5), ils devront être capables de résister à l'onde de surpression.

Pour les bardages et couvertures en grands éléments :

Les éléments légers, de type panneaux en fibrociment ou en translucide, ne résistant pas à la surpression doivent être remplacés par des éléments plus résistants, dans le respect des autres réglementations (exutoires de désenfumage vis-à-vis de la réglementation incendie, surface ajourée vis-à-vis du code du travail, etc.).

Le lecteur est invité à baser sa réflexion sur une utilisation combinée des cahiers pratiques de vulnérabilité aux effets thermiques et à ceux de surpression pour les autres parties d'ouvrage.

7.2 FACES A PRENDRE EN COMPTE

Il est conseillé de prendre en compte l'orientation des faces des structures vis-à-vis d'un phénomène thermique de type boule de feu comme sur la Figure 6. L'angle de 80° constitue une valeur forfaitaire au-delà de laquelle le rayonnement thermique provenant de l'agression devient tellement rasant par rapport à la paroi cible que sa contribution peut être négligée. Dans le cas contraire, de manière sécuritaire, le rayonnement doit être pris maximal sur les faces impactées sans atténuation due à l'orientation vis-à-vis du phénomène.

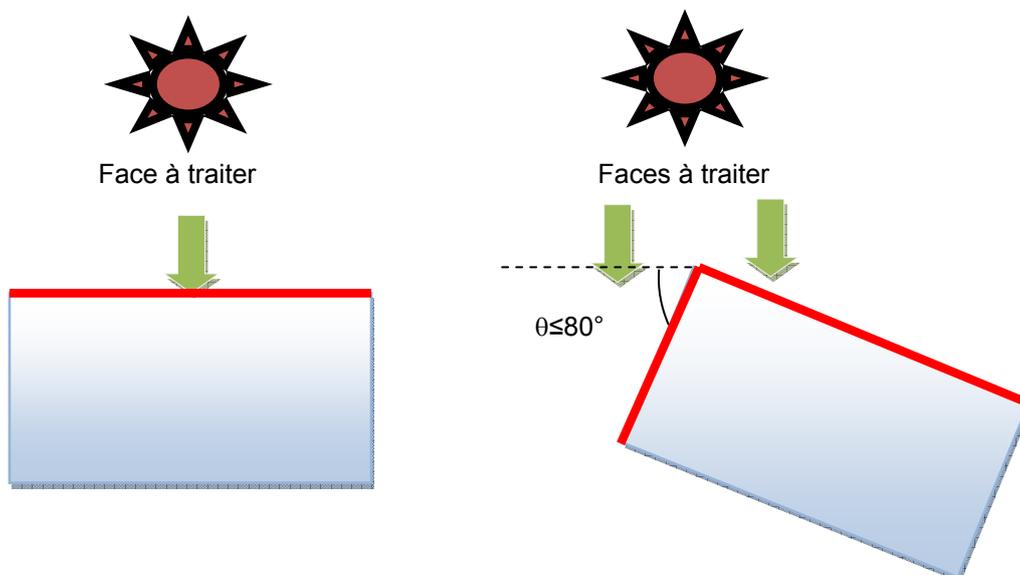


Figure 6 : Faces à prendre en compte vis-à-vis d'un phénomène de type boule de feu

Les facteurs d'ombre (masquage par une aile ou un autre bâtiment) pourront éventuellement être pris en compte dans l'évaluation des effets thermiques sur les parties de structure. Dans tous les cas, le toit des bâtiments doit toujours être étudié.

8 ETUDE DE VULNERABILITE APPROFONDIE

8.1 MODE D'INTERVENTION DU BUREAU D'ETUDES SPECIALISE

Dans le cadre de l'étude de la vulnérabilité du bâti aux effets thermiques transitoires, le rôle du bureau d'études spécialisé consiste à étudier la réponse des structures aux effets thermiques transitoires dans les cas suivants, hors du domaine d'étude :

- Tout phénomène mettant en œuvre un produit qui n'est pas listé dans le Tableau 1.
- Tout phénomène dont la durée est supérieure à deux minutes. En effet, dans un tel cas, même si le phénomène peut être variable, il est hors du domaine de définition de la dose thermique.
- Tout phénomène de type boule de feu produisant une dose supérieure à $1800 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{.s}$.
- Tout phénomène produisant un flux instantané supérieur à 150 kW/m^2 . En effet, le retour d'expérience montre que, dans ce cas, le béton (et les matériaux apparentés) peut être sujet à l'écaillage. L'analyse des phénomènes de type boule de feu montre que ces niveaux de flux ne sont pas atteints pour des doses thermiques inférieures à $1800 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3}\text{.s}$. Dans un tel cas, il convient de prendre en compte le risque d'écaillage (éclatement) comme préconisé dans l'Eurocode 2, partie 1-2, ENV 1992-1-2 ou de s'en affranchir par des traitements particuliers (enduit, peintures ou plaques de protection) permettant au béton de ne pas être soumis à un flux surfacique thermique de cet ordre.
- Toute structure ayant des éléments porteurs métalliques de facteur de massiveté supérieure à 1500 m^{-1} ;
- Toute structure répondant aux critères des structures particulières ou ne rentrant pas en compte dans la typologie proposée dans ce cahier (couverture en chaume par exemple).

8.2 CRITERES

Les critères à retenir pour l'étude sont les suivants :

- Habitabilité du bâti :
 - La dose thermique passant au travers des vitrages doit être inférieure au seuil des effets irréversibles et l'intégrité du vitrage doit être préservée pendant toute la durée du phénomène. Pour ce qui est des translucides, leur dégradation est tolérée, pour autant qu'ils ne s'enflamment pas ;
 - Pour les menuiseries en polymère, leur température doit rester inférieure à leur température de dégradation afin d'éviter la chute des vitrages ;

- Pour les menuiseries en aluminium, leur température doit rester inférieure à 100°C ;
- La température interne de l'atmosphère du bâti doit rester inférieure à 60°C ;
- Pour les bardages avec isolant, la densité de flux thermique ne doit pas être en mesure de pouvoir enflammer l'isolant ou de produire des fumées toxiques ;
- Non-ruine de la structure porteuse :
 - La température des fers dans le béton, prise forfaitairement en considérant 1 cm d'enrobage, doit rester inférieure à 400°C. Par analogie, pour des matériaux équivalents non armés, ce critère de température sera conservé pour 1 cm d'épaisseur ;
 - La température des structures porteuses métalliques doit rester inférieure à 350°C afin d'éviter les risques de flambement. Un autre critère peut être l'emploi correct des courbes de réduction de la résistance des matériaux telles que consultables dans les Eurocodes en leur partie 1-2 ;
- Non propagation d'incendie :
 - La température de la paroi interne doit être inférieure à 140°C qui est la température retenue dans l'ingénierie incendie pour l'inflammation interne ;
 - Pour les menuiseries en polymère, leur température doit rester inférieure à leur température d'inflammation ;
 - Pour les menuiseries en bois, leur température doit rester inférieure à la température d'inflammation du bois.

8.3 REGLES DE TRAITEMENT

Il est conseillé :

- De prendre en compte l'orientation des faces des structures vis-à-vis d'un phénomène thermique de type boule de feu comme indiqué sur la Figure 7. Pour ce qui est du facteur de forme entre la surface et la boule de feu, même lorsque les façades à traiter ne font pas rigoureusement face à la boule de feu, le facteur de forme à employer est celui d'une surface perpendiculaire au rayonnement thermique provenant de l'agression thermique.

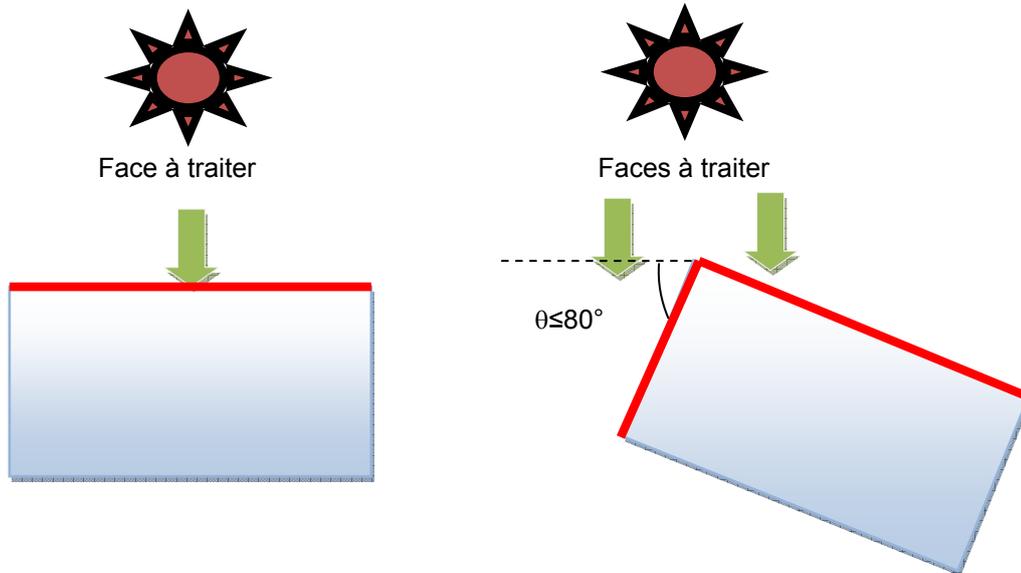


Figure 7 : Faces à prendre en compte vis-à-vis d'un phénomène de type boule de feu

- De prendre en compte l'orientation des faces des structures vis-à-vis d'un phénomène thermique de type feu de nuage comme sur la Figure 8. Pour un phénomène de type feu de nuage ou lorsque le bâti est dans la boule de feu, toutes les faces en contact doivent être prises en compte de la même manière. Le toit des bâtiments doit toujours être pris en compte.

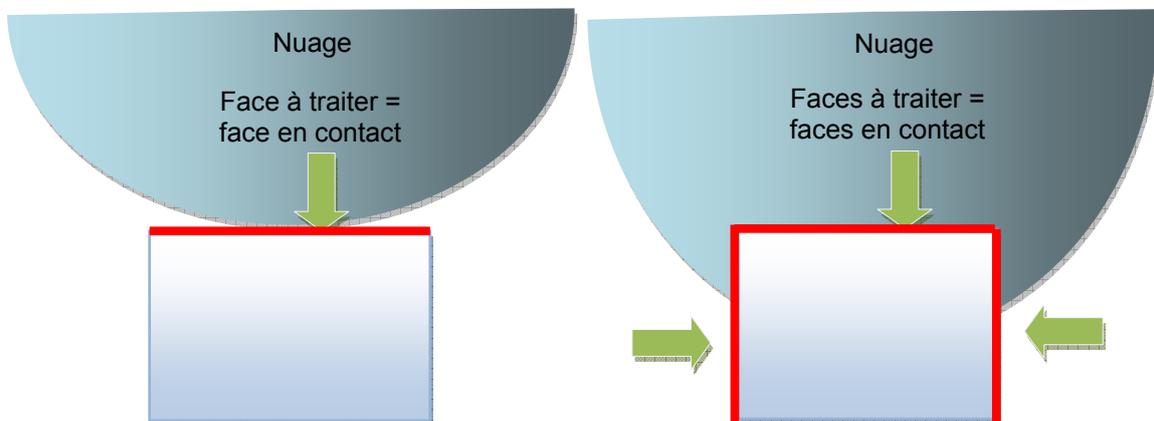


Figure 8 : Faces à prendre en compte vis-à-vis d'un phénomène de type feu de nuage

- D'employer des modèles d'échanges thermiques :
 - Basés sur les Eurocodes en leur partie 1.2 dédiée au calcul du comportement au feu. Ils donnent les conditions d'échanges thermiques en convection et en rayonnement entre un élément de structure et les flammes dans lequel il est immergé pour :
 - tous les phénomènes de type feu de nuage pour lesquels le bâti est en contact avec le nuage ;
 - pour les phénomènes de type boule de feu pour lesquels le bâti se trouverait pris dans la boule de feu.
 - De type radiatif classique pour les phénomènes de type boule de feu (voir Figure 9 et Figure 10) prenant en compte :
 - les échanges radiatifs avec le phénomène transitoire thermique ;
 - les échanges radiatifs et convectifs avec l'ambiance externe supposée in affectée par le phénomène en raison de sa faible durée. Les coefficients d'échange pourront être : pour les échanges radiatifs l'émissivité de l'élément de structure ; pour les échanges convectifs les corrélations habituelles de convection naturelle ;
 - les échanges convectifs avec l'ambiance interne modifiée par le flux thermique incident. Les coefficients d'échange pourront être les corrélations habituelles de convection naturelle. Dans le cas des vitrages, les échanges convectifs avec l'ambiance interne pourront être négligés du fait de la difficulté d'en apprécier l'influence vis-à-vis de la dose thermique transmise au travers du vitrage.

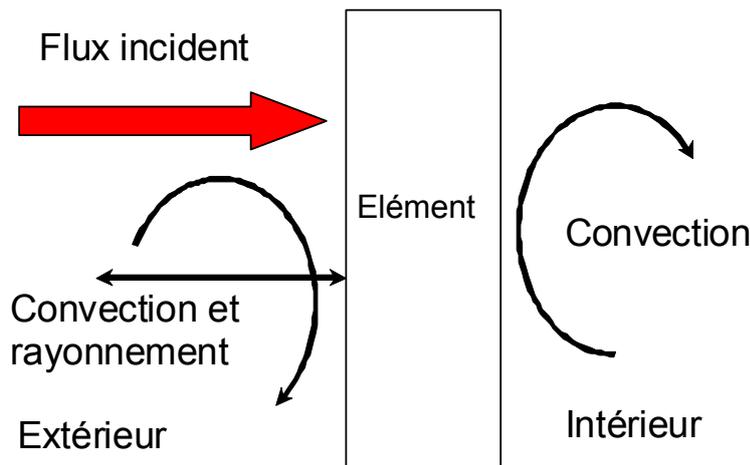


Figure 9 : Modèle thermique pour les éléments opaques

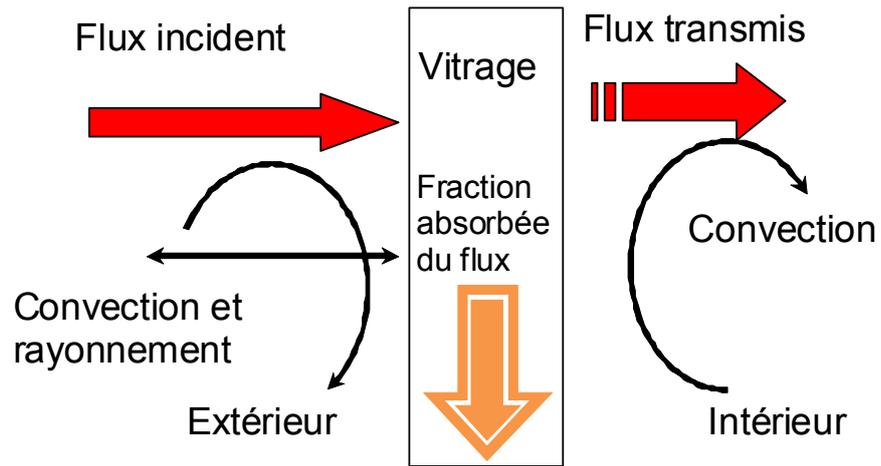


Figure 10 : Modèle thermique pour les éléments translucides

- D'employer des modèles de structures basés sur les Eurocodes en leur partie 1.2, notamment pour le traitement des structures métalliques (acier et aluminium) à l'aide des facteurs de massivité.

9 ESTIMATION DU COUT DES SOLUTIONS DE RENFORCEMENT

L'évaluation des ouvrages décrits au présent chapitre est une valeur moyenne pouvant varier suivant :

- L'importance du volume des travaux ;
- La région concernée ;
- Le fabricant de produits équivalents à ceux présentés ci-dessous.

Le système de protection des ouvrages en béton ou métallique devra en tout état de cause être déterminé par une étude préalable réalisée dans le respect de la réglementation et normes en vigueur, par un organisme et Bureau d'Etudes Techniques spécialisé en matière de protection contre l'incendie.

Les critères de base retenus pour l'établissement de ces évaluations sont les suivants :

- Coupe feu : suivant précision de l'ouvrage ;
- Courbe Hydrocarbures Majorants.

9.1 FILMS FILTRANTS

DESCRIPTION DES OUVRAGES	U	P. Unit.
Argent 20 (abs. 33 %, réflex. 55 %, transm. 12 %) Garantie 5 ans en pose extérieure / 10 ans en pose intérieure / prix posé	m ²	55
HLS 60 (abs. 29 %, réflex. 34 %, transm. 37 %) Pose intérieure uniquement / prix posé	m ²	80

9.2 FLOPAGE PROTECTEURS

DESCRIPTION DES OUVRAGES	U	P. Unit.
Flocage fibreux FIBROFEU de PROJISO Flocage composé de fibres, accompagné d'un liant, pour constituer un revêtement fibreux. Consistance dure pouvant résister aux chocs. application par projection, uniformément sur les surfaces à traiter sans joints ni fissures, toutes sujétions de préparation des supports tels que les primaires d'accrochage. Finition durcisseur de surface ou peinture acrylique		
Sur structure béton > à 14cm d'épais. (CF 1 h) Epaisseur : 10 mm Coupe feu : 1 heure	m ²	50
Sur structure béton > à 14cm d'épais. (CF 1h30) Epaisseur : 12 mm Coupe feu : 1 heure 30	m ²	59

Sur structure béton > à 14cm d'épais. (CF 4 h) Epaisseur : 16 mm Coupe feu : 4 heures	m ²	70
Sur structure métal. (CF 1 h) Epaisseur : 12 mm Coupe feu : 1 heure	m ²	48
Sur structure métal. (CF 2 h) Epaisseur : 35 mm Coupe feu : 2 heures	m ²	80,
Sous plancher collaborant. (CF 1 h) Epaisseur : 10 mm Coupe feu : 1 heure	m ²	42
Sous plancher collaborant. (CF 2 h)	m ²	70
Sur structure bois. (CF 2 h) Epaisseur : 55 mm Coupe feu : 2 heures	m ²	110
Flocage SPRAYED LIMPET MINERAL WOOL de NESTAAN		
Flocage composé d'un mélange de laine minérale de charges inorganiques et de liants, réalisé sur support sain et apte à recevoir l'ouvrage, toutes sujétions de préparation des supports tels que les primaires d'accrochage.		
Epaisseur 13-15 mm - Coupe feu 1 h	m ²	40
Epaisseur 20-25 mm - Coupe feu 2 h	m ²	60

9.3 HABILLAGE PAR PLAQUES

DESCRIPTION DES OUVRAGES	U	P. Unit.
Habillage par plaques mises en œuvre en intérieure ou extérieure, sur ossature comprise ou fixation par chevillage sur le support. PROMATECT-T de chez PROMAT Epaisseur : 25 mm Coupe feu : 1 à 2 heures		
Exécution sur parois verticales. (CF 1 à 2 h)	m ²	125
Exécution en plafonds droits. (CF 1 à 2 h)	m ²	160

10 REFERENCES

- [1] Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. Guide méthodologique « Plan de Prévention des Risques Technologiques ». 2005 version 1, 2007 version 2.
- [2] EFECTIS France, LNE. Plan de prévention des risques technologiques, Guide de prescriptions techniques pour la résistance du bâti face à un aléa technologique thermique avec pour unique but la protection des personnes. Réf. E-ING-07/565c – GA/AR. Juillet 2008 révision C.
- [3] CERTU, CETE Lyon, INERIS. Complément technique relatif à l'effet toxique. Juillet 2008.
- [4] Centre Suisse de la Construction Mécanique. Fichiers PDF de facteur de massivité de profilés, téléchargeable sur : <http://www.szs.ch/facteursdemassivite.html>
- [5] CSTB. Complément technique relatif à l'effet de surpression. Recommandations et précautions en vue de réduire les risques. Référence 26005165. Mars 2008 version 2.
- [6] INERIS. Cahier applicatif du complément technique de la vulnérabilité du bâti aux effets de surpression. INERIS-DRA-08-99461-15249A. Novembre 2008.
- [7] INERIS. Analyse de l'étude des prescriptions techniques pour la résistance du bâti face à un aléa technologique thermique avec pour unique but la protection des personnes. INERIS-DRA-08-94654-03299A. Mars 2008.
- [8] Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. Guide technique relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées. Version octobre 2004.
- [9] Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. 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. JO du 7 octobre 2005
- [10] INERIS. Cahier scientifique du cahier technique de la vulnérabilité du bâti aux effets thermiques transitoires. A venir.
- [11] Loi n° 2003-699 du 30/07/03 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages.
- [12] Décret n° 2005-1130 du 07/09/05 relatif aux plans de prévention des risques technologiques.
- [13] P22-391 ENV 1994-1-1 (septembre 1994) Construction mixte acier-béton – Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton et document d'application nationale – Partie 1-1 : Construction mixte acier-béton – Règles générales et règles pour les bâtiments.

- [14] ENV 1996-1-1 (juin 1995) Eurocode 6 : Calcul des ouvrages en maçonnerie – Partie 1-1 : Règles générales – Règles pour maçonnerie armée et non armée.
- [15] Groupe de Travail Dépôts Liquides Inflammables. UVCE dans un dépôt de liquides inflammables. Mai 2007 - version 01bis.
- [16] EFECTIS France, LNE. Plan de prévention des risques technologiques, Caractérisation et réduction de la vulnérabilité du bâti face à un phénomène dangereux technologique thermique. Réf. E-ING-07/564b – GA/AR. Juillet 2008 révision B.
- [17] Saint Gobain. Memento web
<http://fr.saint-gobain-glass.com/b2b/default.asp?nav1=st&nav2=memento>

11 LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation précise	N° pages
1	LE BATI SOUMIS A UN FEU DE NUAGE AU-DESSUS DU SEUIL DES EFFETS LETAUX	10

ANNEXE 1

BATI SOUMIS A UN FEU DE NUAGE AU DESSUS DU SEUIL DES EFFETS LETAUX

Introduction – Mise en garde

Du point de vue réglementaire, dans un feu de nuage, les seuils des effets létaux et létaux significatifs sont confondus. Il correspond donc à des niveaux d'aléas permettant de mettre en œuvre des mesures foncières possibles (F à TF+).

☛ **La plupart du temps, le feu de nuage est le pendant thermique de l'explosion de nuage gazeux (UVCE). Or les effets de pression associés à ce dernier phénomène sont le plus souvent dimensionnants vis-à-vis du bâti. Par voie de conséquence, ils devront être préalablement pris en compte.**

☛ **Pour l'ensemble du bâti, il convient de contrôler la perméabilité de la structure. Ce contrôle, réalisé de manière intuitive et visuelle, permet de s'assurer que les gaz pouvant générer un feu de nuage ne peuvent pénétrer facilement dans le bâti avant son inflammation. Si cette condition n'est pas respectée, toute mesure de renforcement du bâti vis-à-vis d'une agression extérieure est inutile, le nuage pouvant s'enflammer à l'intérieur du bâtiment.**

Caractérisation de l'agression

Afin de pouvoir déterminer la capacité du bâti à protéger les personnes au regard des phénomènes thermiques transitoires de type feu de nuage, il s'agit de caractériser les zones d'enjeux selon des enveloppes de temps liées à la Limite Inférieure d'Inflammabilité :

- 0,5 s ;
- 1 s ;
- 3 s ;
- 4,8 s ;
- 10 s.

Cette cartographie peut-être réalisée à l'aide d'un module dédié SIGALEA.

Caractérisation du bâti

IDENTIFICATION DES PARTIES D'OUVRAGE

Pour l'ensemble du bâti, les enjeux se portent sur les structures métalliques et translucides. Les structures en béton et assimilé se comportent correctement lorsqu'ils sont soumis aux échanges thermiques résultants d'un feu de nuage.

Néanmoins, dans la caractérisation, il conviendra de tracer l'ensemble des types de structures rencontrées. De manière similaire à la typologie adaptée pour les phénomènes de type boule de feu, les parties d'ouvrages sont classées en famille comme suit :

- Structures non métalliques ;
- Structures métalliques ;
- Structures translucides ;
- Eléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments ;
- Eléments non-structuraux : parements, enduit et menuiseries extérieures ;
- Structures particulières.

La description précise de chacune de ces parties d'ouvrage est donnée au paragraphe 3.4.2.

RELEVÉ DES FACTEURS DE VULNERABILITÉ DES PARTIES D'OUVRAGE

Les facteurs de vulnérabilité, permettant de déterminer la capacité d'un bâti à protéger les personnes, sont présentés pour chacune des parties d'ouvrages.

- **Structures non métalliques**

Ces structures ne nécessitent pas d'identification de facteur de vulnérabilité (pour ces éléments, seul sera considéré l'identification du type de matériau, pour autant qu'il soit de conductivité comparable à celle du béton).

- **Structures métalliques porteuses apparentes**

Leur étude passe par le relevé de leur facteur de massivité. Ce facteur est défini dans le paragraphe 5.3.1. Le facteur de massivité est le rapport périmètre sur section.

Structure porteuse apparente métallique	
Périmètre	_____ m
Section	_____ m ²
Facteur de massivité (calcul ou donnée constructeur)	_____ m ⁻¹

Quatre classes de profilés sont définies dans cette annexe :

- Inférieur à 250 m⁻¹ ;
- Entre 250 et 500 m⁻¹ ;
- Entre 500 et 800 m⁻¹ ;
- Entre 800 et 1500 m⁻¹.

Au dessus de 1500 m⁻¹, il convient de réaliser une étude spécifique (Cas 4).

Structures métalliques (bardages et couvertures)

Pour les structures métalliques, deux éléments sont considérés :

3. Le bardage (façades et couverture) ;
4. L'isolant et ses caractéristiques pour les bardages simple peau.

Bardage métallique			
Peau	Simple <input type="checkbox"/>	Simple+isolant <input type="checkbox"/>	Double <input type="checkbox"/>
Isolant	Combustible <input type="checkbox"/>	Non combustible <input type="checkbox"/>	Epaisseur ... cm



Figure 11 : Bardage simple peau

- **Structures translucides**

Plusieurs aspects sont à considérer pour les structures translucides :

1. La nature de la surface translucide : type de verre (verre recuit, durci, trempé) ou de polymère ;
2. Matériau du châssis : PVC, aluminium ou bois.

Structure translucide				
Châssis	Bois <input type="checkbox"/>	Métallique <input type="checkbox"/>	PVC <input type="checkbox"/>	
Nature de la surface	Verre recuit <input type="checkbox"/>	Durci <input type="checkbox"/>	Trempé <input type="checkbox"/>	Polymère <input type="checkbox"/>



Figure 12 : Exemple de façade translucide

- **Éléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments**

Plusieurs aspects sont à considérer pour les couvertures :

1. La nature de la couverture ;
2. L'isolant dans le cas où la couverture est métallique, de manière analogue avec le traitement préconisé pour les bardages (combustibilité, non combustibilité de l'isolant) ;
3. La nature (épaisseur, combustibilité) et le mode de fixation de l'isolant pour le cas où la couverture en petits éléments pourrait être soumise à des phénomènes combinant surpression et effet thermique.
4. De manière analogue avec les phénomènes de type boule de feu dans le cas d'effets combinés, la présence d'un comble habité et ou d'un plancher résistant.



Figure 13 : Couverture en fibrociment



Figure 14 : Couverture métallique

Couverture / Toiture	
Classique (tuile, ardoise et autres petits éléments non combustibles)	<input type="checkbox"/>
Béton <input type="checkbox"/> Métallique <input type="checkbox"/> Toiture végétalisée <input type="checkbox"/> Fibrociment <input type="checkbox"/>	
Autres matériaux (combustibles)	<input type="checkbox"/>
Isolant ¹⁹ pour couverture en petits éléments	
Epaisseur ___ cm Non combustible <input type="checkbox"/>	
Fixation solidaire avec la charpente	<input type="checkbox"/>
Caractéristiques du comble ⁹ pour couverture en petits éléments	
Habité	<input type="checkbox"/>
Plancher béton ou hourdis <input type="checkbox"/> Autre (bois seul, métallique...)	<input type="checkbox"/>

- **Éléments non-structuraux : parements, enduit, menuiseries extérieures**

L'intérêt de cette rubrique réside dans la participation ou non du parement à une propagation d'incendie. Pour ce faire, il conviendra de renseigner la présence éventuelle de parement en matériaux inflammables : bois, polymères, etc.

SYNTHESE DES RELEVES TERRAIN

Le tableau suivant synthétise les relevés terrain en termes d'identification des parties d'ouvrage et en termes de relevé de facteur de vulnérabilité dans les zones d'intensité définies par le SELS pour les phénomènes de type feu de nuage.

Il est rappelé que pour l'ensemble du bâti, il convient de contrôler la perméabilité de la structure. Ce contrôle, réalisé de manière intuitive et visuelle, permet de s'assurer que les gaz pouvant générer un feu de nuage ne peuvent pénétrer facilement dans le bâti avant son inflammation. Si cette condition n'est pas respectée, toute mesure de renforcement du bâti vis-à-vis d'une agression extérieure est inutile, le nuage pouvant s'enflammer à l'intérieur du bâtiment.

Par ailleurs, la durée donnée dans les tableaux est celle du phénomène. Elle est communiquée dans les tableaux MAPINFO et dans les cartes des phénomènes.

¹⁹ Si effets combinés.

	Identification ²⁰	Facteurs de vulnérabilité (SEL-SELS)
Structure non métallique	Matériaux	Néant
Structure métallique porteuse apparente	Matériaux	Facteur de massivité
Bardage métallique (façade et couverture)	Matériaux	Carte des feux de nuage t > 0,5 s : <ul style="list-style-type: none"> Type de bardage Nature des isolants (combustible / non-combustible) pour les bardages simples peau
Structure translucide	Matériaux	Type de verre Matériau châssis
Éléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments	Matériaux	Nature des matériaux Petits éléments ²¹ : <ul style="list-style-type: none"> Nature de l'isolant (épaisseur, combustibilité) et mode de fixation Présence et nature des combles
Éléments non-structuraux : parements, enduit, menuiseries extérieures	Matériaux	Nature des matériaux (combustibilité)
Structures particulières	Matériaux	Matériau

Tableau 6 : Synthèse des relevés terrain – Phénomène de type feu de nuage

PRINCIPES DE L'APPROCHE SOMMAIRE DE LA VULNERABILITE

La détermination des stratégies d'approche de la vulnérabilité afin d'évaluer la capacité à protéger les personnes ou la nécessité de renforcement s'appuie sur :

- La caractérisation de l'agression réalisée ;
- La caractérisation du bâti ;
- Des principes d'approche de la vulnérabilité proposés dans ce chapitre.

Ces principes sont mis en œuvre en fonction du type bâtementaire et de la caractérisation de l'agression. L'approche sommaire permet de distinguer 4 principes pour chaque caractéristique bâtementaire :

- **Cas 1.** La protection des personnes ne nécessite pas de travaux de renforcement ;
- **Cas 2.** La protection des personnes peut être obtenue par la réalisation de travaux ne nécessitant pas d'étude préalable ;

²⁰ Ces éléments sont à relever et à conserver pour assurer la traçabilité de l'étude.

²¹ Si effets combinés

- **Cas 3.** La protection des personnes peut être obtenue par la réalisation de travaux nécessitant au préalable un diagnostic « sommaire » par un bureau d'études « structures » généraliste ;
- **Cas 4.** La protection des personnes nécessite la réalisation d'une étude de vulnérabilité approfondie par un bureau d'études spécialisé afin de définir la faisabilité et les mesures de renforcement possibles.

Les principes énoncés dans le tableau de principes dépendent également de l'agression.

TABLEAU DES PRINCIPES DE L'APPROCHE SOMMAIRE DE LA VULNERABILITE

	(SEL-SELS)
Structure non métallique	Cas 1
Structure métallique porteuse apparente	Cas 4 si massivité > 1500 m ⁻¹ Cas 2 : Facteur de massivité ≤ 250 m ⁻¹ & t ²² > 10 s Facteur de massivité ≤ 500 m ⁻¹ & t > 4,8 s Facteur de massivité ≤ 800 m ⁻¹ & t > 3 s Facteur de massivité ≤ 1500 m ⁻¹ & t > 1s Cas 1 sinon
Bardage métallique (façade et couverture)	Cas 2 : Simple peau et t > 0,5 s Simple peau avec isolant combustible et t > 0,5 s Cas 1 sinon
Structures translucides	Cas 2 Si (verre non trempé et t > 1s) ou si (verre non durci, non trempé et t < 1s) Châssis PVC, Aluminium Cas 1 Verre : trempé ou (durci et t < 1 s) Polymère Châssis bois
Eléments non-structuraux : couvertures petits et grands éléments	Cas 1 (sans surpression) Si effets combinés avec petits éléments : <ul style="list-style-type: none"> • Cas 1 : si interface entre extérieur et dernier volume habité résistante aux effets de pression et non combustible • Cas 2 : sinon
Eléments non-structuraux : parements, enduit, menuiseries extérieures	Cas 1 si matériau non combustible Cas 2 sinon
Structures particulières	Cas 4

Tableau 7 : Tableau des principes de l'approche sommaire de la vulnérabilité – Phénomène de type feu de nuage

²² t : durée du phénomène

En fonction de l'utilisation du tableau de principes présenté dans le paragraphe précédent, les éléments suivants peuvent être mis en évidence :

- La capacité à protéger les personnes sans travaux spécifiques (Cas n°1) ;
- La capacité à protéger les personnes avec des travaux simples ne nécessitant pas l'intervention de bureaux d'études (Cas n°2) ;
- Le recours à une étude spécifique par un bureau d'études spécialisé (Cas n°4).

MOYENS DE RENFORCEMENT DES STRUCTURES VIS-A-VIS DES PHENOMENES DE TYPE FEU DE NUAGE

CAS DU BATI NON SOUMIS A UNE ONDE DE SURPRESSION

Pour les structures métalliques porteuses apparentes :

Si ces éléments sont susceptibles de ruiner, en fonction de leur facteur de massivité et de la durée du phénomène, il conviendra de les traiter soit par flocage, soit par habillage par plaque. A titre d'exemple, il est possible de retenir des propriétés coupe-feu en se basant sur la courbe HydroCarbures Majorante (HCM) en raison de la vitesse du phénomène. Une durée de coupe-feu d'une ½ heure devrait être suffisante.

Pour les bardages :

Bardage simple peau et simple peau avec isolant combustible

Pour un phénomène de durée supérieure à 0,5 seconde, il convient de rajouter une épaisseur d'isolant non combustible ou de remplacer l'isolant en place pour éviter que la température en face non exposée atteigne la température de propagation de l'incendie. Une épaisseur minimale de 5 cm est suffisante pour garantir les températures de non propagation de l'incendie et de tenabilité à l'intérieur du volume coiffé par le bardage pour des durées jusqu'à 10 secondes. Toutefois pour des durées du phénomène strictement supérieures à 4,8 secondes, un traitement externe du panneau, par exemple par flocage, est approprié afin de s'assurer de son intégrité pendant toute la durée du phénomène. Le flocage des surfaces internes peut également constituer une solution alternative à la pose d'un isolant thermique.

Pour les châssis :

Quelque soit la durée du phénomène, les châssis métalliques et PVC peuvent être traités d'une des manières suivantes :

- Soit remplacement par des châssis en bois ;
- Soit application de peintures ou d'enduit adaptés : à faible émissivité ou intumescence ou isolante non inflammable. Si une de ces solutions est retenue, le maintien dans le temps des qualités de la peinture doit être assuré. Par

ailleurs, suivant la nature de la peinture et du matériau du châssis, l'application d'une couche de peinture primaire d'accrochage peut être nécessaire.

Pour les vitrages :

Le risque principal associé au phénomène de type feu de nuage est la pénétration du nuage à l'intérieur du bâti au moment de l'inflammation. Cela pourrait se produire si les contraintes thermiques résultant du feu de nuage provoquent la rupture du vitrage. Pour cette raison, il convient de s'assurer que les niveaux de température atteints sont compatibles avec la tenue des vitres.

L'emploi de verre durci permet de conserver la tenue du vitrage pour les phénomènes d'une durée inférieure ou égale à 1 seconde.

Pour des durées supérieures à 1 seconde, l'emploi de verre trempé est nécessaire.

Pour les doubles ou triples vitrages, le traitement de la vitre extérieure est suffisant pour assurer la tenue de la structure.

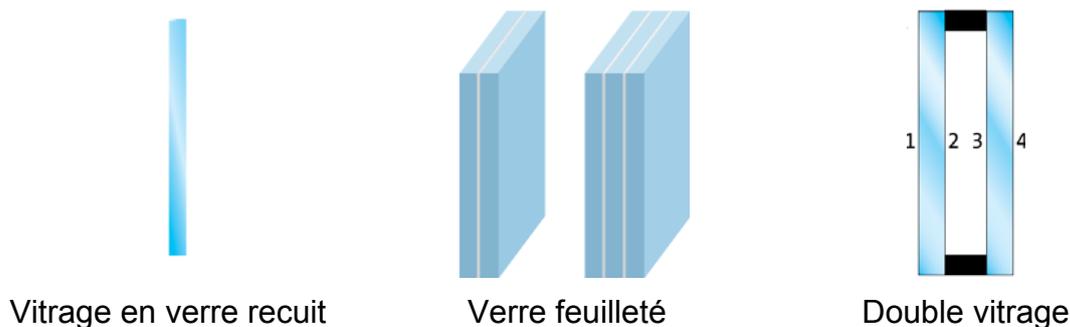


Figure 15 : Type de vitrages

Pour les éléments non-structuraux : parements, enduit, menuiseries extérieures

L'intérêt de cette rubrique réside dans la participation ou non du parement à une propagation d'incendie. Pour ce faire, il conviendra de renseigner la présence éventuelle de parement en matériaux inflammables : bois, polymères...

De prime abord, il n'est pas possible d'identifier un enduit ou une peinture inflammable par une observation extérieure. Toutefois, en zone d'aléa thermique transitoire, il pourra être préconisé, sur des constructions neuves ou lors de rénovations, l'emploi d'enduit ou de peintures ininflammables en extérieur.

CAS DU BATI SOUMIS A UNE ONDE DE SURPRESSION

Pour les éléments non structuraux : petits éléments

Compte tenu du fait qu'à l'exception des obligations techniques liées à la prévention du risque sismique ou à la protection neige et vent, il est déconseillé de solidariser les tuiles à la charpente pour éviter un chargement important de la charpente. Il convient alors de s'assurer que cet arrachement ne va pas laisser l'intérieur du bâti à nu alors qu'il est ensuite soumis à un rayonnement thermique

intense. Cela est possible si l'isolant est maintenu solidaire de la charpente ou s'il se trouve appliqué sur le plancher du comble. Dans ce contexte, il est nécessaire :

1. De s'assurer qu'une interface (isolant ou plancher de type béton ou hourdis) est présente derrière les petits éléments pour jouer le rôle d'écran face au rayonnement thermique après leur envol ;
2. Que cette interface soit non combustible et qu'elle soit solidaire de la structure. Dans le cas d'un isolant, cela signifie qu'il doit être fixé à la charpente de manière solidaire.

Pour le traitement des autres parties d'ouvrage, il est recommandé de s'appuyer sur le cahier applicatif de la vulnérabilité du bâti à la surpression. Toutefois, les points suivants peuvent être plus particulièrement soulignés.

Pour les bardages et couvertures en grands éléments

Les éléments légers, de type panneaux en fibrociment ou en translucide, ne résistant pas à la surpression de bris de verre doivent être remplacés par des éléments plus résistants, dans le respect des autres réglementations (exutoires de désenfumage vis-à-vis de la réglementation incendie, surface ajourée vis-à-vis du code du travail, etc.).

FACES A PRENDRE EN COMPTE

Il est recommandé d'étudier les faces des structures vis-à-vis d'un phénomène thermique de type feu de nuage comme indiqué sur la Figure 16. Le toit des bâtiments doit toujours être pris en compte.

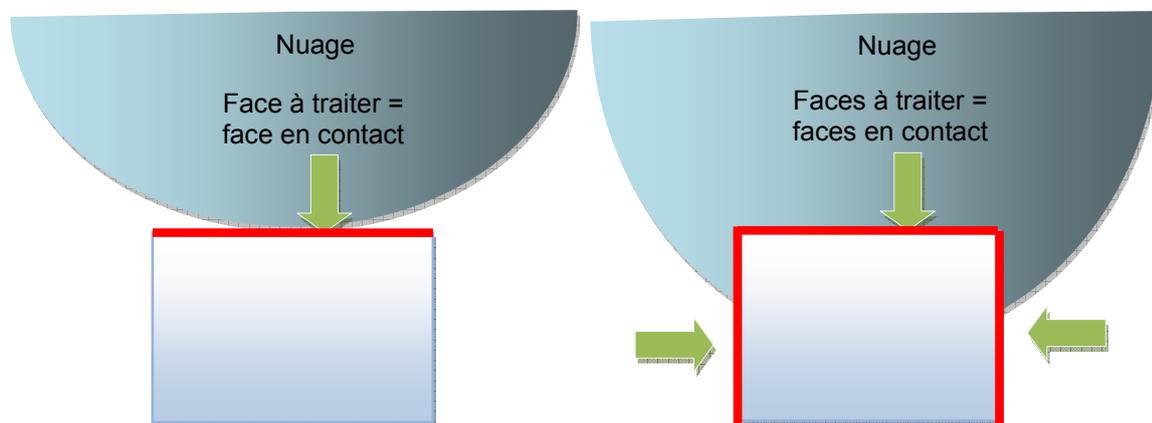


Figure 16 : Faces à prendre en compte vis-à-vis d'un phénomène de type feu de nuage