

# Canalisations de transport

## Guide de détermination des mesures de protection propres aux bâtiments

Version 2  
décembre 2016



**INERIS**

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |

Le présent guide comporte 98 pages, hors couverture et quatrième de couverture

Le présent guide a été établi en application de **l'article 29 de l'arrêté du 5 mars 2014** définissant les modalités d'application du chapitre V du titre V du livre V du Code de l'environnement et portant règlement de la sécurité des canalisations de transport de gaz naturel ou assimilé, d'hydrocarbures et de produits chimiques, publié au Journal Officiel le 25 mars 2014, et modifié par les arrêtés du 11 mai 2015 et du 15 décembre 2016 ; cet arrêté sera dénommé « arrêté multi-fluide » dans la suite du présent guide.

Ce guide est applicable pour la réalisation, sous la responsabilité du maître d'ouvrage, de la partie bâimentaire des **analyses de compatibilité** d'un projet d'aménagement avec l'étude de dangers d'une canalisation de transport du point de vue de la sécurité des personnes, telles que prévues à l'alinéa k de l'article R. 431-16 du Code de l'urbanisme. Il est également applicable par extension pour la réalisation de l'expertise d'une analyse de compatibilité par un organisme habilité, en application du point III de l'article R. 555-31 du Code de l'environnement. Les projets d'aménagement visés par ces analyses de compatibilité sont :

- ❑ l'extension ou la construction d'un **Établissement Recevant du Public (ERP)** de **plus de 100 personnes**,
- ❑ et l'extension ou la construction d'un **Immeuble de Grande Hauteur (IGH)**, dans les zones de **servitudes d'utilité publique** définies autour des canalisations de transport, en application de l'alinéa b de l'article R. 555-30 du Code de l'environnement.

En application de l'article 29 de l'arrêté cité ci-dessus, le présent guide a pour objectif de proposer et d'illustrer une méthode visant à :

- ❑ analyser dans quelle mesure les personnes présentes dans un bâtiment projeté sont **protégées par ce dernier** des effets des phénomènes dangereux consécutifs à une perte de confinement sur la canalisation de transport à l'origine des servitudes ;
- ❑ et proposer le cas échéant des **mesures particulières de renforcement** de la sécurité sur ce bâtiment dans l'objectif de protéger ces personnes de ces effets.

Le deuxième chapitre du présent guide précise le contexte réglementaire et technique des analyses de compatibilité.

Le présent guide a été élaboré par l'INERIS pour le compte du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer.



<b>7</b>	<b><i>Glossaire et définitions</i></b>
<b>10</b>	<b><i>Objet et contenu technique du guide</i></b>
11	<i>objet</i>
12	<i>contenu technique</i>
13	<i>plan</i>
13	<i>limites du champ du guide et de son application</i>
<b>16</b>	<b><i>Contexte réglementaire et technique</i></b>
17	<i>canalisations de transport de gaz, d'hydrocarbures et de produits chimiques</i>
18	<i>risques technologiques liés aux canalisations de transport</i>
19	<i>sécurité des canalisations de transport</i>
20	<i>servitudes d'utilité publiques autour des canalisations de transport</i>
23	<i>maîtrise de l'urbanisation dans ces zones de servitudes</i>
23	<i>analyses de compatibilité</i>
<b>28</b>	<b><i>Processus de réalisation de l'analyse des mesures particulières de protection</i></b>
<b>32</b>	<b><i>Caractérisation des phénomènes dangereux</i></b>
33	<i>sélection des phénomènes dangereux à retenir</i>
34	<i>principes généraux pour la caractérisation des phénomènes dangereux agresseurs</i>
36	<i>phénomènes dangereux générant des effets thermiques</i>
43	<i>phénomènes dangereux générant des effets de surpression</i>
47	<i>phénomènes dangereux générant des effets toxiques ou des effets liés à la concentration</i>
<b>48</b>	<b><i>Protection des personnes - effets thermiques</i></b>
49	<i>critères de vulnérabilité</i>
53	<i>analyse proposée</i>
53	<i>exemples d'application</i>
54	<i>exemples de renforcement</i>
55	<i>cas particulier du flash fire</i>
<b>56</b>	<b><i>Protection des personnes - effets de surpression</i></b>
57	<i>critères de vulnérabilité</i>
58	<i>analyse proposée</i>
62	<i>exemples d'application</i>
63	<i>exemples de renforcement</i>
<b>66</b>	<b><i>Protection des personnes - effets toxiques ou liés à la concentration</i></b>
<b>68</b>	<b><i>Protection des personnes - effets combinés</i></b>
<b>70</b>	<b><i>Annexes</i></b>
71	<i>annexe 1 : principaux phénomènes dangereux rencontrés dans les EDD</i>
82	<i>annexe 2 : exemples d'application - protection effets thermiques</i>
94	<i>annexe 3 : exemples d'application - protection effets surpression</i>

# Table des illustrations

Figure	P.
<b>Figure 1</b> : illustration de l'implantation d'une canalisation de transport	17
<b>Figure 2</b> : carte du réseau de transport de gaz naturel en France métropolitaine	18
<b>Figure 3</b> : vues du feu torche et de la canalisation rompue. Accident survenu sur une canalisation de transport de gaz naturel à Ghislenghien (Belgique) le 30 juillet 2004	19
<b>Figure 4</b> : vues de l'épandage et de l'ouverture sur la canalisation. Accident survenu sur une canalisation de transport de pétrole brut à Saint-Martin-de-Crau (Bouches-du-Rhône) le 7 août 2009	19
<b>Figure 5</b> : représentation des bandes de servitudes liées à la construction et l'exploitation d'une canalisation de transport (d'après articles L. 555-27 et L. 555-28 du Code de l'environnement)	20
<b>Figure 6</b> : représentation des Servitudes d'Utilité Publique liées aux risques accidentels de la canalisation	22
<b>Figure 7</b> : logigramme du processus de maîtrise de l'urbanisation autour des canalisations de transport	24
<b>Figure 8</b> : règles pour la construction ou l'extension d'un ERP de plus de 100 personnes ou d'un IGH dans les zones de Servitudes d'Utilité Publique liées aux risques accidentels de la canalisation	26
<b>Figure 9</b> : processus de réalisation de l'analyse des mesures particulières de protection des personnes accueillies dans les bâtiments	29
<b>Figure 10</b> : positionnement du bâtiment par rapport à la flamme	36
<b>Figure 11</b> : modèle de transfert thermique considéré dans le cas d'une structure non impactée par la flamme	37
<b>Figure 12</b> : modèle de transfert thermique considéré dans le cas d'une structure impactée par la flamme	38
<b>Figure 13</b> : profil du flux thermique incident en fonction de la distance pour une brèche de 12mm (exemple fictif et illustratif)	40
<b>Figure 14</b> : profil du flux thermique incident en fonction de la distance pour une brèche de 70mm (exemple fictif et illustratif)	40
<b>Figure 15</b> : profil du flux thermique incident en fonction de la distance pour une rupture totale (exemple fictif et illustratif)	40
<b>Figure 16</b> : signaux de surpression de type « déflagration » et « détonation »	43
<b>Figure 17</b> : équations des signaux de surpression de type « déflagration » et « détonation »	44
<b>Figure 18</b> : calcul d'un niveau de pression conservatif à partir des distances d'effets présentes dans l'EDD	45
<b>Figure 19</b> : signal de surpression calculé forfaitairement pour l'exemple précédent	46
<b>Figure 20</b> : modèle thermique pour un flux radiatif appliqué sur la paroi d'un bâtiment	53
<b>Figure 21</b> : analogie masse ressort	58
<b>Figure 22</b> : facteur d'amplification dynamique pour un signal de forme triangulaire rectangle ou isocèle	59
<b>Figure 23</b> : dissipation d'énergie dans les domaines élastique équivalent et plastique	60
<b>Figure 24</b> : ressort élasto-plastique équivalent, courbe contrainte-déplacement équivalente	60
<b>Figure 25</b> : taux de ductilité en fonction de $t_d/TN$ et de $r_u$ pour un système masse ressort élasto-plastique à un degré de liberté soumis à un signal de surpression triangulaire isocèle	61
<b>Figure 26</b> : schéma d'un bâtiment industriel (ossature en poteaux-poutres) soumis à une onde de surpression	61
<b>Figure 27</b> : exemple de parpaing (coupe) respectant les exigences minimales pour le renforcement	63
<b>Figure 28</b> : exemple de chemisage (guide CSTB)	64
<b>Figure 29</b> : représentation schématique des différentes contributions au terme source	72
<b>Figure 30</b> : principe de l'inflammation et de la combustion auto-entretenue	78
<b>Figure 31</b> : bâtiment fictif traité dans le cadre de cet exemple	82
<b>Figure 32</b> : évolution de la température en paroi interne du bardage	83
<b>Figure 33</b> : évolution de la température du volume de la pièce	83
<b>Figure 34</b> : évolution de la température en paroi interne du translucide	84
<b>Figure 35</b> : évolution de la température moyenne du vitrage exposé (4 mm)	85
<b>Figure 36</b> : évolution de la température du châssis sur sa face exposée	85
<b>Figure 37</b> : évolution de la température du châssis sur sa face exposée	86
<b>Figure 38</b> : évolution de la température en paroi interne du bardage	86
<b>Figure 39</b> : évolution de la température du volume de la pièce	87
<b>Figure 40</b> : évolution de la température en paroi interne du translucide	87

# Table des illustrations

Figure	P.
Figure 41 : évolution de la température moyenne du vitrage exposé (4mm)	88
Figure 42 : évolution de la température du châssis sur sa face exposée	88
Figure 43 : évolution de la température du châssis sur sa face exposée	89
Figure 44 : bâtiment fictif traité dans le cadre du cas n°2	89
Figure 45 : évolution de la température en paroi externe et interne	90
Figure 46 : évolution de la température dans les ferrillages	90
Figure 47 : évolution de la température dans le parement extérieur en acier	91
Figure 48 : évolution de la température dans l'âme isolante de la porte	91
Figure 49 : évolution de la température dans l'épaisseur d'acier en paroi interne	92
Figure 50 : évolution de la température dans le vitrage directement exposé au flux thermique	92
Figure 51 : évolution de la température en paroi externe et interne	93
Figure 52 : évolution de la température des fers du lit supérieur de la dalle au cours des deux premières heures	93
Figure 53 : signaux de surpression incidents n°1 et n°2, cas n°1	94
Figure 54 : effet de l'ajout d'un poteau de soutien dans le cas n°1, signal de surpression n°1	95
Figure 55 : effet de l'ajout d'un poteau de soutien dans le cas n°1, signal de surpression n°2	96
Figure 56 : caractéristiques du ferrillage du béton armé, cas n°2, surpression 120 mbar	97
Figure 57 : caractéristiques des ferrillages de la dalle de béton armé en toiture, cas n°2, surpression 120 mbar	98

# Liste des tableaux

Tableau	P.
Tableau 1 : largeurs des bandes de servitudes liées à la construction et l'exploitation des canalisations de transport	21
Tableau 2 : distances utilisées pour les Servitudes d'Utilité Publique (pour le tracé courant)	22
Tableau 3 : température de flamme pour certains fluides transportés par canalisation	38
Tableau 4 : type d'échange thermique en fonction du mode d'agression du bâtiment	39
Tableau 5 : détermination d'un signal de surpression forfaitaire (UVCE de type 1)	45
Tableau 6 : détermination d'un signal de surpression forfaitaire (UVCE de type 2)	46
Tableau 7 : objectifs de performance pour l'analyse de la protection des personnes vis à vis des effets thermiques	50
Tableau 8 : résultats illustratifs pour la brèche de 12mm (non applicables à d'autres bâtiments que le bâtiment fictif considéré)	51
Tableau 9 : résultats illustratifs pour la rupture guillotine (non applicables à d'autres bâtiments que le bâtiment fictif considéré)	52
Tableau 10 : objectifs de performance pour la protection des personnes vis à vis des effets de surpression	57
Tableau 11 : niveaux de surpression illustratifs généralement considérés pour obtenir des dégâts	58
Tableau 12 : critères de résistance (selon UFC 3-340-02)	62
Tableau 13 : effets de surpression sur les personnes (arrêté du 29 septembre 2005)	75
Tableau 14 : doses thermiques pour les personnes (arrêté du 29 septembre 2005)	75
Tableau 15 : flux thermiques pour les personnes (arrêté du 29 septembre 2005)	78
Tableau 16 : doses thermiques pour les personnes (arrêté du 29 septembre 2005)	78
Tableau 17 : surpression réfléchie sur les différentes faces du bâtiment, cas n°1, pour le signal 1 et le signal 2	94
Tableau 18 : surpression réfléchie sur les différentes faces du bâtiment considéré dans le cas n°2	97

# Glossaire et définitions

<b>CE :</b>	Code de l'environnement
<b>EDD :</b>	Etude de Dangers
<b>ERP :</b>	Etablissement Recevant du Public
<b>GESIP :</b>	Groupe d'Études de Sécurité des Industries Pétrolières et Chimiques
<b>IGH :</b>	Immeuble de Grande Hauteur
<b>SUP :</b>	Servitudes d'Utilité Publique
<b>ELS :</b>	Effets Létaux Significatifs
<b>PEL :</b>	Premiers Effets Létaux
<b>UVCE :</b>	Unconfined Vapour Cloud Explosion (explosion d'un nuage de gaz non confiné)

## **Canalisation de transport** (source : article R555-1 du code de l'environnement)

Une canalisation de transport comprend une ou plusieurs conduites ou sections de conduites, ainsi que les installations annexes qui contribuent, le cas échéant, à son fonctionnement. Elle achemine des produits liquides ou gazeux à destination de réseaux de distribution, d'autres ouvrages de transport, d'entreprises industrielles ou commerciales, de sites de stockage ou de chargement. (source : article L555-1 du Code de l'environnement). Les canalisations de transport [...] répondent aux caractéristiques suivantes, qu'elles soient aériennes, souterraines ou subaquatiques :

- ▣ **canalisations de transport de gaz naturel ou assimilé** : canalisations transportant soit du gaz naturel, soit un gaz dont les caractéristiques en permettent le transport ou l'injection dans des canalisations de transport de gaz naturel, dans les conditions fixées par le transporteur en application de l'article L. 453-4 du Code de l'énergie ;
- ▣ **canalisations de transport d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés** : canalisations, autres que de transport de gaz naturel ou assimilé, transportant un des produits mentionnés aux tableaux B et C annexés à l'article 265 du Code des douanes ;
- ▣ **canalisations de transport de produits chimiques** : canalisations, autres que de transport de gaz naturel ou assimilé ou d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés, transportant sous forme gazeuse ou liquide un produit ou une matière autre que l'air et l'eau.

## **Transporteur** (source : article R555-1 du CE)

Le transporteur est le propriétaire d'une canalisation sauf, dans le cas d'une canalisation soumise à autorisation, stipulation contraire approuvée par l'autorité compétente pour délivrer l'autorisation.

## **Phénomène dangereux** (source : arrêté multi-fluide)

Pour une taille de brèche donnée (rupture totale, brèche définie par son diamètre équivalent), le phénomène dangereux associé à cette taille de brèche est celui, choisi parmi tous les phénomènes accidentels pouvant être générés par cette brèche, dont l'intensité est maximale, c'est-à-dire qui conduit aux distances d'effets les plus importantes.

## **Mobilité des personnes** (source : INERIS d'après guide EDD)

Éloignement des personnes à l'opposé de la fuite enflammée, après un temps de réaction de quelques secondes.

## **Tracé courant** (source : guide EDD)

Ensemble de l'ouvrage à l'exclusion des points singuliers et des installations annexes (partie enterrée et hors sites clos de l'ouvrage).



### **Point singulier** *(source : arrêté multi-fluide)*

Point ou segment de la canalisation se distinguant de la situation courante des tronçons enterrés et présentant un risque différent du tracé courant, tel qu'un tronçon posé à l'air libre, une traversée de rivière ou un passage le long d'un ouvrage d'art.

### **Installation annexe** *(source : arrêté multi-fluide)*

Équipement ou ensemble d'équipements interconnectés susceptibles de contenir le produit transporté sous pression, et assurant des fonctionnalités complètes telles que le pompage, la compression, le réchauffage, le filtrage, le mélange, l'odorisation, la détente, le mesurage des quantités transportées, le contrôle de la qualité du produit, le sectionnement, la dérivation, la livraison, l'interconnexion avec d'autres canalisations, ou toute autre fonction contribuant de façon directe ou indirecte au transport.

### **Guide EDD**

Guide mentionné à l'article 10 de l'arrêté multi-fluide. Il s'agit du « Guide méthodologique pour la réalisation d'une étude de dangers concernant une canalisation de transport (hydrocarbures liquides ou liquéfiés, gaz naturel ou assimilé et produits chimiques) », référencé « Rapport n°2008/01 - Édition de janvier 2014 ».

### **Établissement Recevant du Public (ERP)**

Bâtiments, locaux et enceintes dans lesquels des personnes sont admises, soit librement, soit moyennant une rétribution ou une participation quelconque, ou dans lesquels sont tenues des réunions ouvertes à tout venant ou sur invitation, payantes ou non. *(source : article R123-2 du code de la construction et de l'habitation)*

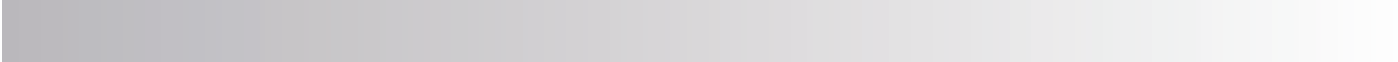
Les établissements sont classés en types, selon la nature de leur exploitation ; par exemple, les magasins de vente et les centres commerciaux sont des ERP de type M. *(source : règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (ERP) approuvé par l'arrêté du 25 juin 1980)*

### **Immeuble de Grande Hauteur (IGH)**

*(source : article R122-2 du Code de la construction et de l'habitation)*

Corps de bâtiment dont le plancher bas du dernier niveau est situé, par rapport au niveau du sol le plus haut utilisable pour les engins des services publics de secours et de lutte contre l'incendie :

- ▣ à 50 mètres pour les immeubles à usage d'habitation [...] ;
- ▣ à plus de 28 mètres pour tous les autres immeubles.



# *Objet et contenu technique du guide*

*11 objet du guide*

*12 contenu technique du guide*

*13 plan du guide*

*13 Limites portant sur le champ du guide et son application*

*13 Limites portant sur le champ du guide*

*14 Limites portant sur l'application du guide*

## Objet et contenu technique du guide

### ERP

Bâtiments, locaux et enceintes dans lesquels des personnes sont admises, soit librement, soit moyennant une rétribution ou une participation quelconque, ou dans lesquels sont tenues des réunions ouvertes à tout venant ou sur invitation, payantes ou non.

### IGH

« Constitue un immeuble de grande hauteur, pour l'application du présent chapitre, tout corps de bâtiment dont le plancher bas du dernier niveau est situé, par rapport au niveau du sol le plus haut utilisable pour les engins des services publics de secours et de lutte contre l'incendie :

- à plus de 50 m pour les immeubles à usage d'habitation
- à plus de 28 m pour tous les autres immeubles ».

**PEL** : premiers effets létaux

**ELS** : effets létaux significatifs

## Objet du guide

L'article 29 de l'arrêté multi-fluide prévoit que les mesures de protection des personnes accueillies dans les bâtiments, qui peuvent être étudiées dans le cadre d'une analyse de compatibilité d'un projet d'aménagement de type Établissement Recevant du Public (**ERP**) ou Immeuble de Grande Hauteur (**IGH**) avec l'étude de dangers d'une canalisation de transport, soient déterminées conformément au présent guide.

Le chapitre « **contexte réglementaire et technique** » **p16** précise le contexte réglementaire et technique de ces analyses de compatibilité.

L'objet du présent guide est donc de proposer et d'illustrer une méthode visant à :

- ❑ réaliser un **diagnostic** des effets accidentels perçus par les personnes présentes dans un bâtiment ; il s'agit d'analyser dans quelle mesure le bâtiment protège ces personnes des effets des phénomènes dangereux consécutifs à une perte de confinement sur la canalisation de transport à l'origine des servitudes ;
- ❑ si ce diagnostic est négatif, **identifier et dimensionner** les mesures possibles de renforcement de la sécurité, dans l'objectif de protéger ces personnes de ces effets.

Cette détermination des mesures de protection propres aux bâtiments est prévue si les mesures particulières de renforcement de la sécurité sur la canalisation ne suffisent pas à rendre le positionnement des phénomènes dangereux acceptables. Dans ce cas, cette analyse est possible, mais elle n'est pas pour autant obligatoire. Si le maître d'ouvrage ne souhaite pas la réaliser, le projet d'aménagement sera alors **INCOMPATIBLE** avec l'étude de dangers de la canalisation.

Cette analyse est prévue notamment dans les configurations suivantes :

- ❑ **pour un ERP sans mobilité (ERP de type J, R, U et tribunes de stades) :**
  - extension d'un ERP existant dont la capacité finale sera comprise entre 101 et 300 personnes, dans la zone des Effets Létaux Significatifs (ELS) du phénomène dangereux réduit sans mobilité ;
  - extension d'un ERP existant dont la capacité finale sera supérieure à 300 personnes, dans la zone des Premiers Effets Létaux (PEL) du phénomène dangereux réduit sans mobilité ;
  - création d'un nouvel ERP dont la capacité finale sera comprise entre 101 et 300 personnes, dans la zone comprise entre les ELS avec mobilité et les ELS sans mobilité du phénomène dangereux réduit ;
  - création d'un nouvel ERP dont la capacité finale sera supérieure à 300 personnes, dans la zone comprise entre les PEL avec mobilité et les PEL sans mobilité du phénomène dangereux réduit ;
- ❑ **pour un ERP avec mobilité :**
  - extension d'un ERP existant dont la capacité finale sera comprise entre 101 et 300 personnes, dans la zone des Effets Létaux Significatifs du phénomène dangereux réduit avec mobilité ;
  - extension d'un ERP existant dont la capacité finale sera supérieure à 300 personnes, dans la zone des Premiers Effets Létaux du phénomène dangereux réduit avec mobilité ;

## Objet et contenu technique du guide

### □ pour un IGH :

- extension d'un IGH existant dans la zone des Premiers Effets Létaux (PEL) du phénomène dangereux réduit sans mobilité ;
- création d'un nouvel IGH dans la zone comprise entre les PEL avec mobilité et les PEL sans mobilité du phénomène dangereux réduit.

## Contenu technique du guide

Ce document présente une méthode d'étude de la vulnérabilité des personnes situées au sein de bâtiments de type IGH ou ERP vis-à-vis des agressions accidentelles issues des canalisations de transport les plus courantes, à savoir les effets thermiques et les effets de surpression.

Il s'avère que vis-à-vis de ces effets, la protection des personnes est directement liée au comportement du bâtiment qui les abrite.

Ainsi, le premier objectif de cette étude est de fournir des éléments de méthodologie afin de permettre à son utilisateur de réaliser un diagnostic précis du comportement de la construction vis-à-vis des phénomènes dangereux considérés.

Les effets toxiques, ainsi que les effets liés à la concentration pour certains gaz (oxygène, azote, dioxyde de carbone) sont également abordés mais leur prise en compte ne fait pas l'objet d'un développement spécifique, en raison notamment :

- de la **faible proportion** de canalisations transportant ce type de produits sur le territoire national,
- de l'**hétérogénéité** des hypothèses de rejet d'une part et des configurations bâtementaires spécifiques (ex. conditions de ventilation) d'autre part.

Ces effets devront faire l'objet d'une étude au cas par cas.

Par ailleurs, les effets de projection ou les effets liés à la pression du fluide en cas de fuite ne sont pas abordés, bien qu'ils puissent être observés lors d'accidents impliquant des canalisations de transport, par analogie avec les principes adoptés dans les études de vulnérabilité autour des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement.

Différents **exemples** portant sur des configurations classiques et représentatives de cas couramment rencontrés, sont présentés afin d'illustrer au mieux les méthodologies explicitées.

Dans le présent document, les éléments relatifs aux phénomènes dangereux issus des canalisations de transport sont établis conformément au « guide pour la réalisation des études de dangers des canalisations de transport ». Ce guide sera dénommé « guide EDD » dans la suite du présent guide.

Ainsi, les évènements redoutés considérés dans le présent document sont :

- des **brèches** allant de 5 à 70 mm,
- des **ruptures totales**.

Le comportement de plusieurs structures bâtementaires est étudié en prenant en compte différents critères de tenue utilisés de façon habituelle dans les études de vulnérabilité, à savoir :

- des critères de **tenue mécanique** vis-à-vis des phénomènes de surpression,

## Objet et contenu technique du guide

- ❑ des critères d'**effondrement**, de **dégradation**, d'**inflammation** et de **dose transmise** vis-à-vis des phénomènes thermiques.

Ces critères sont présentés et justifiés dans la suite du présent guide.

### Plan du guide

Le présent guide est organisé autour des chapitres suivants :

- ❑ Objet et contenu technique du guide
- ❑ Contexte réglementaire et technique du guide
- ❑ Processus de réalisation de la détermination des mesures particulières de protection des personnes accueillies dans les bâtiments,
- ❑ Caractérisation des phénomènes dangereux,
- ❑ Analyse de la protection des personnes vis-à-vis des effets thermiques,
- ❑ Analyse de la protection des personnes vis-à-vis des effets de surpression,
- ❑ Analyse de la protection des personnes vis-à-vis des effets toxiques et des effets de concentration,
- ❑ Analyse de la protection des personnes vis-à-vis des effets combinés.

### Limites du champ du guide et de son application

#### Limites portant sur le champ du guide

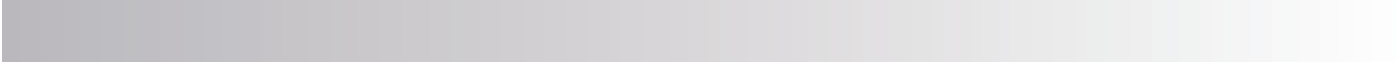
- ❑ Le présent guide **ne couvre pas** toutes les étapes de réalisation de l'analyse de compatibilité d'un projet d'aménagement avec les études de dangers d'une canalisation de transport :
  - Ce guide concerne *uniquement l'étape de détermination des mesures particulières* de protection des personnes accueillies dans les bâtiments ;
  - Notamment, ce guide ne traite *pas de l'étape précédente*, qui consiste à prouver l'acceptabilité des risques via le positionnement des phénomènes dangereux dans les matrices de risque ;
  - L'utilisateur de ce guide est supposé avoir conduit toutes les étapes précédentes de l'analyse de compatibilité conformément aux principes de l'arrêt multi-fluide.
- ❑ Le guide contient, de par son objet, des dispositions générales et ne peut en aucun cas répondre aux besoins spécifiques de chaque professionnel.
- ❑ Les principes génériques exposés dans ce guide sont basés sur les configurations qui sont rencontrées **le plus fréquemment**, qu'il s'agisse des canalisations de transport ou des bâtiments. Il est toutefois possible que d'autres configurations, non prévues dans ce guide, existent.
- ❑ Les exemples ont été construits sur la base de caractéristiques bâlimentaires qui ont parfois été choisies de façon **pénalisante**, dans le cadre d'une approche **conservative**.
- ❑ Le contenu de ce guide a été établi sur la base des données (scientifiques ou techniques) **objectives** et **disponibles** à la date de son édition, en matière de modélisation des phénomènes dangereux, de données constructives des

## Objet et contenu technique du guide

bâtiments et de résistance des structures aux effets accidentels. Une évolution de cet état de l'art pourrait rendre ces exemples caducs.

### Limites portant sur l'application du guide

- ❑ Le présent guide s'adresse à des professionnels pour les aider dans la mise en place de leur projet en dehors de toute étude particulière confiée à l'INERIS.
- ❑ Le présent guide a pour objectif de guider les bureaux d'étude dans la **définition des données d'entrée** pour la conception et le dimensionnement des bâtiments vis-à-vis des effets accidentels pouvant être générés par des canalisations de transport. Son application ne peut se substituer aux études techniques nécessaires pour la conception et la construction de ces bâtiments.
- ❑ Les mesures constructives obtenues des principes de calculs proposés dans ce guide ne constituent **en aucun cas** les éléments définitifs d'un cahier des charges techniques. Ces derniers devront être validés par un bureau d'étude habilité dans le domaine de la construction avant de lancer les travaux éventuels.
- ❑ L'application du présent guide **ne peut se substituer** au respect des réglementations, normes et règles de conception, de construction et d'exploitation des bâtiments visant à garantir la sécurité et le confort des personnes présentes dans les ERP ou les IGH.
- ❑ Les méthodes d'évaluation du comportement des structures bâtementaires présentes dans ce document ont pour unique objectif l'**analyse de la protection des personnes**. Son utilisation n'est pas adaptée pour tout autre objectif que celui-ci.
- ❑ Les méthodes proposées dans le présent guide ont une **vocation informative et non pas prescriptive** : des approches alternatives reposant sur une argumentation technique pourront être développées dans les analyses de compatibilité. C'est notamment le cas pour les configurations qui s'écarteraient des hypothèses génériques sur lesquelles sont fondées les approches méthodologiques proposées. Ces approches alternatives pourront utilement faire l'objet d'une tierce-expertise par un organisme habilité.
- ❑ Les exemples proposés ont vocation à **illustrer les méthodes proposées**, et ne peuvent pas être généralisés à d'autres configurations supposées similaires; une étude au cas par cas est systématiquement requise.
- ❑ L'application de ce guide n'a **en aucun cas** pour objectif de se substituer au pouvoir de décision du ou des gestionnaire(s) du risque ou d'une partie prenante.





# Contexte *réglementaire et technique du guide*

- 17 *Canalisations de transport de gaz naturel ou assimilé, d'hydrocarbures et de produits chimiques*
- 18 *Risques technologiques liés aux canalisations de transport*
- 19 *Sécurité des canalisations de transport*
- 20 *Servitudes d'utilité publique au voisinage des canalisations de transport*
  - 20 *servitudes liées à la construction et à l'exploitation de la canalisation*
  - 21 *servitudes liées au risques accidentels de la canalisation*
- 23 *Maîtrise de l'urbanisation dans les zones de servitudes d'utilité publique liées aux canalisations de transport*
- 23 *Analyses de compatibilité*

## Canalisations de transport de gaz naturel ou assimilé, d'hydrocarbures et de produits chimiques

La France dispose d'un réseau de canalisations de transport de gaz naturel ou assimilé, d'hydrocarbures et de produits chimiques de plus de 50 000 km de longueur, répartis comme suit :

- 73% pour le gaz naturel ou assimilé,
- 19% pour les produits pétroliers (pétrole brut et produits raffinés),
- 8% pour les produits chimiques (éthylène, oxygène, azote, hydrogène, ...)

Ces canalisations servent à acheminer des produits liquides ou gazeux à destination de réseaux de distribution, d'autres canalisations de transport, d'entreprises industrielles ou commerciales, de sites de stockages ou de chargement.

La plus grande partie de ces canalisations, dont le diamètre peut aller d'une dizaine de centimètres jusqu'à 1,20 mètre, est enterrée à 80 cm de profondeur en moyenne, à l'exception des organes nécessaires à leur exploitation, qui constituent les installations annexes (postes de pompage, de compression, de détente, de sectionnement, d'interconnexion ...).

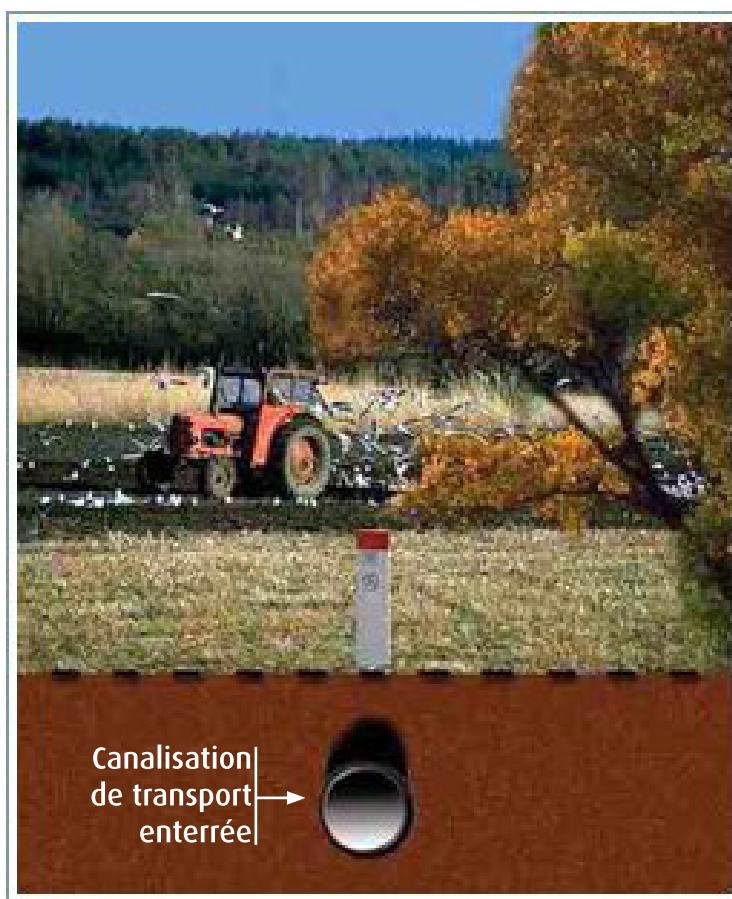


Figure 1 : Illustration de l'implantation d'une canalisation de transport (source : [www.trapil.fr](http://www.trapil.fr))

Les exploitants des canalisations de transport sont dénommés « **transporteurs** ».

La carte ci-après présente le réseau de transport de gaz naturel sur le territoire métropolitain.

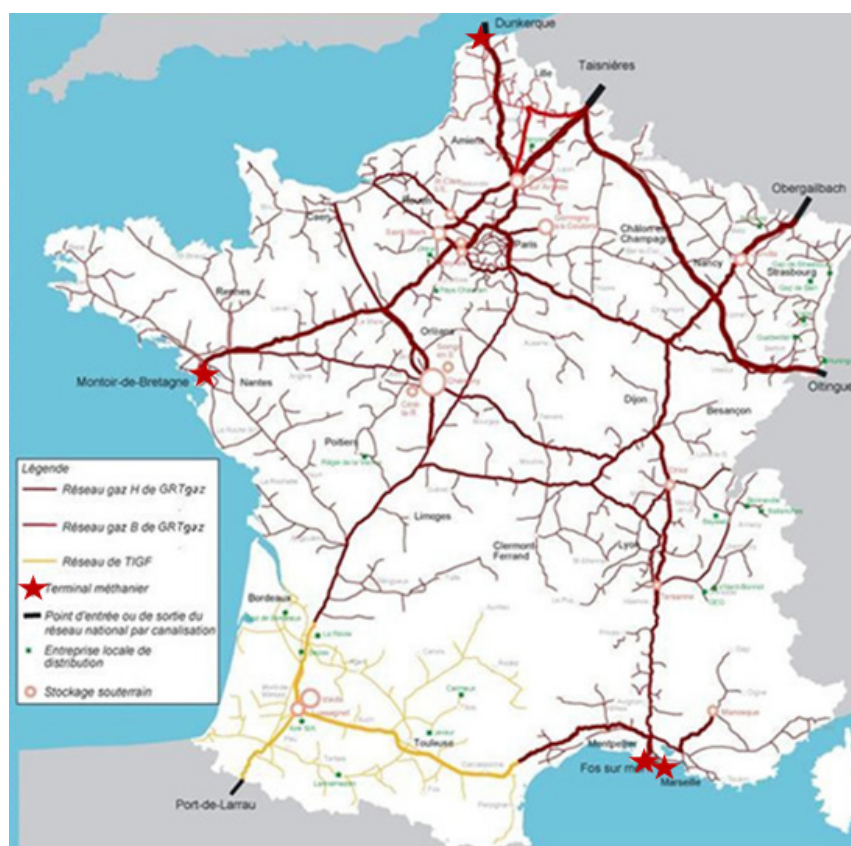


Figure 2 : Carte du réseau de transport de gaz naturel en France métropolitaine (source : [www.cre.fr](http://www.cre.fr))

## Risques technologiques liés aux canalisations de transport

Ces canalisations de transport constituent le moyen le plus sûr de transporter des matières dangereuses par voie terrestre. Toutefois, elles peuvent subir des pertes de confinement accidentelles, dont les principales causes sont :

- ▣ des **travaux d'excavation** à proximité de la canalisation,
- ▣ des phénomènes de **corrosion externe**,
- ▣ des phénomènes de **corrosion interne** (si le fluide transporté est corrosif),
- ▣ des **défauts** de matériau ou de construction,
- ▣ ou encore des **événements naturels** tels que la foudre, les mouvements de terrain, les inondations ...

Au cours de ces dernières années, il s'est produit en moyenne **15 fuites par an** sur l'ensemble du réseau national de transport par canalisations (hors canalisations de transport de saumure).

Compte-tenu de la nature des fluides transportés (gaz ou liquides à caractère inflammable ou toxique) et des volumes relâchés, les **pertes de confinement** peuvent générer des **phénomènes dangereux** (incendie, explosion, nuage toxique, pollution ...) d'ampleur significative en termes d'atteintes aux personnes, aux biens et à l'environnement, comme l'illustrent les deux exemples d'accidents récents ci-après.



Figure 3 : Vues du feu torche et de la canalisation rompue, accident sur une canalisation de transport de gaz naturel à Ghislenghien (Belgique) le 30 juillet 2004. (source : [www.aria.developpement-durable.gouv.fr](http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr))



Figure 4 : Vues de l'épandage et de l'ouverture sur la canalisation, accident sur une canalisation de transport de pétrole brut à Saint-Martin-de-Crau (Bouches-du-Rhône) le 7 août 2009 (source : [www.aria.developpement-durable.gouv.fr](http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr))

## La sécurité des canalisations de transport

En France, la sécurité des canalisations de transport est réglementée notamment par :

- ❑ la **section 2 du Chapitre IV du Livre V du Titre V** du Code de l'environnement intitulée « Sécurité des canalisations de transport et de distribution à risques » (articles L554-5 à L554-9, articles R554-40 à R554-60 en préparation) ;
- ❑ le **Chapitre V du Titre V du Livre V du même Code**, intitulé « Canalisations de transport de gaz naturel ou assimilé, d'hydrocarbures et de produits chimiques » (articles L555-1 à L555-30, articles R555-1 à R555-53, en cours de révision) ;
- ❑ l'**arrêté du 5 mars 2014** définissant les modalités d'application du chapitre V du titre V du livre V du Code de l'environnement et portant règlement de la sécurité des canalisations de transport de gaz, d'hydrocarbures et de produits chimiques, publié au Journal Officiel le 25 mars 2014, modifié par les arrêtés du 11 mai 2015 et du 15 décembre 2016, dit « arrêté multi-fluide » ;

## Contexte réglementaire et technique du guide

- les **différents guides professionnels** ou **méthodologiques** mentionnés dans l'arrêté cité au point précédent, qui permettent de répondre aux exigences de cet arrêté.

Cette réglementation a notamment pour objet :

- l'encadrement des **procédures d'autorisation** (intégrant la police de l'eau) et des procédures de déclaration d'utilité publique relatives à la construction et l'exploitation des canalisations de transport ;
- la définition des **règles relatives à la sécurité**, à la protection de l'environnement et au contrôle applicables à ces ouvrages, durant les phases de conception, construction, pose, mise en service, exploitation, surveillance, maintenance, arrêt temporaire et définitif ;
- la définition des **règles particulières** applicables aux canalisations relevant du service public de l'énergie ;
- l'établissement des règles de **maîtrise de l'urbanisation** à proximité des canalisations de transport ;
- et la fixation du **régime de redevances** d'occupation du domaine public.

## Les servitudes d'utilité publique autour des canalisations de transport

Les canalisations de transport font l'objet de deux catégories différentes de Servitudes d'Utilité Publique (SUP), qui s'appliquent tout le long de leur tracé :

- des bandes de servitudes liées à la **construction et l'exploitation** de la canalisation,
- des bandes de servitudes liées aux risques accidentels.

### Servitudes liées à la construction et l'exploitation de la canalisation

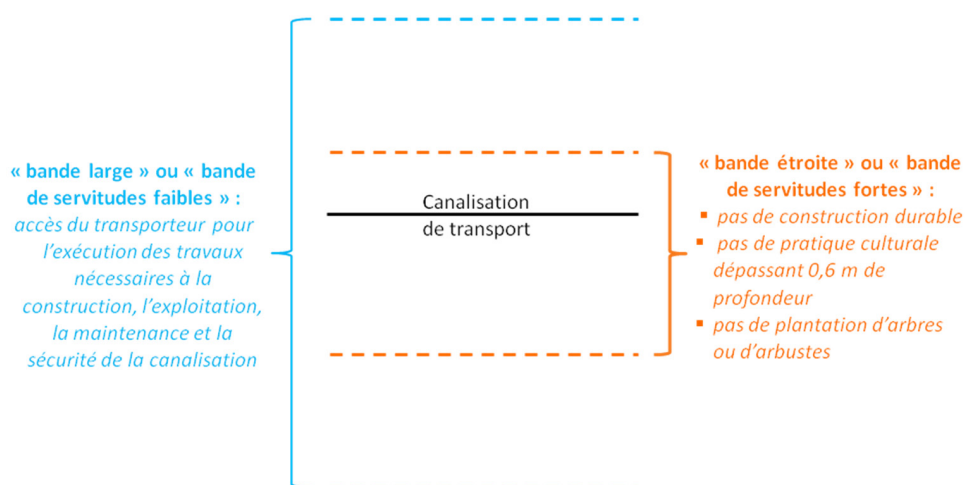


Figure 5 : Bandes de servitudes liées à la construction et l'exploitation d'une canalisation de transport (source : INERIS d'après articles L. 555-27 et L. 555-28 du CE)

Les largeurs de ces bandes de servitudes, qui ne sont pas forcément centrées sur la canalisation, sont fixées dans la déclaration d'utilité publique, selon la demande du transporteur, dans le respect des valeurs limites rappelées dans le tableau ci-après :

Fluide transporté	Canalisation de transport nouvelle		Canalisation de transport en service	
	Bande étroite	Bande large	Bande étroite	Bande large
Gaz naturel ou assimilé	Largeur comprise entre 5 et 20 mètres	Largeur supérieure à la largeur de la bande étroite	Pas d'encadrement réglementaire (2 à 5 mètres en pratique)	Pas d'encadrement réglementaire
Hydrocarbures			5 mètres	Largeur fixée par la déclaration d'utilité publique, sans pouvoir dépasser 20 m
Produits chimiques			5 mètres	Largeur fixée par la déclaration d'utilité publique, sans pouvoir dépasser 20 m

**Tableau 1 : Largeurs des bandes de servitudes liées à la construction et l'exploitation des canalisations de transport**

### Servitudes liées aux risques accidentels de la canalisation

Les Servitudes d'Utilité Publique liées aux risques accidentels délimitent les zones dans lesquelles des règles de maîtrise de l'urbanisation s'appliquent autour des canalisations de transport. Ces Servitudes d'Utilité Publique sont instaurées par le Préfet dans chaque département :

- ☐ **avant la mise en service** pour une canalisation de transport **nouvelle**,
- ☐ **depuis 2014** pour toute canalisation de transport **en service** (ce processus s'étale sur plusieurs années).

Ces servitudes sont définies comme suit :

- ☐ **SUP n°1** : distance aux *Premiers Effets Létaux (PEL)* du *phénomène dangereux majorant* sans mobilité des personnes ;
- ☐ **SUP n°2** : distance aux *Premiers Effets Létaux (PEL)* du *phénomène dangereux réduit* avec mobilité des personnes ;
- ☐ **SUP n°3** : distance aux *Effets Létaux Significatifs (ELS)* du phénomène dangereux réduit avec mobilité des personnes.

## Contexte réglementaire et technique du guide

### Note

L'article 11 de l'arrêté « multi-fluide » définit exhaustivement les phénomènes dangereux majorant et réduit pour tous les cas possibles. Il précise également le critère de choix du phénomène dangereux pour l'analyse de compatibilité.

### Note

L'annexe 4 et l'annexe 9 du « guide EDD » précisent certaines des distances utilisées pour l'établissement des Servitudes d'Utilité Publique liées aux risques des canalisations.

Ces servitudes sont représentées sur la figure ci-après :

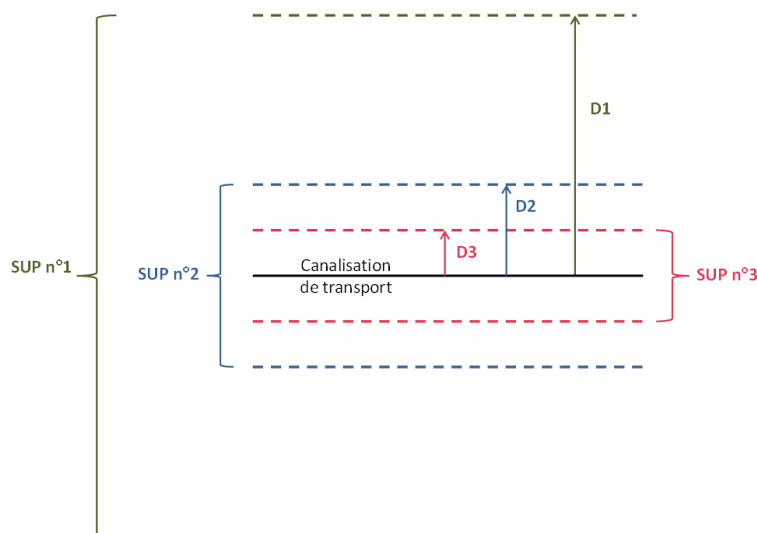


Figure 6 : Représentation des Servitudes d'Utilité Publique liées aux risques accidentels de la canalisation (source : INERIS d'après arrêté multi-fluide)

Les distances servant à établir les Servitudes d'Utilité Publique (notées D1, D2 et D3 sur la **Figure 6**) sont les distances d'effets sur les personnes des phénomènes dangereux majorant et réduit en cas de perte de confinement sur la canalisation.

Ces distances d'effets, qui sont reportées de part et d'autre de la canalisation, sont déterminées dans l'**étude de dangers** de la canalisation de transport.

L'étude de dangers est établie conformément au guide professionnel mentionné à l'article 10 de l'arrêté multi-fluide, dit « guide EDD » :

- ☐ **avant** la mise en service de toute canalisation de transport **nouvelle**,
- ☐ à chaque **modification notable** de la canalisation de transport ou de son environnement, et au moins tous les 5 ans, pour une canalisation en service.

Le tableau ci-après rappelle ces distances pour quelques fluides en tracé courant.

		Gaz naturel	Hydrocarbures liquides	Ethylène	Hydrogène
SUP 1	Phénomène dangereux majorant	Rupture totale	Brèche de 70 mm	Rupture totale	Rupture totale
	Distance D1 (PEL sans mobilité)	10 à 720 m (*)	(**)	240 à 390 m (*)	30 à 60 m (*)
SUP 2	Phénomène dangereux réduit	Brèche de 12 mm	Brèche de 12 mm	Brèche de 12 mm	Brèche de 12 mm
	Distance D2 (PEL avec mobilité)	5 m	15 m	30 à 55 m	10 à 15 m (*)
SUP 3	Phénomène dangereux réduit	Brèche de 12 mm	Brèche de 12 mm	Brèche de 12 mm	Brèche de 12 mm
	Distance D3 (ELS avec mobilité)	5 m	10 m	25 à 45 m	10 m

(\*) selon la pression maximale de service de la canalisation et son diamètre.

(\*\*) Le guide EDD ne précise pas de distances génériques ; la distance d'effet est alors à rechercher dans l'étude de dangers de la canalisation.

Tableau 2 : Distances utilisées pour les Servitudes d'Utilité Publique (pour le tracé courant)

### Note

Les autres projets d'aménagement (maisons individuelles, voiries, parcs et jardins, immeubles autres qu'un IGH, établissements recevant du public de moins de 100 personnes, ...) n'ont pas de contraintes liées aux risques générés par les canalisations de transport dans ces zones de servitudes.

Par ailleurs, ces règles d'urbanisme s'appliquent également aux ERP de plus de 100 personnes déjà ouverts au public et aux IGH déjà en service qui font l'objet d'un projet d'extension.

Les distances d'effets à retenir pour les Servitudes d'Utilité Publique autour des canalisations aériennes et des installations annexes font également l'objet de tableaux spécifiques dans le guide EDD, avec des phénomènes dangereux et des distances qui diffèrent du tracé courant.

## La maîtrise de l'urbanisation dans les zones de servitudes d'utilité publique liées au risques accidentels des canalisations

Dans les zones de servitudes liées aux risques accidentels des canalisations de transport, décrites au deuxième point du paragraphe précédent (**p21**), les règles d'urbanisme concernent uniquement :

- ❑ la **création ou l'extension des ERP de plus de 100 personnes** (avec une différence selon que l'effectif est supérieur ou non à 300 personnes)
- ❑ et la **création ou l'extension des IGH**.

Pour **ces projet d'aménagement**, dans la zone dite « **SUP n°1** », les règles d'urbanisme consistent :

- ❑ d'une part à **interdire leur implantation** au plus près de la canalisation,
- ❑ d'autre part, dans les zones plus éloignées de la canalisation, à subordonner la délivrance du permis de construire à la fourniture d'une **analyse de compatibilité** du projet avec l'étude de dangers de la canalisation.

Cette analyse de compatibilité est à la charge du **maître d'ouvrage** porteur du projet d'aménagement, en liaison avec le transporteur.

Le processus de réalisation d'une telle analyse de compatibilité est présenté au paragraphe suivant.

## Les analyses de compatibilité

Ce paragraphe a pour objet de décrire les différentes étapes des analyses de compatibilité de manière à situer dans celles-ci à quel moment et à quelles conditions peut être réalisée une détermination des **mesures particulières de protection des personnes accueillies dans le ou les bâtiment(s) projetés**.

Le processus de maîtrise de l'urbanisation associé à un projet d'aménagement de type ERP de plus de 100 personnes ou de type IGH dans les zones de Servitudes d'Utilité Publique d'une canalisation de transport est présenté sur le **logigramme ci-contre**.

L'**analyse de compatibilité** (du projet d'aménagement avec l'étude de dangers de la canalisation) est au centre de ce processus. Elle est réalisée selon les modalités définies dans l'arrêté multi-fluide :

- ❑ l'annexe 3 de cet arrêté constitue le formulaire CERFA n°15016\*01, que le maître d'ouvrage, porteur du projet d'aménagement, doit utiliser pour demander au transporteur les **éléments utiles issus de l'étude de dangers** de la canalisation concernée ;
- ❑ l'annexe 4 de cet arrêté constitue la trame que le transporteur doit utiliser pour **fournir au maître d'ouvrage** les éléments utiles de l'étude de dangers de la canalisation concernée ;



## Contexte réglementaire et technique du guide

et enfin, l'annexe 5 de cet arrêté constitue le **dossier récapitulatif** de l'analyse de compatibilité.

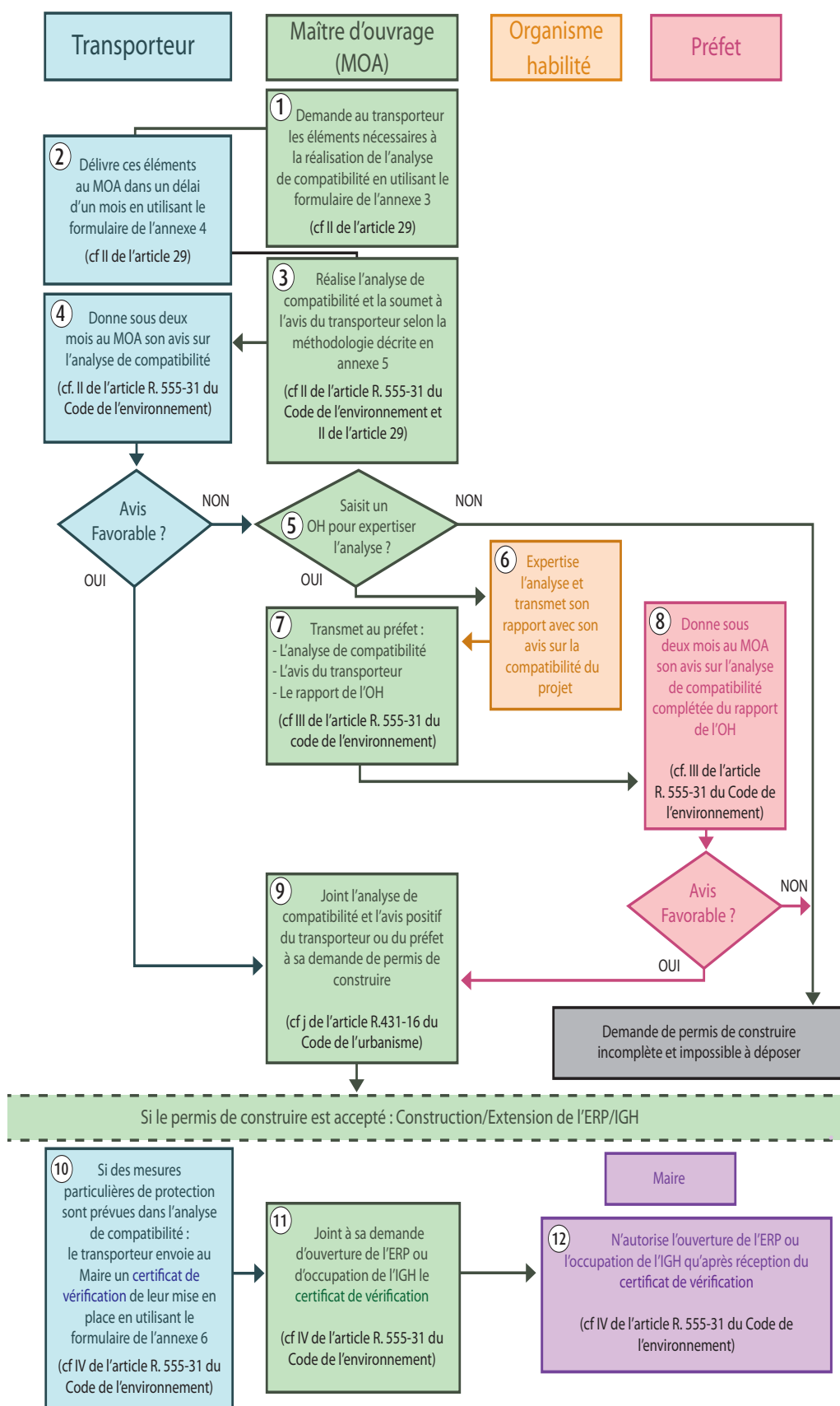


Figure 7 : Logigramme illustrant le processus de maîtrise de l'urbanisation autour des canalisations de transport (annexe 2 de l'arrêté multi-fluide)

## Contexte réglementaire et technique du guide

### Rappel

**PEL** : premiers effets létaux

**ELS** : effets létaux significatifs

La première étape de l'analyse de compatibilité consiste à **vérifier le positionnement du projet** d'aménagement par rapport aux différentes zones conditionnant la compatibilité du projet à l'intérieur de la zone dite « SUP n°1 ».

Ces zones sont établies sur la base des distances d'effets aux ELS et aux PEL des phénomènes dangereux majorant et réduit déterminées dans l'étude de dangers de la canalisation concernée.

Le positionnement du projet d'aménagement consiste à déterminer dans quelle zone sera situé ce projet en considérant la distance minimale entre la canalisation et la façade du projet qui en est la plus proche.

La **définition des zones** dépend de trois critères :

- ❑ la **capacité** du projet d'aménagement (inférieure ou non à 300 personnes) ;
- ❑ le fait que le projet soit une construction **neuve** ou l'**extension** d'un bâtiment existant ;
- ❑ et la **mobilité** des personnes accueillies.

Les deux premiers critères sont à la main du maître d'ouvrage.

Le troisième critère en revanche doit être déterminé selon les règles énoncées dans l'arrêté multi-fluide :

- ❑ les établissements **difficilement évacuables**, dits « **sans mobilité** », sont identifiés comme suit :
  - les ERP de *type J* (Structures d'accueil pour personnes âgées et personnes handicapées),
  - les ERP de *type R* (Établissements d'éveil, d'enseignement, de formation, centres de vacances, centres de loisirs sans hébergement), c'est-à-dire les établissements où le public accueilli est constitué d'enfants,
  - les ERP de *type U* (Établissements sanitaires), c'est-à-dire les hôpitaux, les centres de soins etc ...
  - les *tribunes de stades*,
  - et les *Immeubles de Grande Hauteur*.

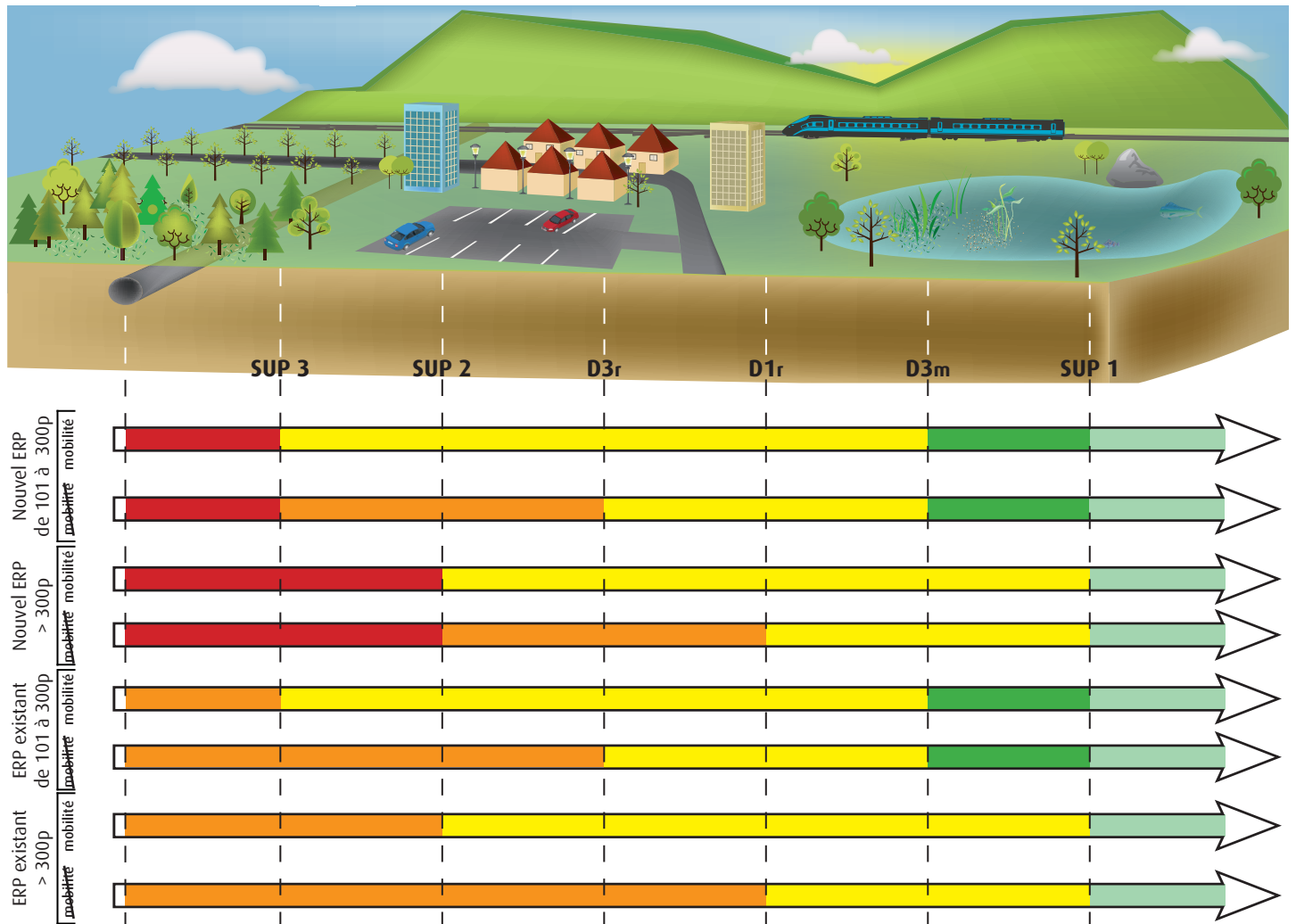
Pour ces bâtiments, il est logiquement considéré que les distances d'effets doivent être calculées **sans appliquer l'hypothèse de mobilité** des personnes.

- ❑ Les autres bâtiments sont dits « **avec mobilité** » par défaut ; l'application de l'hypothèse de mobilité doit toutefois être justifiée au cas par cas dans le cadre de l'analyse de compatibilité.

Par ailleurs, le temps d'évacuation de ces bâtiments peut être un paramètre important à prendre en compte dans le cadre du présent guide comme précisé au paragraphe « **principes généraux de caractérisation** » **p34**.

La combinaison de ces trois critères conduit à huit configurations possibles, qui sont représentées sur la figure ci-après.

## Contexte réglementaire et technique du guide



**Figure 8 : Règles pour la construction ou l'extension d'un ERP de plus de 100 personnes ou d'un IGH dans les zones de Servitudes d'Utilité Publique liées aux risques accidentels de la canalisation (source : INERIS d'après arrêté multi-fluide)**

La suite de l'analyse de compatibilité est conditionnée par le positionnement du projet d'aménagement par rapport aux zones représentées ci-avant :

- Un positionnement en **zone VERTE** signifie que le projet d'aménagement est **COMPATIBLE** avec l'étude de dangers de la canalisation sans condition supplémentaire. Pour autant, le dossier récapitulatif de l'annexe 5 de l'arrêté « multi-fluide » doit être renseigné par le maître d'ouvrage et suivre le processus représenté sur la **Figure 7**.
- Un positionnement en **zone JAUNE** signifie que le projet d'aménagement est **COMPATIBLE** avec l'étude de dangers de la canalisation si l'acceptabilité des risques est prouvée via le **positionnement** des phénomènes dangereux dans les **matrices de risque**, selon les trois étapes suivantes :

- Un premier positionnement est réalisé en tenant compte des mesures compensatoires *déjà mises en œuvre* par le transporteur pour protéger la canalisation ;
  - Si ce positionnement est *acceptable*, l'acceptabilité des risques est prouvée ;
  - Si ce positionnement n'est *pas acceptable*, des mesures particulières de protection complémentaires, visant à renforcer la sécurité de la canalisation, peuvent être proposées par l'aménageur, éventuellement sur la base d'un dialogue avec le transporteur ;
- Un positionnement en **zone ORANGE** signifie que le projet d'aménagement est **COMPATIBLE** avec l'étude de dangers de la canalisation si :
- l'acceptabilité des risques est **prouvée** via le positionnement des phénomènes dangereux dans les matrices de risque, selon la même démarche que pour le positionnement en zone jaune ;
  - **et** si une **étude de la protection** offerte par le bâtiment aux personnes accueillies a été **réalisée**, et les éventuelles **mesures de renforcement** du bâtiment **déterminées** par cette étude ont été prises en compte dans sa conception, sa construction et son exploitation.
- Un positionnement en **zone ROUGE** signifie que le projet d'aménagement est **INCOMPATIBLE** avec l'étude de dangers de la canalisation. Le permis de construire ne pourra pas être accordé.

Pour rappel, un positionnement du projet en dehors de la SUP1 (en **VERT CLAIR** sur la **Figure 8**) ne nécessite pas la réalisation d'une analyse de compatibilité.

Enfin, il est rappelé que, conformément à la **Figure 7** :

- l'analyse de compatibilité est soumise à **l'avis du transporteur** :
- en cas d'*avis favorable* de celui-ci, elle est jointe par le maître d'ouvrage à la demande de permis de construire ;
  - en cas d'*avis défavorable* de celui-ci, le maître d'ouvrage peut saisir un Organisme Habilité afin de réaliser l'expertise de l'analyse de compatibilité. Il transmet alors au Préfet l'analyse de compatibilité, l'avis du transporteur et le rapport de l'Organisme Habilité.
- Le Préfet donne un avis sur ces documents. S'il est favorable, le maître d'ouvrage joint l'ensemble du dossier à sa demande de permis de construire.
- le permis de construire est accordé uniquement si l'analyse de compatibilité est assortie d'un avis favorable du transporteur ou du Préfet ;
- si des mesures particulières de renforcement de la sécurité de la canalisation sont nécessaires pour rendre le projet compatible, le maître d'ouvrage doit joindre le **certificat de vérification** de la mise en place de ces mesures, signé par le transporteur, à sa demande d'ouverture (ERP) ou d'occupation (IGH).

# *Processus de réalisation*

*de l'analyse des mesures particulières de protection  
des personnes accueillies dans les bâtiments*

# Processus de réalisation

## de l'analyse des mesures particulières de protection des personnes accueillies dans les bâtiments

Le processus proposé dans le présent guide pour la réalisation de l'analyse des mesures particulières de protection des personnes accueillies dans les bâtiments, dans le cadre de l'analyse de compatibilité d'un projet d'aménagement avec l'étude de dangers d'une canalisation de transport, est schématisé sur la figure suivante :

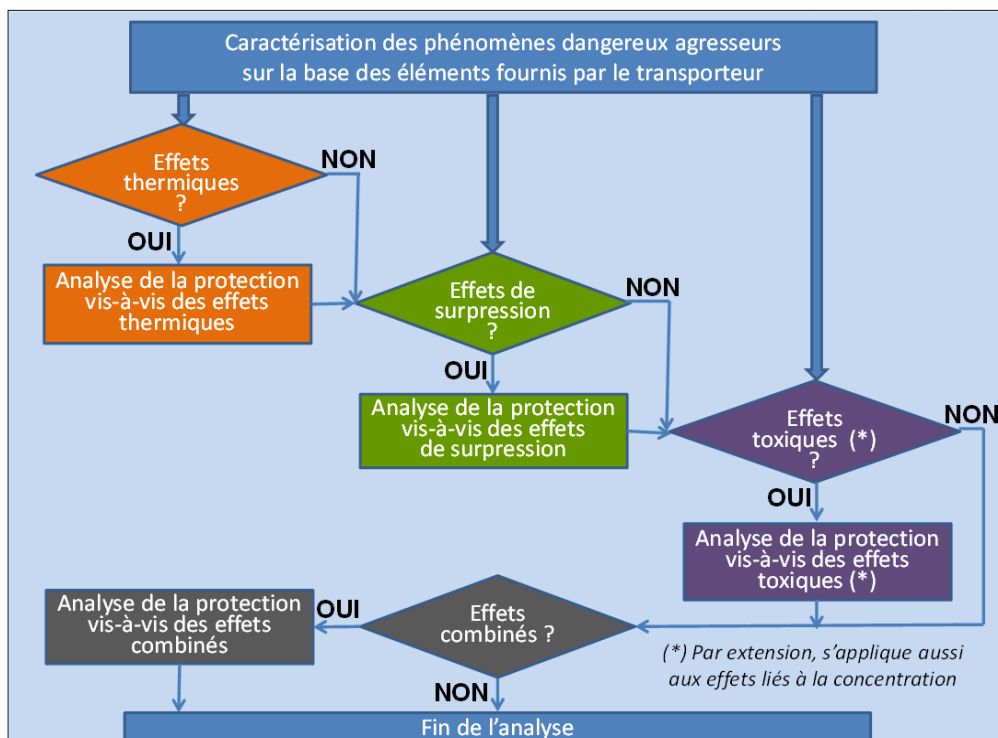


Figure 9 : Processus de réalisation de l'analyse des mesures particulières de protection des personnes accueillies dans les bâtiments

Le principe est d'analyser la protection des personnes **dans les bâtiments pour tous les phénomènes dangereux susceptibles de se produire suite à une même perte de confinement.**

Par exemple, si un fluide est inflammable, la perte de confinement peut généralement générer des **effets thermiques** (phénomènes de feu torche ou de feu de nappe) et des **effets de surpression** (phénomène d'explosion en champ libre ou UVCE). S'il est toxique en plus d'être inflammable, la perte de confinement peut également générer des **effets toxiques** s'il n'y a pas d'inflammation.

Pour une même perte de confinement, il convient ainsi de s'assurer de la protection des personnes non seulement vis-à-vis du **phénomène dangereux** qui génère les distances d'effets les plus importantes, mais aussi vis-à-vis de tous les phénomènes dangereux possibles, **indépendamment de leur probabilité d'occurrence**, car la vulnérabilité d'un bâtiment est spécifique à chacun de ces phénomènes.

Par exemple, un même bâtiment peut garantir la protection des personnes accueillies vis-à-vis des Effets Létaux Significatifs radiatifs (effets thermiques), mais ne pas garantir cette protection vis-à-vis des Premiers Effets Létaux de surpression. C'est pourquoi il est proposé dans ce guide :

- dans un premier temps, d'**analyser successivement la protection des personnes** à chacun des phénomènes dangereux possibles en cas de perte de confinement ;

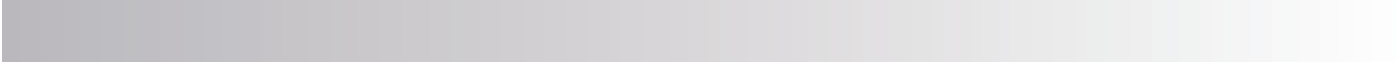
# Processus de réalisation

## de l'analyse des mesures particulières de protection des personnes accueillies dans les bâtiments

- puis dans un second temps d'**analyser les effets combinés**. Cette analyse consiste à étudier le comportement du bâtiment, en tenant compte des éventuelles mesures de renforcement de la protection des personnes définies aux étapes précédentes, en supposant que ce bâtiment est soumis successivement aux différents phénomènes dangereux possibles suite à la perte de confinement.

Chacune des étapes représentées sur la **Figure 9** fait l'objet d'un chapitre spécifique dans la suite du guide :

- La **caractérisation des phénomènes dangereux agresseurs**, détaillée au **chapitre suivant**, consiste à définir les caractéristiques des phénomènes dangereux agresseurs à retenir pour la suite de l'analyse, sur la base des éléments fournis par le transporteur ;
- L'analyse de la **protection** vis-à-vis des effets **thermiques**, des effets de **surpression** et des effets **toxiques** ou liés à la concentration, fait l'objet respectivement des **chapitres «protection des personnes - effets thermiques» p48**, **«Protection des personnes - effets de surpression » p56** et **«protection des personnes - effets toxiques ou liés à la concentration» p66** du guide ;
- Le **chapitre « protection des personnes, effets combinés » p68** est consacré à l'analyse de la protection vis-à-vis des **effets combinés**.





# Caractérisation des phénomènes dangereux

33 *Sélection des phénomènes à retenir*

34 *Principes généraux de caractérisation*

36 *Caractérisation des phénomènes générant des effets thermiques*

36 *quels sont les phénomènes dangereux concernés ?*

36 *distinction de deux types d'échanges thermiques*

39 *caractéristiques dépendant de la perte de confinement*

41 *caractéristiques dépendant du positionnement du bâtiment*

43 *Caractérisation des phénomènes générant des effets de surpression*

43 *quels sont les phénomènes dangereux concernés ?*

43 *caractéristiques d'un signal de surpression*

44 *caractérisation d'un signal de surpression incident*

47 *Caractérisation des phénomènes générant des effets toxiques ou liés à la concentration*

47 *quels sont les phénomènes dangereux concernés ?*

47 *hypothèses à retenir pour caractériser les phénomènes*

# Phénomènes dangereux

## Caractérisation

### Note

L'approche proposée ici diffère quelque peu de celle qui est préconisée dans le guide EDD pour l'analyse des risques des personnes supposées situées à l'extérieur des bâtiments.

En effet, pour une taille de brèche donnée, seul le phénomène dangereux majorant (c'est-à-dire conduisant aux distances d'effets les plus importantes) est retenu pour cette analyse des risques.

## Sélection des phénomènes dangereux à retenir

L'analyse des mesures particulières de protection des personnes accueillies dans les bâtiments est réalisée dans le cadre de l'analyse de compatibilité d'un projet d'aménagement (ERP de plus de 100 personnes ou IGH), comme décrit en introduction du présent guide.

Cette analyse doit être réalisée si le projet d'aménagement est positionné en zone **orange** sur la **Figure 8** (cf chapitre « **Analyses de compatibilité** » **p23** et suivantes) ;

Elle est réalisée suite au positionnement des phénomènes dangereux dans les matrices de risque.

Sous ces conditions, l'analyse des mesures particulières de protection des personnes accueillies dans le bâtiment doit être conduite **pour le phénomène dangereux de référence** retenu en application de l'article 11 de l'arrêté « multi-fluide ».

Comme justifié au chapitre précédent, il est proposé de considérer ici **chacun des phénomènes dangereux** pouvant survenir suite à la perte de confinement identifiée.

Ces phénomènes dangereux sont identifiés sur la base des arbres d'événements présentés en **annexe 5 du guide EDD**, chaque arbre correspondant à une combinaison entre l'état du fluide transporté (gaz, liquide, gaz liquéfié) et ses dangers (inflammable, toxique, ...).

Il est à noter que les effets de pollution, bien que mentionnés sur ces arbres d'événements, ne sont pas à retenir dans la suite de l'analyse, car ils ne concernent pas directement les enjeux humains (ces effets font par ailleurs l'objet d'une évaluation dans le cadre de l'étude de dangers de la canalisation de transport).

### Exemple

**Les distances d'effets sur les personnes consécutives à une brèche de 12 mm sur une canalisation de transport de gaz naturel sont calculées par rapport au feu torche, qui est le phénomène dangereux qui présente les distances d'effet les plus importantes.**

**L'analyse des mesures particulières de protection des personnes sera réalisée a priori en considérant chacun des phénomènes dangereux possibles consécutifs à une brèche de 12 mm, à savoir le feu torche, le flash fire et l'explosion de gaz ou UVCE.**

La détermination de ces phénomènes dangereux est de la **responsabilité du transporteur**, dans le cadre de l'**étude de dangers** de la canalisation ou en complément de cette dernière.

Les différents phénomènes dangereux mentionnés dans ces arbres d'événements sont définis et illustrés en **annexe 1** du présent guide.

# Phénomènes dangereux

## Caractérisation

### Principes généraux de caractérisation

La caractérisation des **phénomènes dangereux agresseurs** consiste à déterminer les conditions d'application du flux de dangers incident sur le bâtiment.

Les conditions d'application de ce flux de dangers incident sont notamment :

- son **intensité**, qui est exprimée en :
  - kW/m<sup>2</sup> pour les *flux thermiques*,
  - mbar pour les *ondes de surpression*,
  - ppm pour les *concentrations de gaz* dans l'air.
- les **variations spatiales** et **temporelles** de cette intensité.

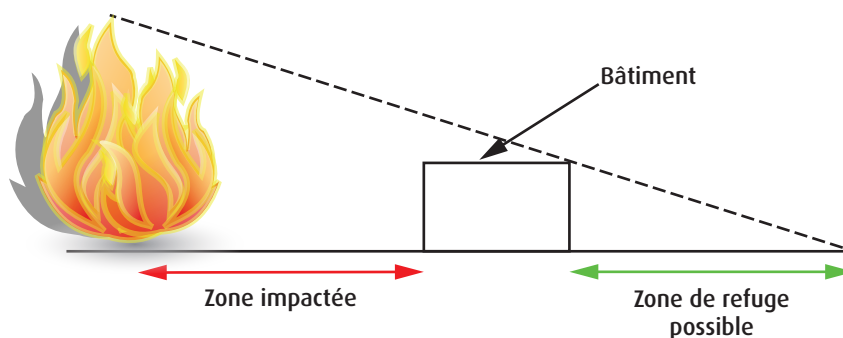
Il est proposé que cette caractérisation soit conduite selon les principes généraux suivants :

- La caractérisation des flux de dangers incidents est établie sous la **responsabilité du transporteur**, qui communique au maître d'ouvrage les éléments de caractérisation des flux de dangers incidents.
- Les flux de dangers incidents sont déterminés selon des **hypothèses de modélisation** déterminées comme suit :
  - certaines hypothèses *spécifiques* sont propres à l'analyse de la *protection des personnes dans les bâtiments*. Ces hypothèses, qui sont définies dans le présent chapitre, devront être prises en compte dans la caractérisation des flux de dangers incidents ;
  - les autres hypothèses, non abordées dans ce chapitre car *non spécifiques* à l'analyse objet du présent guide, devront être définies conformément aux principes du guide EDD et en cohérence avec l'étude de dangers de la canalisation.
- L'**évolution dans le temps** du flux de dangers incident doit être prise en compte. Certains phénomènes dangereux se déroulent de telle façon que le flux incident diminue fortement dans les premiers instants de la fuite (exemple : les ruptures totales de canalisations de gaz génèrent une décompression et donc une chute de débit).  
Par ailleurs, pour certains effets tels que la surpression, la durée du phénomène est très courte (de l'ordre de quelques fractions de secondes) tandis que le flux de dangers incident peut varier très fortement au cours du déroulement du phénomène.  
L'analyse de la protection des personnes à l'intérieur des bâtiments tient compte de ce caractère dynamique du flux de dangers incident.
- Pour les phénomènes dangereux qui peuvent perdurer dans le temps (feu de nappe, feu torche, dispersion d'un nuage de produit toxique...), la **durée d'application du flux de dangers** incident retenue pour l'analyse du comportement du bâtiment est définie comme suit :
  - Pour les *ERP avec mobilité*, cette durée est prise égale à la durée d'évacuation de l'ERP. Cette durée est la somme de la durée entre le début de la fuite et le déclenchement de l'ordre d'évacuation, et de la durée nécessaire à l'évacuation suite à son déclenchement. La détermination de cette durée est de la **responsabilité du maître d'ouvrage**. Il est proposé que la durée d'évacuation retenue pour cette analyse ne puisse *pas être inférieure à 10 minutes*.

La durée d'évacuation proposée par le maître d'ouvrage peut être retenue pour la suite de l'analyse *sous réserve que l'ERP dispose de sorties de secours situées à l'opposé de la canalisation et permette un rassemblement des personnes dans la zone refuge (zone d'ombre derrière le bâtiment) offerte par le bâtiment vis-à-vis des effets thermiques continus*.

# Phénomènes dangereux

## Caractérisation



Il convient donc de s'assurer au préalable que le bâtiment ne s'enflamme pas sous l'effet d'un flux thermique le temps de l'évacuation, ni n'est le siège d'une propagation d'incendie. Le délai de mise à l'abri doit par ailleurs être suffisamment court afin d'assurer le plus possible la protection des personnes lors de la procédure de mise à l'abri. La zone de refuge possible derrière le bâtiment devra également être adaptée au nombre de personnes du bâtiment ainsi qu'être délimitée de manière claire (marquage au sol par exemple).

- Pour les *ERP sans mobilité et les IGH*, la durée d'application du flux de dangers est prise égale à la durée du phénomène dangereux. Cette durée est la somme du temps d'intervention, et de l'inertie éventuelle du phénomène suite à l'intervention. Une intervention consiste le plus souvent à fermer les vannes de sectionnement de la canalisation en amont et en aval de la perte de confinement (pour les parties linéaires).

*La détermination de la durée d'application du phénomène dangereux est de la responsabilité du transporteur, qui s'engage sur un temps d'intervention.*

Il est proposé que le temps d'intervention retenu pour cette analyse ne puisse pas être inférieur à 2 heures.

- Pour les **rejets non verticaux** (par exemple, pour les installations annexes), l'orientation du rejet est choisie de manière **pénalisante** en direction du bâtiment (cas le plus pénalisant).
- L'hypothèse de **mobilité des personnes**, dont l'application est possible pour la détermination de l'intensité reçue par les personnes selon le guide EDD, ne peut pas être retenue pour le calcul du flux de dangers incident sur un bâtiment, car il n'est pas mobile ;
- L'intensité du flux de dangers à une distance donnée de la fuite n'est **pas toujours uniforme** dans un **plan vertical** qui fait face à la fuite.  
Dans les études de dangers, l'intensité reçue par les personnes est déterminée en considérant que ces personnes sont au sol ; or l'intensité des effets peut être **plus importante en hauteur** (ce qui sera le cas par exemple pour des feux torches importants consécutifs à des rejets verticaux ou des nuages toxiques de gaz léger).  
Pour l'analyse de la protection des personnes dans les bâtiments, il est donc important de caractériser les variations du flux de dangers incident **sur toute la hauteur du bâtiment**.
- Une **caractérisation fine** du flux de dangers incident au niveau du bâtiment permet un dimensionnement au plus juste des mesures complémentaires qui seraient éventuellement nécessaires pour renforcer la protection des personnes dans ce bâtiment. Cette caractérisation fine s'appuie sur les principes suivants :
  - Le flux de dangers incident doit être caractérisé à la *distance minimale* entre la canalisation et la façade du bâtiment la plus proche de celle-ci ;

### Exemple

Si le bâtiment est situé entre la distance aux ELS et la distance aux PEL, le flux de dangers correspondant aux ELS, supérieur au flux de dangers incident, peut être retenu en première approche .

# Phénomènes dangereux

## Caractérisation

- Si la façade la plus proche n'est pas parallèle à la canalisation, le flux de dangers incident à une hauteur donnée n'est pas uniforme ; il varie en fonction de la distance entre le point de la façade considéré et la canalisation ; *cette variation du flux de dangers incident doit être prise en compte* ;
- La variation du flux de dangers incident *en fonction de la hauteur* doit être prise en compte (cf point précédent).

Dans une première approche, l'analyse de la protection peut toutefois être réalisée sur la base d'un flux de dangers incident **pénalisant**, établi sur la base d'hypothèses simplificatrices telles que :

- retenir un flux de dangers calculé à une distance *inférieure à la distance minimale entre la canalisation et le bâtiment*.
- retenir le flux de dangers maximal incident sur la *façade la plus proche* en faisant abstraction des variations liées à la hauteur ou à l'orientation.

Si le résultat de l'analyse basée sur ce flux pénalisant est satisfaisant, c'est-à-dire si le bâtiment permet d'assurer une protection suffisante – selon les critères définis dans la suite du présent guide – sans mesures complémentaires, alors une caractérisation plus fine du flux de dangers incident ne sera **pas nécessaire**.

Les paragraphes suivants détaillent les principes et hypothèses spécifiques à chaque type d'effets, en s'appuyant sur ces principes généraux.

## Caractérisation des phénomènes générant des effets thermiques

### Phénomènes dangereux concernés

Dans le cadre des études de dangers des canalisations de transport, les phénomènes dangereux générant des effets thermiques sont notamment :

- Les **flash fire**, ou **feux de nuage**,
- Les **feux torches**, pour les canalisations de transport de gaz, liquides ou gaz liquéfiés à caractère inflammable,
- Les **feux de nappe**, pour les canalisations de transport de liquides ou gaz liquéfiés à caractère inflammable ou combustibles.

Les **flash fire** ont une durée suffisamment courte pour que la protection des personnes dans le bâtiment exposé soit suffisante pour ne pas atteindre les critères définis dans la suite du présent guide. Il n'est donc pas nécessaire de poursuivre l'analyse thermique pour les phénomènes de flash fire.

En revanche, il serait cependant nécessaire de s'assurer de l'**étanchéité des bâtiments** pouvant se trouver dans le nuage gazeux. Ce contrôle peut être réalisé de manière intuitive et visuelle : il permet de s'assurer que les gaz ne peuvent pénétrer dans ces bâtiments avant leur inflammation (d'où un risque d'explosion interne, qui peut produire des dommages considérables).

Si une même fuite peut conduire au phénomène de **feu torche** et au phénomène de **feu de nappe**, l'analyse de la protection des personnes dans le bâtiment sera réalisée sur le phénomène le plus pénalisant en termes de flux de dangers incident et de durée d'application.

Si la détermination a priori du phénomène le plus pénalisant n'est pas possible, l'analyse devra être conduite pour ces deux phénomènes.

### Exemple

Cette **étanchéité** semble très difficile à assurer pour les ERP et les IGH du fait de leur usage et de leurs caractéristiques (bâtiments amenés à recevoir du public, comportant de nombreux ouvrants).

# Phénomènes dangereux

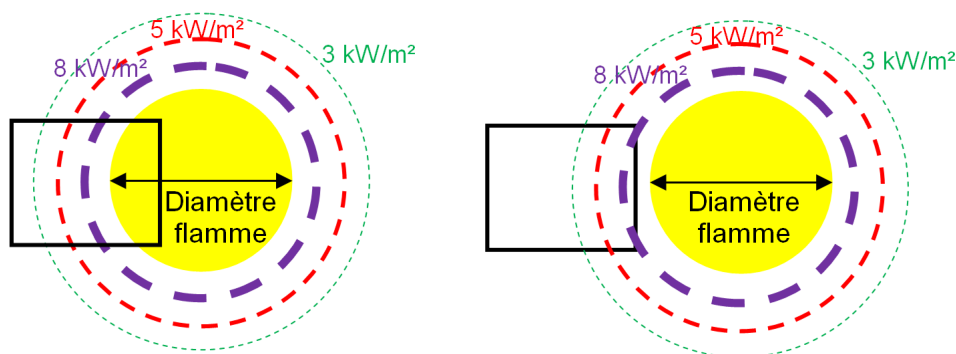
## Caractérisation

### Distinction de deux types d'échanges thermiques

En cas de fuite survenant sur une canalisation de transport suivie d'une inflammation, les sollicitations thermiques résultantes engendrent l'échauffement des structures à proximité à travers deux types de transferts thermiques :

- Si la structure est **impactée par la flamme** : les structures échangent alors directement avec cette flamme par convection et rayonnement ;
- Si la structure n'est **pas impactée par la flamme** : la structure échange également avec la flamme par rayonnement et par convection dans le champ très proche. Toutefois, dans le cadre de ce guide, il est considéré que seuls les effets radiatifs participent à l'échauffement de la structure.

Ces deux configurations sont illustrées sur la **Figure 10** ci-dessous :



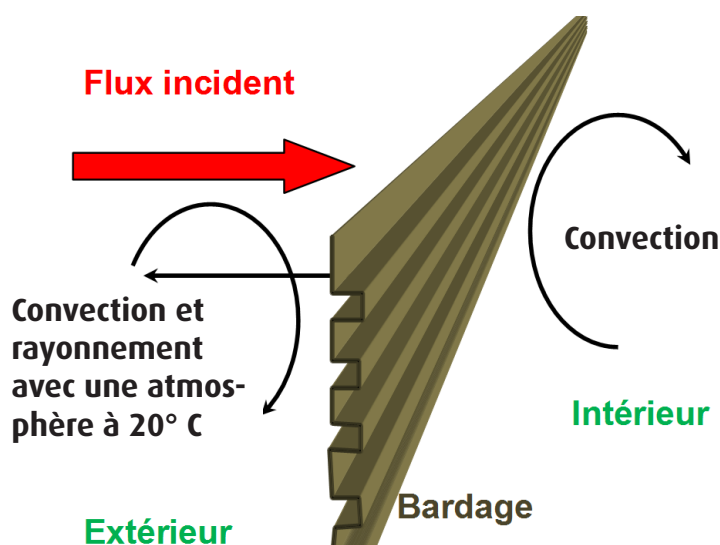
**Figure 10 : Positionnement du bâtiment par rapport à la flamme**

Ainsi, les effets des agressions accidentelles thermiques sont considérés en termes de convection et/ou de rayonnement selon le positionnement du bâtiment par rapport à la flamme.

Pour pouvoir établir ce positionnement, et donc définir le type d'échange thermique à considérer dans la suite de l'analyse, la **géométrie de la flamme** (hauteur, rayon maximal, évolution du rayon en fonction de la hauteur) doit être établie.

### Structure non impactée par la flamme : transfert par rayonnement

La grandeur permettant de quantifier les effets du rayonnement est la **densité de flux thermique**  $\phi$  [kW/m<sup>2</sup>].



**Figure 11 : Modèle de transfert thermique considéré dans le cas d'une structure non impactée par la flamme**

# Phénomènes dangereux

## Caractérisation

Outre le flux thermique reçu, les **durées d'exposition** ont également une influence importante sur la montée en température des différents éléments d'un bâtiment (cf « **principes généraux** » p34).

La notion de dose thermique est également utilisée pour étudier les conséquences sur des personnes situées dans un bâtiment mais néanmoins directement exposées au flux thermique rayonnant (présence de parois translucides).

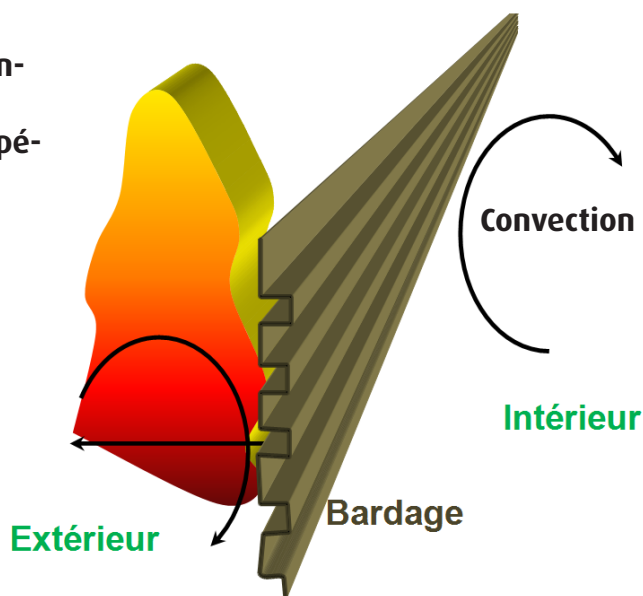
### Structure impactée par la flamme : transfert par convection et rayonnement

Dans le cadre de l'étude du comportement d'une structure impactée par la flamme d'un phénomène dangereux, différentes stratégies peuvent être adoptées pour traduire l'agression thermique.

Cet échange est généralement modélisé par la définition d'une relation de convection entre une atmosphère dont la température est la température de flamme (caractéristique du produit transporté par la canalisation de transport) et la paroi externe de la structure.

Néanmoins, une autre méthode consisterait à définir un niveau de densité de flux thermique directement appliqué à la paroi, à la manière de la structure non impactée par la flamme (voir paragraphe précédent).

**Convection et rayonnement avec une atmosphère à température de flamme (en général supérieure à 900° C)**



**Figure 12 : Modèle de transfert thermique considéré dans le cas d'une structure impactée par la flamme**

La notion de temps d'exposition joue également un rôle prépondérant. En effet, au cours de l'application d'un flux accidentel sur une paroi, l'équilibre thermique peut nécessiter plusieurs dizaines de minutes avant de s'opérer notamment dans le cadre de parois épaisses.

Par conséquent, il est indispensable d'associer les températures de flamme propres aux produits transportés à des durées d'exposition (cf « **principes généraux** » p34).

Le tableau ci-après réunit des exemples de températures de flammes pour les produits communément transportés dans les canalisations de transport.

# Phénomènes dangereux

## Caractérisation

Produit	Hydrocarbures liquides	Ethylène	Dihydrogène	Gaz naturel (méthane)
Température de flamme (°C)	1200°C	2360 °C	1430 °C	1960°C
Source	H. Koseki, Combustion Properties of Large Liquid Pool Fires	Aide mémoire du thermicien, Elsevier, 1997 (valeur pour une combustion stœchiométrique)		

Tableau 3 : Température de flamme pour certains fluides transportés par canalisation

### Synthèse

Ce paragraphe avait pour objectif de détailler les modes d'échange thermique entre la source et la cible afin d'estimer les effets d'une agression thermique sur la surface de la paroi d'un bâtiment impacté.

Le tableau ci-après récapitule le type d'échange thermique proposé en fonction du mode d'agression d'une partie du bâtiment.

Bâtiment impacté par la flamme	Oui	Non
Modèle de transfert de chaleur proposé	Échanges par convection uniquement	Effets radiatifs uniquement
Grandeurs à identifier pour calculer le comportement du bâtiment cible	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Température de flamme (en °C)</li> <li>▪ Forme de la flamme</li> <li>▪ Durée d'application du flux convectif</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Densité de flux thermique en (kW/m<sup>2</sup>)</li> <li>▪ Durée d'application du flux radiatif</li> </ul>

Tableau 4 : Type d'échange thermique en fonction du mode d'agression du bâtiment

Les modèles de transfert thermiques ainsi que les hypothèses proposés pour étudier les effets dans les parois et l'atmosphère de la construction seront détaillés dans le chapitre « *protection des personnes - effets thermiques* » p48 dévolu à l'étude de la réponse des différentes structures bâtementaires aux sollicitations thermiques.

### Caractéristiques dépendant de la perte de confinement

Certaines caractéristiques du flux de dangers incident dépendent uniquement de la perte de confinement (taille de la brèche, fluide transporté, etc ...).

Par exemple, pour une perte de confinement sur une canalisation enterrée transportant un gaz inflammable sous forte pression, le flux thermique atteint à une distance **d** donnée de la fuite ne présente **pas le même profil** selon la **taille de la brèche** :

- Pour une brèche de **12 mm**, le flux thermique reçu est constant au cours du temps, car on peut considérer que le volume de la canalisation est suffisant pour maintenir la pression constante au cours de la fuite. Le flux thermique reçu ne dépend que de la distance à la brèche ;



# Phénomènes dangereux

## Caractérisation

- Pour une brèche de **70 mm**, dans le cas des canalisations dont le diamètre est au moins égal à 150-200 mm, le débit de fuite reste constant pour les mêmes raisons, et le flux thermique reçu ne dépend également que de la distance à la brèche ;
- Pour une **rupture totale**, le débit de fuite diminue fortement dans les premiers instants de la fuite, pour se stabiliser ensuite jusqu'à la fermeture des vannes de sectionnement. De ce fait, le flux thermique reçu à une distance donnée de la brèche va lui aussi diminuer. L'analyse de la protection des personnes dans le bâtiment doit alors porter sur l'ensemble du phénomène, en intégrant son évolution temporelle.

Les graphes présentés ci-après illustrent ces différents profils.

### Important !

Ces graphes ont une vocation **illustrative** et ne correspondent pas à une modélisation construite sur la base d'une configuration donnée. Ils ne peuvent donc pas être utilisés pour en déduire un flux thermique incident dans le cas d'une analyse de compatibilité.

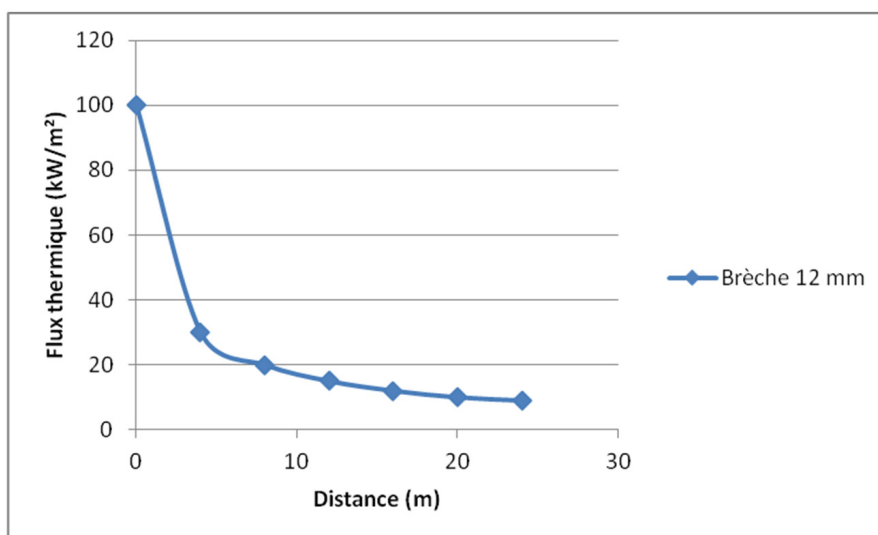


Figure 13 : Profil du flux thermique incident en fonction de la distance pour une **brèche de 12 mm** (exemple fictif et illustratif)

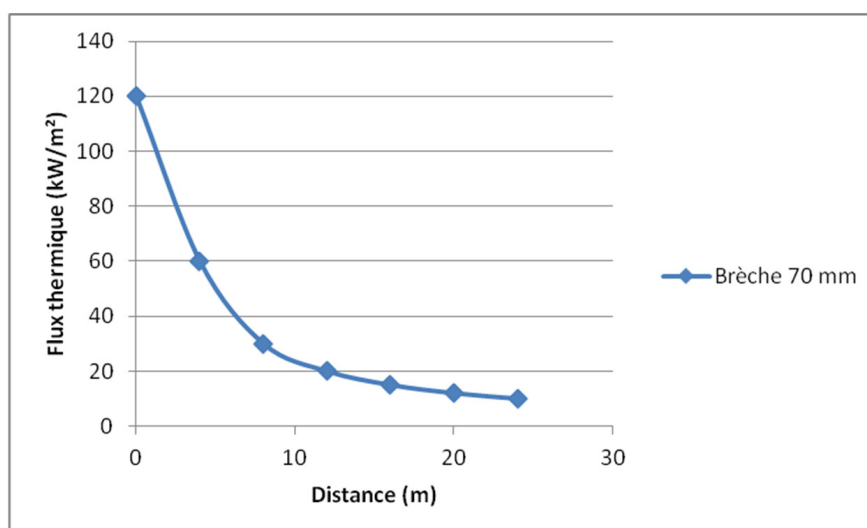


Figure 14 : Profil du flux thermique incident en fonction de la distance pour une **brèche de 70 mm** (exemple fictif et illustratif)

# Phénomènes dangereux

## Caractérisation

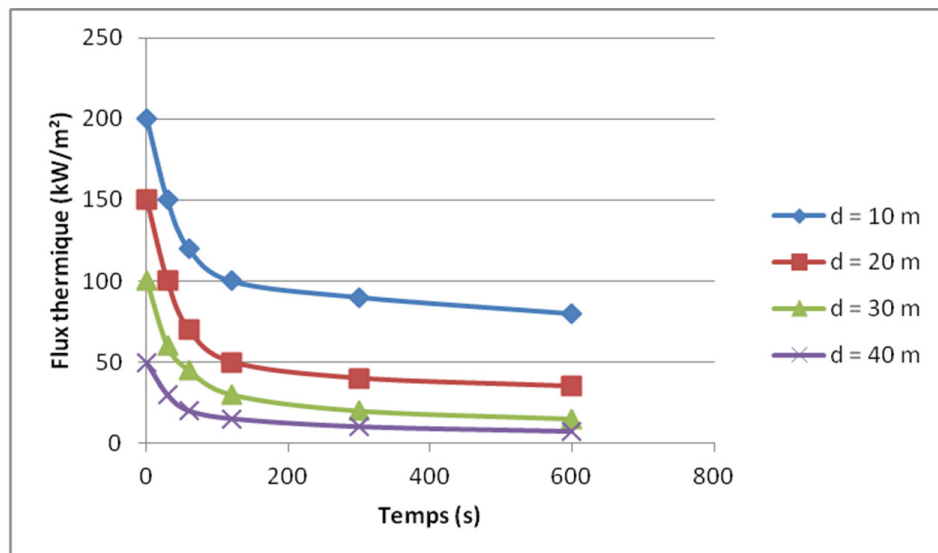


Figure 15 : Profil du flux thermique incident en fonction de la distance et du temps pour une **rupture totale** (exemple fictif et illustratif)

### Caractéristiques dépendant du positionnement du bâtiment

Les résultats de l'étude de vulnérabilité dépendent également de la position, de la forme et des caractéristiques structurelles de l'édifice. Chacun de ces trois points doit faire l'objet d'une analyse préliminaire afin d'optimiser les éventuels renforcements à mettre en place.

#### Hypothèse de mobilité

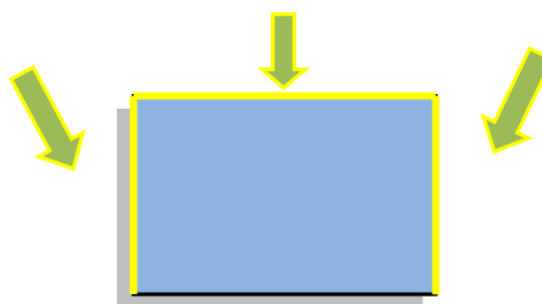
Le bâtiment n'étant pas mobile, les effets thermiques doivent être calculés **sans appliquer l'hypothèse de mobilité des personnes**.

#### Orientation du bâtiment par rapport au centre du phénomène dangereux

L'orientation de chaque face du bâtiment est à prendre en compte pour réaliser l'étude de vulnérabilité. Deux cas de figure sont à différencier :

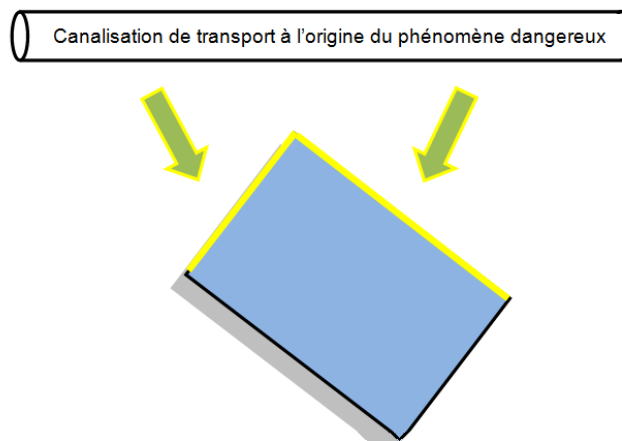
- La flamme **n'impacte pas le bâtiment**. Il est seulement atteint par des effets radiatifs. Les schémas ci-dessous indiquent en jaune, les faces à traiter dans le cadre de l'analyse de vulnérabilité vis-à-vis des effets radiatifs.

Canalisation de transport à l'origine du phénomène dangereux

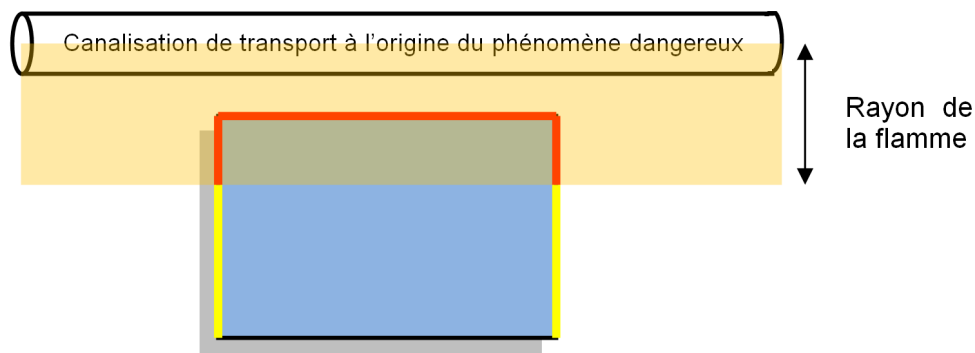


# Phénomènes dangereux

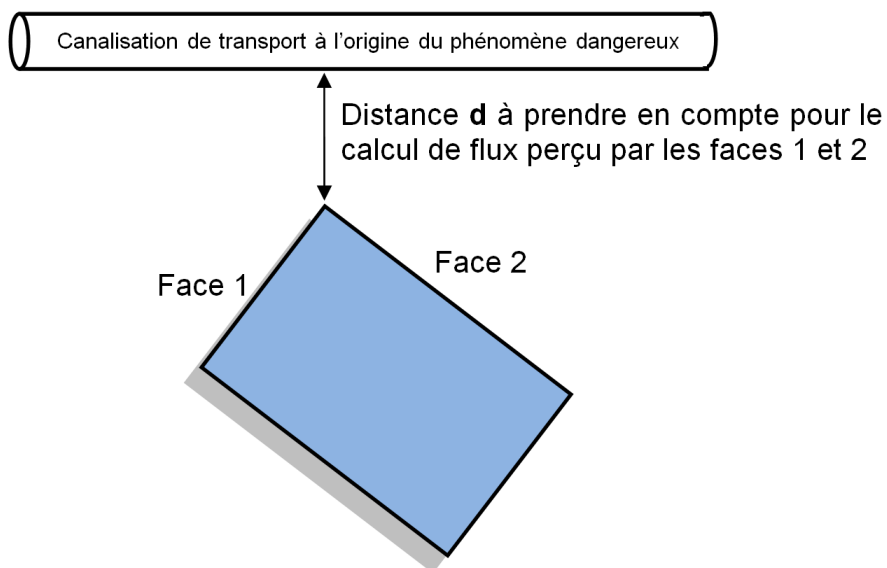
## Caractérisation



- La flamme **impacte le bâtiment**. Il est atteint par des effets radiatifs et convectifs. Le schéma ci-dessous indique en rouge, les faces à traiter vis-à-vis des effets convectifs et en jaune, les faces à traiter vis-à-vis des effets radiatifs (selon le modèle proposé au chapitre « *protection des personnes - effets thermiques* » p48 par exemple).



Dans le cadre d'une approche **majorante**, il est proposé que le flux de référence à prendre en compte pour chacune des faces soit établi en calculant **la distance la plus courte** entre la canalisation de transport et la paroi :



Par ailleurs une autre option peut être de calculer la valeur de flux reçue à chaque endroit des parois impactées.

# Phénomènes dangereux

## Caractérisation

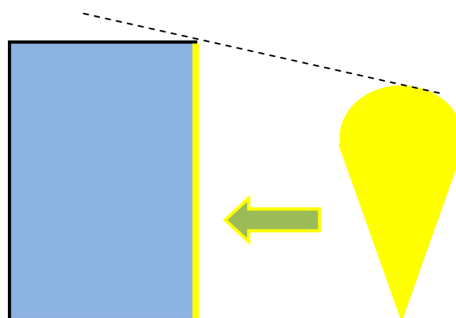
### Volume du bâtiment impacté

Les critères de vulnérabilité aux effets thermiques portent sur les niveaux de température atteints dans les parois mais également dans le volume du bâtiment. Ces niveaux de température interne sont directement dépendants du volume du bâtiment cible. Plus ce **volume est important**, et plus la **montée en température** dans le volume et dans les parois du bâtiment sera **lente**.

### Hauteur du bâtiment par rapport au jet enflammé

La hauteur du bâtiment est une donnée d'entrée pour l'étude de vulnérabilité, pour deux raisons :

- Il est nécessaire de comparer la **hauteur du bâtiment** à la **hauteur de flamme**. En effet, dans le cas où le bâtiment ne viendrait à être impacté que par des effets thermiques radiatifs en façade, cela pourrait permettre d'**exclure la toiture** du champ des parois à traiter vis-à-vis des effets thermiques. Cela est illustré sur le schéma ci-après :



- En outre, l'effet perçu par un point d'une façade dépend de sa hauteur. Comme le laisse présager le schéma ci-dessus, la **partie supérieure** de la paroi percevra des **effets thermiques plus intenses** que la partie inférieure.

## Caractérisation des phénomènes générant des effets de surpression

### Quels sont les phénomènes concernés ?

Dans le cadre des études de dangers des canalisations de transport, les phénomènes dangereux générant des effets de surpression sont notamment des **UVCE** (explosions d'un nuage gazeux non confiné).

Les effets de surpression sont générés par des explosions consécutives à des pertes de confinement survenant sur des canalisations de transport de fluides inflammables, tels que l'éthylène ou l'essence par exemple.

### Les caractéristiques d'un signal de pression

#### Forme du signal de pression

Deux formes de signaux de surpression ont été considérées pour l'ensemble des produits transportés : un signal de surpression de type « **onde de choc** » (**détonation**) et un signal de surpression de type « **déflagration** » suivant les cas.

# Phénomènes dangereux

## Caractérisation

Ces signaux ne sont pas complètement satisfaisants d'un point de vue « physique » car ils négligent complètement la phase négative de l'onde. En revanche, ils sont en totale conformité avec les modèles utilisés usuellement dans les études de dangers des canalisations de transport.

Les deux formes de signaux de surpression peuvent être représentées, sur un graphe représentant le niveau de surpression (en mbar) en fonction du temps (en ms) de la façon suivante :

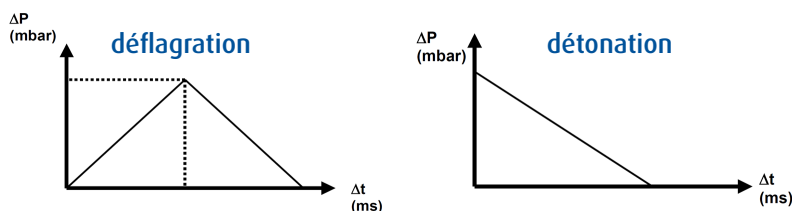


Figure 16 : Signaux de surpression de type « déflagration » et « détonation »

$$p(t) = \begin{cases} (2 \cdot \Delta P_{\max} / t_+) t & \text{si } t \leq t_+ / 2 \\ (-2 \cdot \Delta P_{\max} / t_+) t + 2 \cdot \Delta P_{\max} & \text{si } t > t_+ / 2 \end{cases} \quad p(t) = \begin{cases} \Delta P_{\max} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_+}\right) & \text{si } t \leq t_+ \\ 0 & \text{si } t > t_+ \end{cases}$$

Figure 17 : Équation du signal de surpression de type « déflagration » à gauche et « détonation » à droite

Ces modèles d'onde ont été retenus pour être en adéquation avec les modèles employés dans le cadre des études de vulnérabilité du bâti vis-à-vis des effets de surpression dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Technologiques (INERIS, CETE NC, 2008).

La première forme de signal est prise en compte pour des explosions de nuages de gaz, peu violentes, caractérisées par un indice de violence inférieur à 5 lors de l'utilisation de la méthode Multi-Energie.

La seconde forme est utilisée pour des explosions de gaz inflammables très violentes, caractérisées par un indice de violence de 10 par la méthode Multi-Energie.

Enfin, dans certains cas, tels que l'explosion de nuages de gaz de violence intermédiaire, caractérisées par un indice de violence compris entre 6 et 9 (méthode Multi-Energie), le signal d'explosion généré peut être envisagé sous les deux formes suivant la distance séparant le centre de l'explosion du point d'étude.

### Temps d'application

Les durées ou temps d'application, définissant la base des signaux de surpression représentés par la **Figure 17**, peuvent être déterminés à l'aide des abaques de la méthode Multi-Energie (ou autre) pour les cas d'explosion relatifs aux canalisations de transport.

Les durées d'application, considérées au cours des calculs de résistance des structures, correspondent à des durées de phase positive.

### Caractérisation des effets de surpression incidents

Les effets de surpression incidents impactant un bâtiment suite à une onde de souffle initiée sur une canalisation de transport peuvent être déterminés de deux manières différentes :

# Phénomènes dangereux

## Caractérisation

### Note

Dans le cas où le bâtiment est situé dans la zone > 200 mbar, il convient de calculer un signal précis.

- La première approche est sommaire et simple à mettre en œuvre. Néanmoins, son application donne des **signaux de surpression conservatifs** en termes d'intensité et de durée.
- La seconde méthode est plus complexe mais fournit des résultats moins pénalisants : elle consiste à **modéliser le signal de surpression** à l'aide d'une méthode adaptée (méthode Multi-Energie ou autre méthode équivalente). Cette méthode peut être utilisée dès lors que le constructeur désire optimiser au mieux la typologie du bâtiment en fonction de l'aléa de surpression à prendre en compte.

### Première proposition de méthode : calcul forfaitaire

Cette première méthode permet de déduire un signal sur la base des **volumes de gaz** mis en jeu, de l'indice de violence estimé dans le cadre de la modélisation des phénomènes et de la position du bâtiment vis-à-vis des distances réglementaires.

#### Étape 1 : détermination du pic de surpression

La première phase consiste à évaluer le pic de surpression en positionnant le bâtiment vis-à-vis des distances réglementaires fournies dans l'Étude de Dangers. Le schéma ci-dessous illustre cette démarche :

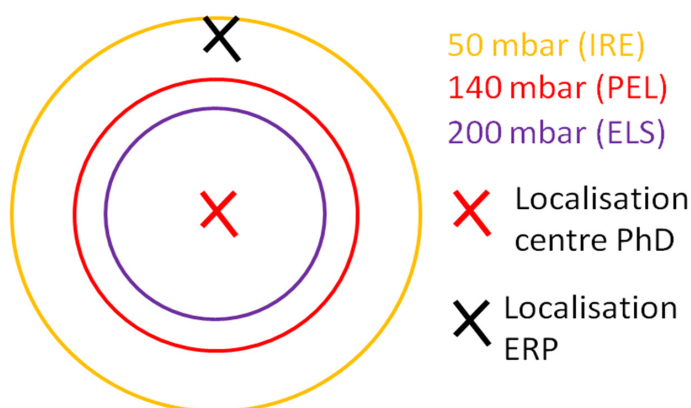


Figure 18 : Calcul d'un niveau de pression conservatif à partir des distances d'effets présentes dans l'EDD.

Le schéma ci-avant indique que l'ERP est compris dans la zone 50-140 mbar. Dans le cadre d'une approche conservative, on considère donc que l'ERP est soumis à un signal de surpression dont le pic atteint 140 mbar.

#### Étape 2 : détermination de la forme et de la durée du signal

Ces informations peuvent être directement fournies par le transporteur dans son étude de dangers ou dans un complément à cette dernière.

Dans le cas contraire, il est possible, dans la zone 50-140 mbar, de les déduire en utilisant les tableaux de l'annexe A2 du « Cahier applicatif du complément technique de la vulnérabilité du bâti aux effets de surpression », référencé INERIS-DRA-08-99461-15249A. Ces tableaux sont repris et commentés ci-après.

Le tableau ci-dessous doit être utilisé lorsque les calculs d'effets de surpression ont été réalisés par la méthode multi-énergie à l'aide d'un indice de violence :

- inférieur ou égal à 5 pour les gaz et liquides inflammables,
- compris entre 6 et 8 pour l'hydrogène.

# Phénomènes dangereux

## Caractérisation

**(1)** La masse inflammable correspond à la masse de gaz inflammable pur, alors que volume inflammable correspond au volume de mélange air-gaz inflammable.

**(2)** Alcanes/Parafines (méthane, éthane, propane, butane), Naphtènes/Cycloalcanes (cyclopropane, cyclobutane), Alcènes/Oléfines (méthane, éthène, propène, butène), Diènes/Dioléfines (butadiène).

**(3)** Alcanes/Parafines (pentane, hexane, ...dodécane), Naphtènes/Cycloalcanes (cyclopentane, cyclohexane), Alcènes/Oléfines (pentène, hexène, ...dodécène), Diènes/Dioléfines (pentadiène), Aromatiques (benzène, toluène, xylène), alcools, éthers, essences, kérosènes, carburants jet.

Type d'explosion	Type de produit	Masse/Volume inflammable <sup>(1)</sup>	Typologie du signal		
			Forme du signal	Temps d'application (ms)	
UVCE de type 1	Gaz inflammables <sup>(2)</sup>	<400g (5m <sup>3</sup> )	Déflagration	0 - 20	
		400g (5m <sup>3</sup> ) - 5 kg (65m <sup>3</sup> )		20 - 50	
		5kg (65m <sup>3</sup> ) - 50 kg (650m <sup>3</sup> )		50 - 100	
		50kg (650m <sup>3</sup> ) - 150 kg (1950m <sup>3</sup> )		100 - 150	
		150 kg (1950m <sup>3</sup> ) - 50 t (650000m <sup>3</sup> )		150 - 1000	
	Liquides inflammables <sup>(3)</sup>	> 50t (650000m <sup>3</sup> )		> 1000	
		Hydrogène		< 2 kg (80m <sup>3</sup> )	0 - 20
				2kg (80m <sup>3</sup> ) - 30 kg (1500m <sup>3</sup> )	20 - 50
				30kg (1500m <sup>3</sup> ) - 230 kg (10000m <sup>3</sup> )	50 - 100
				230kg (10000m <sup>3</sup> ) - 830 kg (38000m <sup>3</sup> )	100 - 150
830kg (38000m <sup>3</sup> ) - 250 t (12.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	150 - 1000				

Tableau 5 : Détermination d'un signal de surpression forfaitaire (UVCE type 1)

Le **tableau 6** doit être utilisé lorsque les calculs d'effets de surpression ont été réalisés par la méthode Multi-Energie à l'aide d'un indice de violence :

- supérieur à 6 pour les gaz et liquides inflammables,
- compris entre 9 et 10 pour l'hydrogène.

Type d'explosion	Type de produit	Masse/Volume inflammable <sup>(1)</sup>	Typologie du signal			
			Forme du signal	Temps d'application (ms)		
UVCE de type 2	Gaz inflammables <sup>(2)</sup>	<5kg (65m <sup>3</sup> )	Déflagration	0 - 20		
		5 kg (65m <sup>3</sup> ) - 100 kg (1300 m <sup>3</sup> )		20 - 50		
		100 kg (1300 m <sup>3</sup> ) - 700 kg (9000m <sup>3</sup> )		50 - 100		
		700 kg (9000m <sup>3</sup> ) - 2,5t (32000m <sup>3</sup> )		100 - 150		
		2,5t (32000m <sup>3</sup> ) - 750 t (10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup> )		150 - 1000		
	Liquides inflammables <sup>(3)</sup>	Hydrogène		< 2 kg (80m <sup>3</sup> )	Onde de choc	0 - 20
				2kg (80m <sup>3</sup> ) - 230 kg (10000m <sup>3</sup> )	20 - 100	
				230kg (10000m <sup>3</sup> ) - 830 kg (38000m <sup>3</sup> )	100 - 150	
				830kg (38000m <sup>3</sup> ) - 32 t (1,5.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	150 - 500	

Tableau 6 : Détermination d'un signal de surpression forfaitaire (UVCE type 2)

### Exemple :

Pour une fuite d'hydrogène de 12 mm suivie d'une explosion, on suppose que les modélisations fournissent les informations suivantes :

- volume inflammable inférieur à 80 m<sup>3</sup> ;
- utilisation de l'indice de violence 9.

Le tableau à utiliser est celui de « type 2 » : le signal est une onde de choc avec un temps d'application de 0 à 20 ms (cf rectangle bleu). Le signal de surpression correspondant est le suivant :

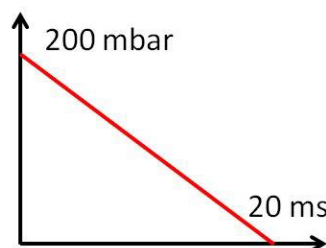


Figure 19 : Signal de surpression calculé forfaitaire pour l'exemple précédent

# Phénomènes dangereux

## Caractérisation

### Deuxième proposition de méthode : calculs plus précis

Certains modèles, tels que la méthode multi-énergie, permettent de caractériser le signal de pression (forme, intensité, temps d'application). Cette caractérisation est établie sous la responsabilité du transporteur.

Ces méthodes sont décrites par exemple dans les documents suivants :

- ❑ INERIS, Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à air libre, 1999 (téléchargeable gratuitement sur [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr)),
- ❑ Fiche 3 (paragraphe 1.1.3) de la Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003 ([www.legifrance.gouv.fr](http://www.legifrance.gouv.fr) ou [www.ineris.fr/aida](http://www.ineris.fr/aida)).

### Caractérisation des phénomènes générant des effets toxiques ou liés à la concentration

#### Quels sont les phénomènes concernés ?

Les effets toxiques sont générés par des pertes de confinement survenant sur des canalisations de transport de fluides toxiques, tels que l'ammoniac ou le chlore par exemple.

Les effets liés à la concentration sont générés par des pertes de confinement survenant sur des canalisations de transport :

- ❑ d'**oxygène**, par augmentation de l'inflammabilité des matières organiques et sur-oxygénation,
- ❑ d'**azote** ou d'autres **gaz inertes**, par anoxie,
- ❑ ou encore de **dioxyde de carbone**, par action sur le système respiratoire.

#### Hypothèses à retenir pour caractériser ces phénomènes

Les phénomènes dangereux doivent être caractérisés selon les principes généraux exposés au **paragraphe «principes généraux» p34**.



# Protection des personnes - effets thermiques

## 49 Critères de vulnérabilité

49 objectifs de performance recherchés

50 résultats illustratifs : calculs de flux limites dans  
une situation accidentelle fictive

## 53 Analyse proposée pour les effets thermiques

53 calcul de la sollicitation

53 modèle de transferts thermiques

53 bilan

## 53 Exemples d'application

## 54 Exemples de renforcement

54 bardages métalliques

54 murs / dalles en béton armé

54 vitrages des fenêtres

54 châssis des fenêtres et des portes

54 portes pleines

55 structures porteuses métalliques

## 55 Cas particulier des flash fire

## 55 Solutions alternatives aux renforcements

# Protection des personnes

## Effets thermiques

### Important !

Il convient, comme indiqué au chapitre «Phénomènes dangereux Effets thermiques», de vérifier au préalable la possibilité pour les personnes d'évacuer le bâtiment par une façade opposée au phénomène thermique et de se réfugier dans la zone d'ombre offerte par celui-ci.

## Critères de vulnérabilité

Les critères retenus pour statuer sur la vulnérabilité des occupants d'un bâtiment impacté par un phénomène thermique issu d'une canalisation de transport sont présentés dans le tableau suivant :

### Objectifs de performances recherchés

Éléments du bâti	Objectif recherché	Exemple de critère qui permet d'atteindre l'objectif
Toutes	Non propagation d'incendie	Quelque soit le type de bâtiment (stockage, structure, matériaux de construction), on peut considérer que le risque d'inflammation des parois internes est maîtrisé si son augmentation de <b>température reste inférieure à 240°C</b> , avec une température <b>maximale</b> en tout point de la surface <b>de 260°C</b> . Toutefois ces niveaux de température valent pour des matériaux facilement inflammables et des valeurs de température en paroi interne plus élevés pourraient être acceptés dès lors que l'analyse aurait démontré la non inflammation des éléments en contact avec cette paroi.
	Habitabilité du bâti	Il est considéré que la température de l'atmosphère d'une ou plusieurs pièces d'un ERP ou d'un IGH doit rester <b>inférieure à 60°C</b> afin que ses occupants ne subissent pas de blessures irréversibles. Ces pièces constituent ainsi des locaux de confinement. Ceux-ci doivent être facilement accessibles par l'ensemble des occupants en cas de sinistre.
Tout matériau	Non propagation d'incendie	Leur température doit rester <b>inférieure à leur température d'inflammation</b> .
Béton armé	Non-ruine de la structure porteuse	Pour les ferraillements de béton armé aux propriétés mécaniques les plus faibles, il est préconisé que leur température doit rester <b>inférieure à 400°C</b> pour que ceux-ci puissent continuer à jouer leur rôle dans la résistance à la traction du béton armé. Notons qu'il existe néanmoins des ferraillements plus résistants en mesure de résister à des niveaux de température plus élevés.
Structures porteuses métalliques	Non-ruine de la structure porteuse	Ce critère est rempli si la <b>température des structures porteuses métalliques reste inférieure à 350°C</b> , afin d'éviter les risques de flambement. Cette température correspond à la température critique recommandée par l'Eurocode 3 pour les éléments de section de classe 4 dans le cas d'une courbe ISO 834. Toutefois le niveau de température admissible peut être plus élevé pour des poutres de classe supérieure (Eurocode 3, partie 1-2 - NF EN 1993-1-2). Un autre critère peut être l'emploi des courbes de réduction de la résistance des matériaux telles que consultables dans les Eurocodes en leur partie 1-2. Leur emploi permet de prédire le comportement d'éléments de structure métalliques avec des caractéristiques matériaux dégradées en raison de l'élévation de température.
Vitrages	Habitabilité du bâti	Pour les phénomènes de durée <b>inférieure à deux minutes</b> , la dose thermique passant au travers des vitrages doit être <b>inférieure au seuil des effets irréversibles pour les personnes, soit 600 (kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup> .s, et l'intégrité du vitrage doit être préservée</b> pendant toute la durée du phénomène. Pour les phénomènes thermiques continus dont la durée d'application est <b>supérieure à deux minutes</b> , la densité de flux thermique transmise doit être <b>inférieure au seuil des effets irréversibles pour les personnes, soit 3 kW/m<sup>2</sup></b> . Pour ce qui des translucides, leur dégradation et/ou leur inflammation n'est pas tolérée, compte tenu de la durée importante des phénomènes thermiques liés aux canalisations de transport.

# Protection des personnes

## Effets thermiques

<b>Vitrages (suite)</b>	Habitabilité du bâti  Critères valables pour des vitrages de taille standard : surface inférieure à 2 m <sup>2</sup> , plus grande dimension inférieure à 2.20 m	Pour les châssis en PVC des fenêtres, leur température doit rester inférieure à : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 200°C en température de cœur et/ou 320°C en température de peau pour un <b>simple vitrage</b>,</li> <li>▪ 320°C en température de cœur et/ou 420°C en température de peau pour un <b>double vitrage</b>.</li> </ul>
		Pour les châssis métalliques des fenêtres, leur dilatation peut être suffisamment faible pour ne pas engendrer la rupture du vitrage. Ainsi les critères de température limites admissibles (température de cœur) ont été définis pour prévenir la rupture des vitrages : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 220°C pour un <b>simple vitrage</b>,</li> <li>▪ 350°C pour un <b>double vitrage</b>.</li> </ul>
<b>Bardage avec isolant</b>	Habitabilité du bâti	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.

Tableau 7 : Objectifs de performance pour l'analyse de la protection des personnes vis-à-vis des effets thermiques

### Résultats illustratifs : calculs de flux limites pour une situation accidentelle fictive

A titre d'exemple, les niveaux de température atteints dans les structures soumises à différentes sollicitations thermiques ont été calculés, et ces niveaux de température ont été comparés avec les critères définis au paragraphe « **objectifs de performances recherché** » page précédente.

Cet exemple est construit sur la base d'un bâtiment fictif, supposé présenter au moins quatre éléments structurels distincts :

- ❑ du bardage simple peau,
- ❑ du bardage double peau,
- ❑ des murs en béton armé,
- ❑ et des doubles vitrages.

Deux types de sollicitations thermiques ont été prises en compte :

- ❑ La première sollicitation thermique est un **flux thermique constant**, supposé généré par une **brèche de 12 mm** avec rejet vertical sur une canalisation de transport de gaz inflammable sous plusieurs dizaines de bar.

Les calculs ont été réalisés pour différents flux thermiques incidents (correspondant à différentes distances entre la canalisation et le bâtiment), et pour différentes durées d'application (10 minutes, 2 heures et 5 heures). Il est rappelé que le choix de la durée d'application est établi conformément au paragraphe « **principes généraux** » p34 du présent guide. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le **Tableau 8** ci-après.

- ❑ La seconde sollicitation thermique est un **flux thermique décroissant**, supposé généré par une rupture totale avec rejet vertical sur une canalisation de transport de gaz inflammable sous plusieurs dizaines de bar.

Les résultats de ces calculs sont présentés dans le **Tableau 9** ci-après, qui présentent la distance minimale entre la canalisation et le bâtiment pour respecter les critères pour chacun des éléments structurels considérés.

# Protection des personnes

## Effets thermiques

### Note



L'élément du bâti n'est pas vulnérable dans le cadre du scénario fictif modélisé.



L'élément du bâti n'est pas vulnérable dans le cadre du scénario fictif modélisé, à condition que des mesures d'éloignement des éléments combustibles des parois soient mises en place.



L'élément du bâti est vulnérable dans le cadre du scénario fictif modélisé.

Il est à noter que les résultats fournis ont été calculés en émettant des **hypothèses fortes** sur le bâtiment (propriétés des matériaux de construction, taux de renouvellement d'air spécifiques, présence de matières combustibles au sein du bâtiment,...), qui ne sont pas transposables à d'autres bâtiments.

Valeur de flux appliquée (kW/m <sup>2</sup> )	Bardage simple peau 0,75 mm de type HACIERBA 40.183.195		Bardage double peau avec isolant 5 cm		Murs en béton armé d'épaisseur 20 cm		Doubles vitrages			
	Durée d'application des effets 10 minutes	5 heures	Durée d'application des effets 10 minutes	5 heures	Durée d'application des effets 10 minutes	2 heures	5 heures	Durée d'application des effets 10 minutes	2 heures	5 heures
3	Smiley face									
5	Smiley face with stars									
8	Sad face									
20	Sad face	1 <sup>er</sup> critère atteint Inflammation des éléments situés sur les parois internes du bâtiment								
40										1 <sup>er</sup> critère atteint Niveau de flux transmis supérieur au seuil des effets irréversibles pour les personnes

Tableau 8 : Résultats illustratifs pour le scénario brèche de 12 mm (non applicables à d'autres bâtiments que le bâtiment fictif considéré)

# Protection des personnes

## Effets thermiques

Le signal de flux caractéristique du scénario de rupture guillotine de l'exemple ci-dessous possède une durée inférieure à la dizaine de minutes. Les résultats obtenus pour la résistance des structures bâtementaires sont identiques quelle que soit la durée de calcul considérée.

	Bardage simple peau 0,75 mm de type HACIERBA 40.183.195	Bardage double peau avec isolant 5 cm	Murs en béton armé d'épaisseur 20 cm	Doubles vitrages
Distance minimale à mettre en place entre le bâtiment et le centre du phénomène dangereux	55 m <b>1<sup>er</sup> critère atteint</b> Inflammation des éléments situés sur les parois internes du bâtiment	45 m <b>1<sup>er</sup> critère atteint</b> Inflammation de l'isolant du bardage et émission de fumées toxiques	25 m <b>1<sup>er</sup> critère atteint</b> Dépassement du niveau de température limite dans les ferrallages de la paroi	55 m <b>1<sup>er</sup> critère atteint</b> Niveau de flux transmis supérieur au seuil des effets irréversibles pour les personnes

Tableau 9 : Résultats illustratifs pour le scénario de rupture guillotine décrit ci-dessus (non applicables à d'autres bâtiments que le bâtiment fictif considéré)

## Analyse proposée vis à vis des effets thermiques

### Calcul de la sollicitation

Comme indiqué dans le chapitre « *caractérisation des phénomènes dangereux* », la première étape du calcul consiste à déterminer la nature et la valeur de la sollicitation thermique impactant la paroi externe de l'élément de structure soumis au flux.

Cette sollicitation se traduit par une densité de flux thermique directement appliquée en surface de la paroi, ou par un échange en convection entre un volume à température de flamme et la paroi. Les coefficients de convection appliqués sont calculés à l'aide de corrélations de convection naturelle. Le rayonnement peut être supposé constamment normal à la paroi.

### Modèles de transferts thermiques

Une fois la sollicitation thermique calculée, la diffusion de la chaleur au sein des matériaux est calculée en utilisant l'équation de la conduction. Cette étape permet de vérifier l'ensemble des critères liés à :

- la **non inflammation** et/ou la **non dégradation** des parois et des éléments du bâtiment,
- la **tenue** de la structure porteuse.

Compte tenu des critères d'habitabilité portant sur la température de l'ambiance interne du bâtiment, l'étude comprendra également le calcul de la température de ce volume. Cette analyse peut être réalisée en définissant un échange en convection entre la température de paroi interne du bâtiment et la température du volume interne.

### Bilan

Le schéma ci-dessous récapitule le principe de l'équation de la chaleur à mettre en place :

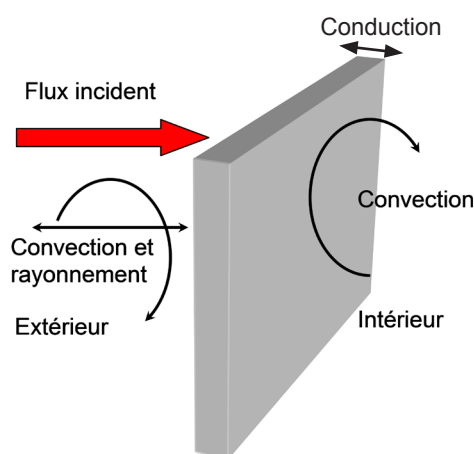


Figure 20 : Modèle thermique pour un flux radiatif appliqué sur la paroi d'un bâtiment

### Exemples d'application

Afin de guider au mieux le lecteur pour la réalisation de l'étude de vulnérabilité, deux études types portant sur deux ERP distincts sont présentées en **annexe 2** du présent guide.

# Protection des personnes

## Effets thermiques

### Classement REI

Les euroclasses de résistance au feu tentent d'harmoniser les systèmes nationaux au sein de l'Union européenne. Il existe là-aussi trois classes :

- R : résistance mécanique ou stabilité
- E : étanchéité aux gaz et flammes
- I : isolation thermique (forcément utilisé en complément d'une classification R ou E)

Ces lettres sont suivies de 2 ou 3 chiffres donnant le temps de résistance (mn), par exemple : REI 120 = coupe-feu pendant 120 minutes.

Ces deux bâtiments possèdent des conceptions différentes. Ils ont été supposés soumis à des niveaux de flux compris entre 5 et 12 kW/m<sup>2</sup>.

Ces études ont été réalisées en utilisant les méthodes citées ci-avant.

## Exemples de renforcements aux effets thermiques

Le présent paragraphe a pour objectif de préciser quelques stratégies de renforcement utilisables en fonction de la typologie de la structure et du niveau d'aléa. Cette liste de renforcements n'est pas exhaustive.

### Bardages métalliques

Pour les **bardages métalliques simple peau** pour lesquels on obtient rapidement une température de paroi interne trop élevée vis-à-vis du risque de propagation d'incendie, un exemple de solution consiste à ajouter une couche d'isolant suffisamment épaisse pour limiter la température en paroi interne.

Pour les **bardages double peau**, la mise en place d'une épaisseur d'isolant suffisante permettra de respecter le critère de température en paroi interne. Néanmoins, il existe toujours un risque que l'isolant atteigne une température supérieure à sa température de dégradation. Celui-ci ne remplirait plus alors sa fonction d'isolation et des fumées toxiques pourraient engendrer des effets sur les occupants.

### Murs / dalles en béton armé

Le critère de tenue aux effets thermiques pour les éléments porteurs en béton armé réside dans l'augmentation de température que subissent les fers en traction. Dans le cas où ce critère n'est pas respecté, on pourra par exemple envisager d'augmenter l'enrobage des fers afin de limiter la montée en température de l'acier.

### Vitrages des fenêtres

Si la dose thermique ou la densité de flux thermique transmise dépasse le seuil des effets irréversibles, la mise en place de films filtrants ou de vitrages dont le taux de transmission est plus faible peut être envisagée.

Le second critère à vérifier réside dans la tenue thermomécanique du vitrage. En effet, un vitrage impacté par un rayonnement thermique doit conserver son intégrité afin de protéger les occupants d'un bâtiment. Ainsi, les verres durcis ou trempés doivent être privilégiés sur les verres recuits ou feuilletés.

### Châssis des fenêtres et des portes

Les châssis en PVC sont peu adaptés pour des flux supérieurs à 3 kW/m<sup>2</sup>. En effet il est nécessaire d'envisager la mise en place de châssis en bois, en inox ou en acier. Quand le niveau de flux thermique est tel que ces châssis sont vulnérables, seule l'installation de châssis REI spécifiques est en mesure de convenir.

### Portes pleines

Comme pour les châssis en PVC, les portes pleines en PVC sont peu résistantes lorsqu'elles sont soumises à des niveaux de flux thermiques élevés. Il est conseillé de privilégier des portes dont la peau est en métal ou en bois. Des portes classées REI sont également commercialisées et sont tout à fait adaptées pour résister aux effets d'une agression thermique externe.

# Protection des personnes

## Effets thermiques

(4) Document téléchargeable  
gratuitement sur :  
[http://www.gesip.com/  
rapports-techniques.php](http://www.gesip.com/rapports-techniques.php)

### Structures porteuses métalliques

Dans le cas où les modélisations montreraient que le niveau de température dans les structures porteuses métalliques dépasse le seuil des 350°C, une solution consisterait par exemple, à améliorer l'isolation de cette ossature en :

- améliorant l'isolation des parois de l'enveloppe,
- la recouvrant d'un coffrage isolant (ou flocage, ou peintures intumescentes,...).

### Cas particulier des flash fire

Concernant le cas d'un ERP ou d'un IGH, il conviendra de s'assurer que ceux-ci ne se situent pas dans une zone de flash fire de façon à éviter toute infiltration dans ces bâtiments, qui pourraient conduire à une inflammation et/ou explosion interne.

Il conviendra, le cas échéant, de garantir l'étanchéité des façades se trouvant dans une zone de flash fire en s'assurant notamment qu'il ne s'y trouve ni ouvrants ni ouvertures.

### Solutions alternatives aux renforcements

Une solution alternative au renforcement du bâtiment peut consister en un aménagement intérieur du bâtiment, qui sera pensé de façon à ce que les parties dédiées à l'accueil du public offrent une protection répondant aux critères définis dans le présent chapitre.

En outre les parties ne recevant pas de public devront être séparées des parties recevant du public par des séparations coupe-feu de degré suffisant (durée au moins égale à la durée d'évacuation retenue pour un ERP avec mobilité, et à 2h pour un ERP sans mobilité ou un IGH).

Le guide professionnel du GESIP<sup>(4)</sup> qui traite des EDD des canalisations de transport prévoit également ce type de configuration (cf annexe 7 § 2.1.2).



# *Protection des personnes - effets de surpression*

## *57 Critères de vulnérabilité*

*57 objectifs de performance recherchés*

*57 tableau de dégâts illustratifs*

## *58 Analyse proposée*

*59 calcul statique élastique linéaire équivalent*

*60 calcul dynamique non linéaire*

## *62 Exemples d'application*

## *63 Exemples de renforcement*

*63 ossature métallique*

*63 panneaux de bardages*

*63 murs*

*64 fenêtres / vitrages*

*64 cas des bâtiments de plain pied en acier*

## *64 Solutions alternatives aux renforcements*

# Protection des personnes

## Effets de surpression

### Critères de vulnérabilité

Dans le cadre des effets de surpression, l'unique objectif est la **protection des personnes** abritées par le bâtiment.

### Objectifs de performances recherchés

Éléments du bâti	Objectif recherché	Exemple de critère qui permet d'atteindre l'objectif
<b>Éléments ayant une fonction porteuse :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ poteaux,</li> <li>▪ poutres,</li> <li>▪ murs porteurs,</li> <li>▪ murs de remplissage.</li> </ul>	Non effondrement du bâtiment	<p>D'une manière générale, il convient de souligner que des défaillances des éléments de structure peuvent être <b>tolérées localement</b>, tant que celles-ci ne conduisent pas à l'effondrement d'éléments de nature à provoquer des blessures pour les occupants.</p> <p>Plus précisément, cet état d'endommagement acceptable induit que <b>la tenue soit assurée mais qu'elle peut être accompagnée de déformations résiduelles</b> pouvant être importantes au point de nécessiter des réparations, voire la destruction du bâtiment après accident.</p> <p>Cette possibilité d'incursion dans le domaine plastique des matériaux n'est valable que pour certaines structures possédant une énergie de déformation plastique non négligeable en cas de sollicitation mécanique (éléments en acier,...).</p> <p>Les matériaux fragiles (murs de maçonnerie,...) ne présentent pas cette particularité et ne peuvent ainsi être sollicités que dans le domaine de déformation élastique.</p>
<b>Éléments non structuraux, portes et fenêtres</b>	Tenue de ces éléments pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ prévenir la projection d'éléments</li> <li>▪ Difficultés d'évacuation en raison de chute d'éléments</li> </ul>	Tout comme pour les éléments ayant une fonction porteuse, la plastification de ces éléments non structuraux est possible tant que ceux-ci restent solidaires de l'enveloppe du bâtiment.

Tableau 10 : Objectifs de performance pour l'analyse de la protection des personnes vis-à-vis des effets de surpression

### Tableau de dégâts illustratifs

A titre d'exemple, les niveaux de surpression généralement considérés comme pouvant conduire à la ruine d'éléments du bâti ont été réunis.

Ces valeurs ne sont que des **ordres de grandeur** et sont fournies **à titre indicatif**. Ainsi elles ne permettent pas de prendre en compte l'aspect temporel du signal de surpression ni la diversité des technologies et des matériaux utilisés dans le domaine de la construction de bâtiments.

Ce tableau est donc utilisable pour une première estimation de la vulnérabilité, et le cas échéant dans le cadre d'un avant-projet sommaire, pour lesquelles on préférera les méthodes simplifiées de diagnostic simple issues du guide « Cahier applicatif du complément technique de la vulnérabilité du bâti aux effets de surpression » référencé INERIS-DRA-08-99461-15249A.

# Protection des personnes

## Effets de surpression

Éléments d'un bâtiment	Seuil de surpression maximal
Vitrages de grandes dimensions	10 mbar
Vitrages classiques	20 à 50 mbar
Bardages	20 à 80 mbar
Murs de maçonnerie/en parpaings	100 à 300 mbar

**Tableau 11 : niveaux de surpression illustratifs généralement considérés pour obtenir des dégâts**

Néanmoins, pour de la conception neuve et compte tenu du niveau de gravité lié à l'endommagement d'un ERP par une explosion, on ne peut s'affranchir d'une analyse fine (cf paragraphe suivant).

### Analyse proposée

L'étude de la tenue des structures aux effets de surpression consiste à réaliser une analyse de tenue mécanique sur l'ensemble des éléments constituant l'enveloppe du bâtiment (enveloppe externe et structure porteuse).

Afin de mener à bien cette étude, il est proposé de privilégier l'utilisation d'une méthode analytique fondée sur des calculs statiques élastiques linéaires équivalents, ou un calcul dynamique non linéaire. L'ensemble des outils et méthodes utilisés sont rassemblés dans le **référentiel « Résistance des structures »**<sup>(5)</sup>.

Le comportement des structures soumises à des ondes de pression n'est pas seulement fonction de l'intensité (surpression maximale) de l'onde reçue, mais également de sa durée et de sa forme. Soumise à un effort soudain, une structure est accélérée et l'effet de l'inertie et des vibrations peut amener à une amplification ou une atténuation des contraintes internes par rapport à un chargement statique. En fonction des niveaux de pression et des durées considérés, on distingue 3 domaines où les techniques de calcul sont différentes : quasi-statique, pression-temps, impulsionnel.

Pour des structures simples (homogènes, 1 mode de rupture caractéristique), un modèle **masse-ressort élasto-plastique** est souvent pertinent et suffisant. Le comportement de l'élément de structure lorsqu'il est soumis à une sollicitation  $P(t)$  est représenté par l'équation suivante :

$$M \cdot d^2x/dt^2 - R(t) = F(t)$$

où  $M$  et  $R$  sont la masse équivalente et la force de rappel équivalente et ( $R(t) = Kx$  pour un ressort élastique).



**Figure 21 : Analogie masse ressort**

(5) INERIS, Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA 35) – La résistance des structures aux actions accidentelles, 2007 (téléchargeable gratuitement sur [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr)).

# Protection des personnes

## Effets de surpression

Deux approches peuvent être utilisées :

- ❑ un **calcul statique** élastique linéaire équivalent ;
- ❑ un **calcul dynamique** non linéaire.

### Calcul statique élastique linéaire équivalent

Le principe de cette méthode est de s'affranchir de l'aspect dynamique du chargement et du comportement de la structure.

Le développement d'une analyse dynamique simple montre qu'une pression dynamique peut être équivalente à une pression statique à un facteur DLF (Dynamic Load Factor ou facteur de chargement dynamique) près.

En fait, il s'agit de déterminer une pression statique équivalente par la relation suivante :

$$P_{se} = P_{max} \times DLF$$

Avec  $P_{se}$  : pression statique équivalente

$P_{max}$  : pression maximale exercée sur la structure par l'onde de souffle.

Le coefficient DLF dépend :

- ❑ du rapport entre la durée de la surpression et la période propre de l'élément de structure étudiée ( $t_L / T$ ) ;
- ❑ de la forme de la courbe  $P(t)$ .

La démarche de ce type d'analyse met en œuvre les étapes suivantes :

- 1 détermination de la **pression maximale** et la **durée du chargement** ( $P_{max}$  et  $t_L$ ) ;
- 2 détermination de la **période propre** de l'élément étudié ( $T$ ) ;
- 3 déduction, en fonction du rapport ( $t_L/T$ ), du **DLF** à partir de la figure ci-dessous ;

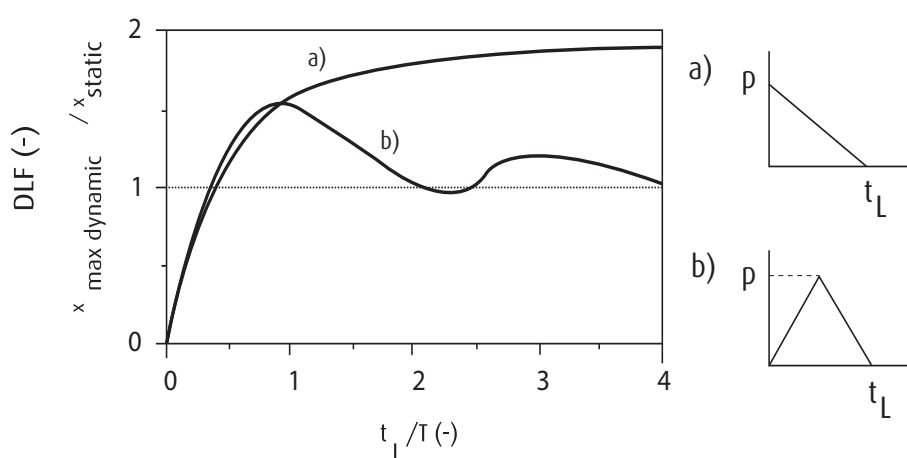
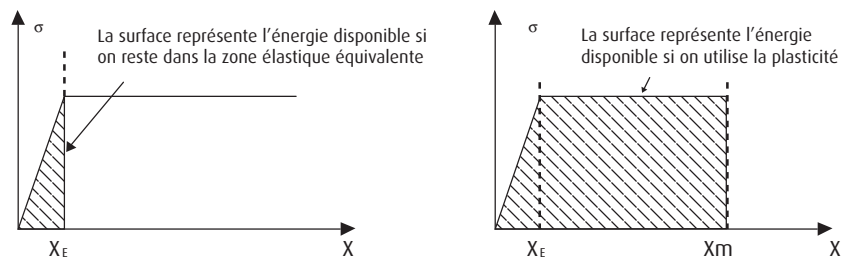


Figure 22 : Facteur d'amplification dynamique pour un signal de forme triangulaire rectangle et triangulaire isocèle

- 4 calcul de la **pression statique équivalente** ;
- 5 utilisation des règles classiques en génie civil pour calculer les structures.

# Protection des personnes

## Effets de surpression



**Figure 23 : Dissipation d'énergie dans les domaines élastique équivalent et plastique**

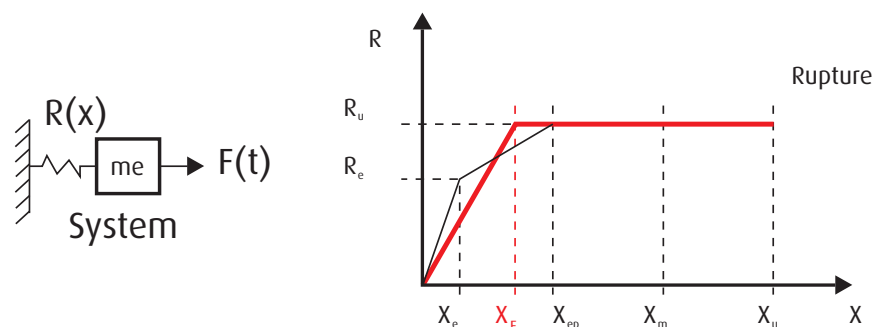
Cette méthode conduit à n'utiliser que la phase élastique ou élastique équivalente des matériaux. C'est pourquoi, si cette méthode ne permet pas de conclure sur la résistance de l'élément, il est proposé de se baser sur un calcul dynamique non linéaire prenant en compte la plastification des matériaux.

### Calcul dynamique non linéaire

Cette méthode est celle développée par Biggs (1954), perfectionnée par de nombreux auteurs notamment les armées américaines en 1968 puis en 1986 [TM5-1300 1990].

Connaissant, en fonction du temps, la courbe de chargement qui s'applique sur la structure, la démarche à suivre dans ce type d'analyse peut être résumée de la manière suivante :

- ❶ détermination des **paramètres** de la structure ou de l'élément de structure étudié (**dimensions, ferrailage, épaisseur, conditions d'appuis, ...**) ;
- ❷ détermination du **profil de rupture** de la structure ou de l'élément de structure ;
- ❸ détermination des différents coefficients (**masse équivalente  $m_e$ , raideur élastique équivalente  $K_E$ , ...**) et de la **fonction équivalente contrainte-déplacement** (caractérisée par  $R_u$ ,  $X_E$  définies ci-dessous), associées au système masse-ressort élasto-plastique équivalent ;



— Courbe contrainte-déplacement équivalente

$R_u$  : résistance unitaire de rupture       $X_E$  : limite de la déformation élastique équivalente  
 $R_e$  : résistance unitaire élastique       $X_u$  : déformation à la rupture  
 $X_m$  : déformation maximum atteinte par l'élément

**Figure 24: Ressort élasto-plastique équivalent, courbe contrainte-déplacement équivalente**

- ❹ détermination de la période propre  $T_N$  de la structure ou de l'élément de structure ;
- ❺ résolution des équations à l'aide d'abaques ou par une méthode impulsionnelle ; Dans la grande majorité des cas, le domaine de réponse des structures ou

# Protection des personnes

## Effets de surpression

des éléments de structure étudiés est le domaine pression-temps. Ce faisant, compte tenu de la forme commune de l'ensemble des signaux de surpression retenus (triangulaire isocèle), l'abaque reporté ci-dessous, tiré du TM5-1300, permet d'obtenir la valeur du taux de ductilité  $\mu$  défini par :

$$\mu = (X_m / X_E)$$

en fonction :

- du **rapport  $r_u/B$** , qui traduit la pression maximale de l'explosion rapportée à la résistance de l'élément,
- du **rapport  $t_d/T_N$** , qui traduit la période d'application du signal rapportée à la période de vibration élasto-plastique.

Ceci étant, l'angle de rotation de l'élément étudié peut être déterminé.

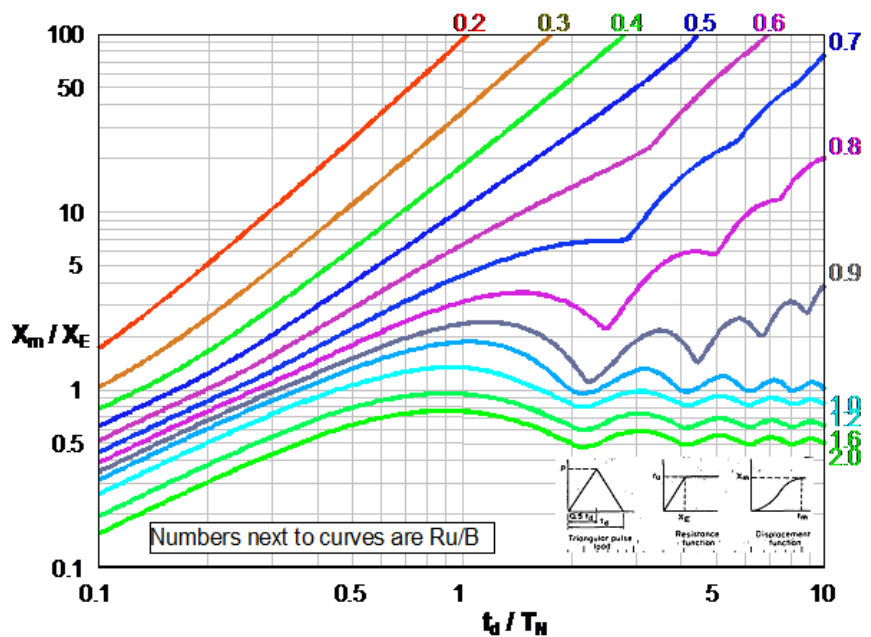


Figure 25 : Taux de ductilité en fonction de  $t_d/T_N$  et de  $r_u$  pour un système masse ressort élasto-plastique (1 degré de liberté), signal de surpression triangulaire isocèle

- ⑥ comparaison des résultats avec les **critères** de déformations ou d'effets acceptables.

### Stabilité globale

Les bâtiments étudiés sont des bâtiments industriels avec une ossature formée de poteaux et de poutres. Afin de s'assurer de la stabilité de tels bâtiments, un des critères possibles à vérifier est le suivant :  $(\delta / H) \leq 1/25$ , avec :

$\delta$  : déplacement maximal du système masse ressort équivalent

$H$  : hauteur du bâtiment

direction de propagation du front d'onde

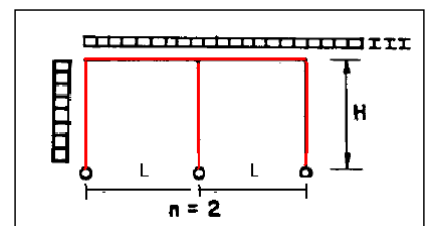
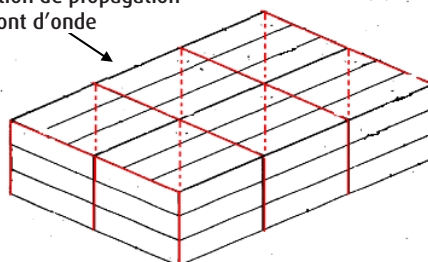


Figure 26 : Bâtiment avec ossature en poteaux-poutres soumis à une onde de surpression

# Protection des personnes

## Effets de surpression

### Étude élémentaire : critère de déformation

La vérification de l'acceptabilité des déformations des divers éléments de structures s'exprime au moyen d'un double critère :

$$\mu = X_m / X_E \leq \mu_{\max}$$

$$\theta \leq \theta_{\max}$$

avec

$\mu$  : taux de ductilité ;

$X_m$  : déformation maximum atteinte par l'élément de structure ;

$X_E$  : limite de la déformation élastique équivalente.

$\mu_{\max}$  : taux de ductilité maximale autorisé ;

$\theta$  : angle de rotation aux appuis ;

$\theta_{\max}$  : angle de rotation aux appuis autorisé.

Des critères de résistance pour les différents éléments de structure ont été définis notamment dans le document UFC (US Department of Defense. (5 december 2008). Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions UFC 3-340-02. United States of America: US Department of Defense). Ces critères sont repris dans le **Tableau 12** ci-après :

Type d'élément	$\mu_{\max}$	$\theta_{\max}$
Poutre métallique	10	2°
Mur en béton armé	10	2°
Mur de maçonnerie en parpaings ou en briques	-	1°
Bardage métallique	1.75	1.25°

Tableau 12 : Critères de résistance (selon UFC 3-340-02)

### Exemples d'application

Afin de guider au mieux le lecteur pour la réalisation de l'étude de vulnérabilité, deux études types portant sur deux ERP distincts sont présentées en **annexe 3** du présent guide.

Ces deux bâtiments possèdent des conceptions différentes. Ils ont été supposés soumis à des niveaux de surpression de 55 mbar et/ou 120 mbar.

Ces études ont été réalisées en utilisant les méthodes citées ci-avant.

# Protection des personnes

## Effets de surpression

### Exemples de renforcement

#### Ossature métallique

Dans le cas où les modélisations réalisées par le bureau d'études révèlent que l'ossature se déformerait plastiquement avec un risque de ruine, les solutions de renforcement sont multiples :

- ❑ Diminution de l'**entraxe** en ajoutant des éléments supplémentaires (poteaux, poutres, lisses, pannes).
- ❑ **Remplacement** des éléments de l'**ossature** par des éléments plus massifs (poteaux, poutres, lisses, pannes).
- ❑ Pour les **poutres**, **diminution de la portée** en ajoutant des poteaux intermédiaires de soutien.

#### Panneaux de bardage

Dans le cas où la portée d'un panneau de bardage s'avère trop élevée et présente un risque de flexion avec rupture face à un effet de surpression, les solutions suivantes sont envisageables :

- ❑ **Diminution de la portée** du **bardage** en ajoutant des poteaux supplémentaires (bardage horizontal) ou des lisses supplémentaires (bardage vertical)
- ❑ Mise en place d'un bardage dont la **résistance est plus importante** (bardage double peau,...)

#### Murs

Différentes solutions sont envisageables pour renforcer un mur à la surpression :

- ❑ **Doubleage** du mur par un mur en parpaings en partie interne

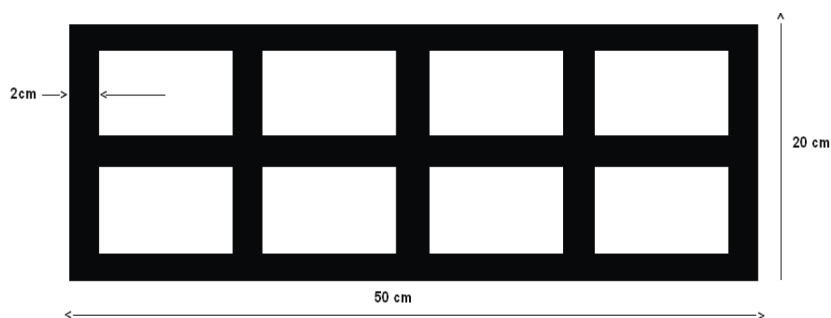


Figure 27 : Exemple de parpaing (coupe) respectant les exigences minimales pour le renforcement

- ❑ **Renforcement** de la paroi en réduisant la portée du mur par la **pose de poteaux métalliques** (IPN) contre la paroi à intervalles réguliers (1,5 m par exemple). Cette diminution de portée du mur permet d'augmenter ainsi sa raideur en flexion. Les poteaux devront assurer la tenue du plancher en cas de défaillance du mur. Cette solution peut s'accompagner de la pose d'une cloison à des fins d'esthétique ou d'isolation thermique.
- ❑ Même solution que ci-dessus agrémentée d'un **remplissage** en dur entre chaque poteau.
- ❑ La paroi peut être traitée par **chemisage** (cf. **figure ci-après**) à l'aide d'un treillis métallique et de béton projeté.



# Protection des personnes

## Effets de surpression

### Note

Le guide CSTB « Guide PPRT : complément technique relatif à l'effet de surpression » référence 26005165 est téléchargeable gratuitement sur :

[http://www.installations-classees.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport\\_CSTB\\_surpression\\_Vdef.pdf](http://www.installations-classees.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_CSTB_surpression_Vdef.pdf)

(6) Document téléchargeable gratuitement sur

<http://www.installations-classees.developpement-durable.gouv.fr/PPRT-Plan-de-prevention-des.html>

(7) Document téléchargeable gratuitement sur

[http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Guide\\_diagnostic\\_vdef\\_25juillet2016-2.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_diagnostic_vdef_25juillet2016-2.pdf)

(8) Document téléchargeable gratuitement sur

<http://www.ineris.fr/centredoc/batir-sur-guide-pratique-vf-20160404-version-com-avec-logo-meem-1464770002.pdf>

(9) Document téléchargeable gratuitement sur :

<http://www.gesip.com/rapports-techniques.php>

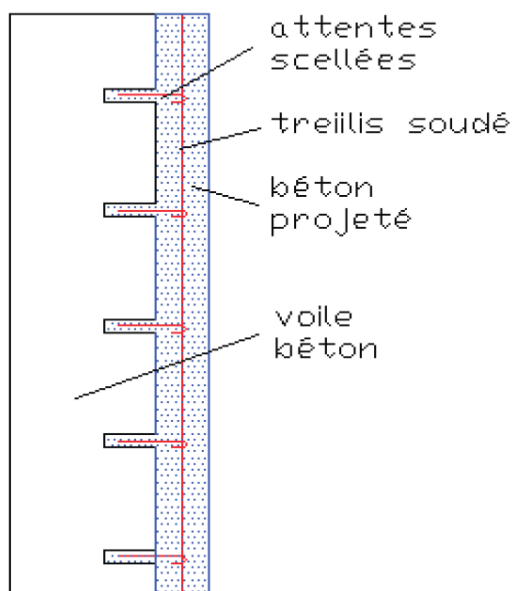


Figure 28 : Exemple de chemisage (guide CSTB)

- La paroi peut être **renforcée** par la pose d'**éléments** en béton armé **préfabriqué**.
- Le **renforcement** de la paroi est réalisé au moyen de **plaques en palplanches** (éventuellement avec cadre métallique).

## Fenêtres/vitrages

Pour les vitrages soumis à des niveaux de surpression compris entre 20 et 50 mbar, il est proposé de se référer au Guide pratique « Fenêtres dans la zone 20-50 mbar – Effets de surpression, diagnostic et mesures de renforcement », référencé DRA-11-117437-05120C<sup>(6)</sup>.

Pour les vitrages soumis à des niveaux de surpression compris entre 50 et 140 mbar, il est proposé de se référer à l'Annexe 2 du « Guide de réalisation des diagnostics de la vulnérabilité de l'habitat existant face aux risques technologiques »<sup>(7)</sup>.

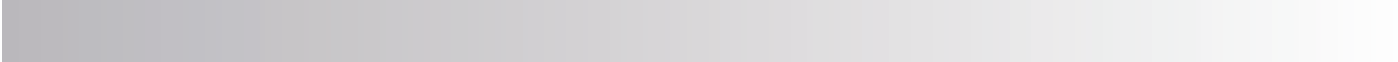
## Cas des bâtiments de plain-pied en acier

Pour les bâtiments de plain-pied en acier soumis à des niveaux de surpression compris entre 20 et 50 mbar, il est proposé de se référer au « Guide pratique de conception d'un bâtiment en acier à usage industriel implanté en zone 20-50 mbar d'un PPRT »<sup>(8)</sup>.

## Solutions alternatives aux renforcements

Une solution alternative au renforcement du bâtiment peut consister en un aménagement intérieur du bâtiment, qui sera pensé de façon à ce que les parties dédiées à l'accueil du public offrent une protection répondant aux critères définis dans le présent chapitre. En outre l'intégrité de ces parties devra être préservée en cas d'effondrement partiel ou total des parties attenantes ne recevant pas de public.

Le guide professionnel du GESIP<sup>(9)</sup> qui traite des EDD des canalisations de transport prévoit également ce type de configuration (cf annexe 7 § 2.1.2).



# *Protection des personnes - effets toxiques ou liés à la concentration*

# Protection des personnes

## effets toxiques et liés à la concentration

**(10)** Document téléchargeable  
gratuitement sur :

<http://www.installations-classees.developpement-durable.gouv.fr/PPRT-Plan-de-prevention-des.html>

Comme indiqué au chapitre « **objet et contenu technique du guide** », l'analyse de la protection des personnes vis-à-vis des effets toxiques et des effets liés à la concentration pour certains gaz (oxygène, azote, dioxyde de carbone) n'a pas pu faire l'objet d'un développement spécifique, en raison notamment :

- ❑ de la **faible proportion** de canalisations transportant ce type de produits sur le territoire national,
- ❑ de l'hétérogénéité des **hypothèses de rejet** d'une part et des **configurations bâtementaires** spécifiques (ex. conditions de ventilation) d'autre part.

Ces effets devront faire l'objet d'une étude au cas par cas.

Cette étude pourra s'appuyer sur les principes décrits dans :

- ❑ le « Guide PPRT - Complément technique relatif à l'effet toxique ». Ce document<sup>(10)</sup>, établi par le CERTU, le CETE de Lyon et l'INERIS, vise à proposer une méthodologie pour les études de vulnérabilité du bâti à réaliser dans le cadre des PPRT ;
- ❑ et les documents connexes à ce guide.

Ce chapitre pourra être complété dans une version ultérieure du présent guide.

# *Protection des personnes - effets combinés*

# Protection des personnes effets combinés

**(11)** Si les conditions relatives à la réactivité du fluide et à l'environnement de la fuite sont réunies pour que le phénomène d'UVCE soit possible.

L'analyse de la protection vis-à-vis des effets combinés concerne les pertes de confinement susceptibles de générer plusieurs phénomènes dangereux de nature différente.

Elle fait suite à l'analyse de la protection des personnes vis-à-vis de chacun de ces phénomènes dangereux, selon les principes décrits dans les chapitres précédents.

L'analyse de la protection vis-à-vis des effets combinés consiste à étudier le comportement du bâtiment en supposant que ce bâtiment est soumis successivement aux différents phénomènes dangereux possibles suite à la perte de confinement, en retenant un ordre le plus réaliste possible.

Cette analyse prend en compte les éventuelles mesures de renforcement de la protection des personnes définies aux étapes précédentes.

Par exemple :

- ❑ en cas d'inflammation retardée d'une fuite de gaz inflammable, les deux phénomènes dangereux successifs seront l'UVCE<sup>(11)</sup> puis le feu torche ;
- ❑ en cas d'inflammation retardée d'une fuite de gaz toxique et inflammable, les phénomènes dangereux successifs seront la dispersion toxique puis l'UVCE, puis le feu torche ou de nouveau la dispersion toxique ;
- ❑ en cas d'inflammation retardée d'une fuite de liquide inflammable, les deux phénomènes dangereux successifs seront l'UVCE puis le feu de nappe.

Il s'agit notamment de vérifier que l'efficacité des éléments sur lesquels repose la protection des personnes face au second phénomène n'est pas remise en cause par le premier phénomène (qu'il s'agisse des éléments prévus dans le dimensionnement initial du bâtiment ou des mesures de renforcement de la protection des personnes déterminées en application des étapes précédentes).

Pour poursuivre l'exemple 1 ci-dessus, si la protection vis-à-vis des effets thermiques d'un feu torche est assurée par une couche supplémentaire d'isolant, il convient de vérifier que la fixation de cet isolant est suffisante pour résister à la surpression initiale.

Dans cette analyse, une attention particulière devra être portée à l'intégrité des vitres en cas d'explosion.

Ce chapitre pourra être complété dans une version ultérieure du présent guide.

# Annexes

71 *Annexe 1*

*Description et illustration des principaux phénomènes dangereux rencontrés dans les études de dangers*

82 *Annexe 2*

*Exemples d'application pour l'analyse de la protection vis-à-vis des effets thermiques*

94 *Annexe 3*

*Exemples d'application pour l'analyse de la protection vis-à-vis des effets de surpression*

## Annexe 1

# Principaux phénomènes dangereux

## rencontrés dans les études de dangers

### Note

Cette annexe présente les phénomènes dangereux dans un contexte plus large que les canalisations de transport (installations industrielles, ports, ...).

## Dispersion atmosphérique

### Dispersion d'un nuage toxique ou inflammable

#### Description du phénomène physique

La dispersion atmosphérique caractérise le devenir dans le temps et dans l'espace d'un ensemble de particules (aérosols, gaz, poussières) rejetées dans l'atmosphère. L'émission d'un produit à l'atmosphère peut revêtir un caractère :

- ❑ soit **chronique**, avec des émissions à l'atmosphère plus ou moins continues ou périodiques dans le temps (gaz d'échappement des voitures, les fumées d'usines,...).
- ❑ soit **accidentel**, avec des émissions à l'atmosphère ponctuelles dans le temps, non désirées, comme la fuite d'une cuve ou un dégagement de fumées dû à un incendie. Seul l'aspect accidentel sera développé par la suite.

Les conditions de dispersion atmosphérique d'un produit vont dépendre de plusieurs paramètres dont l'influence sera précisée par la suite :

- ❑ les **conditions de rejet** (nature du nuage de produit, mode d'émission...);
- ❑ les **conditions météorologiques** (champ de vent, de température...);
- ❑ l'**environnement** (nature du sol, présence d'obstacles, topographie...).

**Exemple concret : La catastrophe de Bhopal (Inde), 2 - 3 décembre 1984 :**  
<http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/7022/>

#### Chronologie

- ❑ 2 décembre vers 23h30, des opérateurs décèlent une fuite de MIC (isocyanate de méthyle) au-dessus d'une cuve de stockage suite à l'augmentation de pression due à l'hydrolyse et la polycondensation du MIC.
- ❑ Vers 00h30, l'alarme de l'usine est déclenchée.
- ❑ Vers 01h00, des lances à incendie ainsi que des rideaux d'eau sont utilisés dans le but de diluer les émanations toxiques et de refroidir la citerne.
- ❑ Vers 02h00, la police enregistre les premiers appels téléphoniques concernant l'accident.
- ❑ Vers 02h30, la sirène avertissant la population est activée alors que 23 ou 42 t de MIC (selon les sources) ont déjà été émises dans l'atmosphère. L'émission de MIC s'arrête vers 02h30 après fermeture de la soupape. Le nuage toxique se dirige vers les bidonvilles, il s'étend sur plus de 3 km et sur une superficie estimée à 20 km<sup>2</sup> ou plus de 50 km<sup>2</sup> selon les sources.



#### Conséquences

- ❑ Selon un bilan officiel des autorités indiennes, le nombre de victimes atteint 1 754 morts et 170 000 intoxiqués dont 12 000 dans un état critique le jour même de l'accident.



## Annexe 1

# Principaux phénomènes dangereux

rencontrés dans les études de dangers

### Rappel des effets à considérer

Les effets toxiques sur l'homme sont à estimer, ces effets dépendent de la nature des produits rejetés. Pour chacun d'entre eux, il est possible d'utiliser les seuils d'effets létaux significatifs, létaux et irréversibles disponibles sur le site internet INERIS ou d'utiliser la méthodologie décrite sur ce même site pour les déterminer. Un calcul de dose est à privilégier.

### Méthodologie de calcul

La figure suivante reprend les différentes typologies de terme source dans le cas général d'une fuite de gaz liquéfiés (cas le plus complet). Dans ce cas précis, le nuage dispersé sera constitué des contributions suivantes :

- ❑ du flash lors de l'évaporation à la brèche (vaporisation instantanée d'une partie du liquide liée à la détente du produit),
- ❑ d'aérosols et de vapeur dans la phase d'entraînement,
- ❑ de vapeur après impact éventuel sur un obstacle. Généralement, une partie de l'aérosol qui impacte l'obstacle est soit piégée par l'obstacle (il contribue alors à la formation de la flaque), soit évaporé après contact avec l'obstacle.
- ❑ de vapeur issue de l'évaporation du liquide répandu au sol.

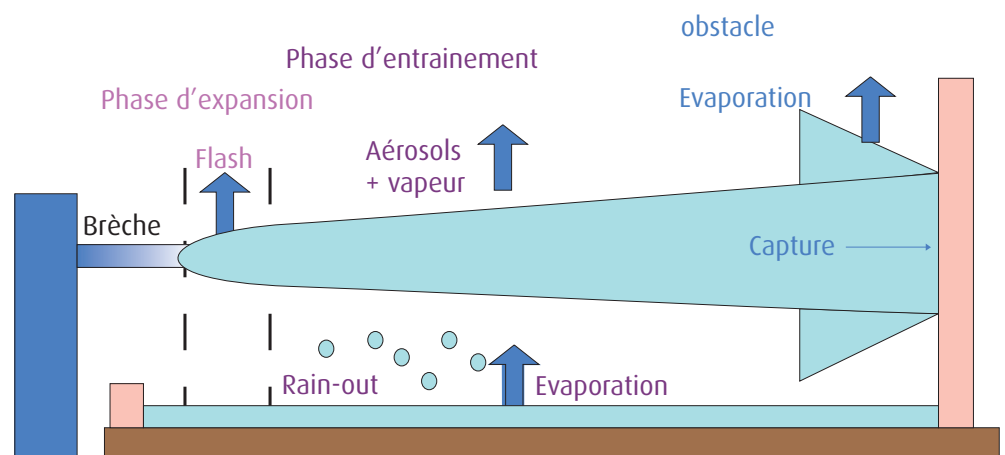


Figure 29 : représentation schématique des différentes contributions au terme source

Par la suite pour déterminer comment se transfèrent les vapeurs toxiques vers les cibles, il faut choisir la valeur de certains paramètres qui vont influencer la dispersion atmosphérique de ces vapeurs. Ces paramètres sont :

- ❑ les **conditions météorologiques** (stabilité et vitesse de vent), les conditions retenues généralement en France sont les conditions F3 et D5.;
- ❑ la **température** de l'atmosphère ;
- ❑ la **rugosité** de l'environnement qui est liée à la hauteur des obstacles situés dans l'environnement proche du lieu où se produit la fuite ;
- ❑ le **relief** de l'environnement, la présence de certains reliefs (vallée, falaise,...) exclut le recours à certains types d'outils de calculs ;
- ❑ le **choix de l'outil de modélisation** de la dispersion atmosphérique doit également s'effectuer en adéquation avec les caractéristiques du rejet (présence de particules solides ou susceptibles de se déposer) ou les propriétés des produits rejetés (réaction chimique avec l'humidité de l'air par exemple, cas de l'HF).

## Annexe 1

# Principaux phénomènes dangereux

rencontrés dans les études de dangers

## Dispersion de fumées d'incendie

### Description du phénomène physique

Un incendie constitue une source d'émission de gaz toxiques assez particulière du fait de la diversité des gaz émis, de leur température et du mouvement ascensionnel général des fumées qui résulte de la poussée d'Archimède.

En deçà de certaines distances sous le vent d'un incendie, des effets sur les personnes liés à la toxicité des fumées pourraient être ressentis (personnes en charge de la conduite ou travaillant sur des équipements fonctionnant au contact de l'air ou avec un apport d'air). Pour évaluer ces distances, une démarche en trois étapes est nécessaire :



- ❑ **caractériser la source** d'émission des polluants toxiques, c'est-à-dire, entre autres, la hauteur, la vitesse et la température d'émission des fumées rejetées à l'atmosphère ainsi que les concentrations des gaz toxiques en tenant compte de la dilution induite par l'air en excès entraîné par l'incendie;
- ❑ **calculer la dispersion atmosphérique** et notamment les niveaux maximum de concentration en gaz toxiques au niveau du sol ;
- ❑ **caractériser la toxicité des fumées** d'incendie au moyen de seuils critiques correspondant à l'apparition d'un effet donné sur la santé humaine et donc sur les personnes en charge de la conduite des installations.

### Exemple concret : SOMERSET WEST (Afrique du Sud) le 17 décembre 1995

<http://www.ineris.fr/centredoc/65.pdf>

### Chronologie

En décembre 1995, juste avant l'incendie, 15 710 t de soufre solide étaient présentes sur le site. Elles étaient réparties en 9 piles de 3 m de hauteur, disposées sur une aire de 130 sur 200 mètres.

Un feu de broussailles se déclare à proximité du stockage de soufre et se propage à ce stockage malgré la présence de coupe-feux. Quarante minutes plus tard, du soufre fondu en feu s'écoule dans le canal d'orage. Une épaisse fumée se dégage.

Des problèmes d'alimentation en eau sont observés (pression insuffisante du réseau) mais un dispositif hydraulique comportant douze camions pompes est opérationnel à minuit. Des bulldozers tentent de recouvrir le soufre fondu en feu et d'établir un barrage dans le canal d'orage. Le soufre liquide s'étend sur une distance d'un demi-kilomètre. Le nuage se répand jusqu'à la ville de Macassar (30 à 40 000 habitants) située à 2,5 km sous le vent. 2 500 à 3 000 personnes sont évacuées de façon désordonnée et le reste de la population est prié de se confiner.

Au petit matin, des hélicoptères bombardiers d'eau sont utilisés en renfort des moyens au sol pour procéder à l'extinction du stockage. Le fort vent est pénalisant, il limite les efforts des pompiers. Lorsqu'il faiblit à la mi-journée, le feu passe sous contrôle avec l'aide des bulldozers. A 15h22, le feu est éteint, soit près de 21 heures après son départ. Une quantité importante de soufre (7 250 t) a brûlé, générant près de 14 000 t de SO<sub>2</sub>. D'importants moyens ont été néces-

## Annexe 1

# Principaux phénomènes dangereux

rencontrés dans les études de dangers

saires pour venir à bout du sinistre : deux hélicoptères ayant déversé près de 450 m<sup>3</sup> d'eau en 7 heures, bulldozers, 150 pompiers ...

### Conséquences :

Le nuage toxique a englobé toute la ville de Macassar. Selon les sources, le bilan humain varie. Il semblerait qu'il soit de :

- ▣ 500 personnes hospitalisées en unité de soin traumatologique,
- ▣ 2 ou 3 personnes décédées au moment de l'incendie,
- ▣ 15 décès in fine, suite aux complications respiratoires générées par la toxicité des fumées.

Plusieurs victimes se trouvaient à plus d'un kilomètre de la source d'émission des fumées. Des gênes respiratoires ont été ressenties par la population de communes se trouvant à une vingtaine de kilomètres du lieu du sinistre. Des dommages importants ont été observés sur la végétation (arbres, cultures...) jusqu'à une vingtaine de kilomètres sous le vent.

### Rappel des effets à considérer

Les effets toxiques sont à évaluer sur les personnes en fonction des polluants mis en jeu. Dans le cas de fumées d'incendie, plusieurs gaz toxiques sont susceptibles d'être émis simultanément à l'atmosphère. Le seuil (souvent exprimé en termes de concentration volumique ou massique) à retenir pour caractériser la toxicité des fumées n'est pas propre à un gaz pur mais à un mélange de gaz. Dans ce cas, si le mélange est composé de n gaz polluants notés P1, P2, ..., P<sub>i</sub>, ..., P<sub>n</sub>, un seuil « équivalent » peut être estimé au moyen de la relation suivante :

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{(\text{Concentration du polluant } P_i)}{(\text{Seuil du polluant } P_i)} = \frac{1}{\text{Seuil}_{\text{équivalent}}}$$

L'expression précédente permet, de manière simplifiée, d'une part de prendre en compte la toxicité spécifique à chaque gaz et d'autre part d'additionner leur toxicité respective. Cette démarche est décrite dans la circulaire du 10 mai 2010. Il faut noter qu'une telle approche, ne permet pas de prendre en compte tout effet de synergies ou d'antagonismes éventuels, induit par la présence simultanée des différents gaz.

### Méthodologie de calcul

Le terme source est composé des fumées produites par l'incendie d'une nappe de liquide ou par l'incendie de produits solides. Il faut déterminer la composition des fumées, leur vitesse, leur débit et leur altitude d'émission. Il peut également être important de s'intéresser à la présence ou non de particules solides (suies, brandons,...) dans la mesure où elles sont susceptibles de contribuer à la propagation d'un incendie.

Concernant la dispersion atmosphérique, il convient de choisir l'outil en s'assurant qu'il est capable de prendre en compte les effets de densité (les fumées se comportent au départ comme des gaz légers). De plus, il convient de considérer plusieurs autres conditions météorologiques pour prendre en compte le fait que le rejet se fait en hauteur.

## Annexe 1

# Principaux phénomènes dangereux

rencontrés dans les études de dangers

## Explosion

L'explosion désigne dans le langage courant deux situations relativement différentes :

- ❑ **Explosion physique**, qui résulte de la libération brutale d'une quantité de produit stocké à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Ce type d'explosion produit toujours des effets de pression et parfois des effets thermiques si le produit est inflammable.
  - *Détente pneumatique* (éclatement d'un réservoir de gaz suite à une montée en pression interne,...),
  - *Changement d'état physique* (explosion de chaudière, BLEVE...).
- ❑ **Explosion chimique**, qui résulte généralement d'une réaction exothermique d'une substance avec un comburant (l'oxygène de l'air le plus couramment). Ce type d'explosion produit des effets thermiques et des effets de pression qui résultent de la propagation de l'onde de combustion :
  - *Combustion* => Inflammation et propagation d'une flamme (UVCE, VCE, explosion de poussières dans un silo...),
  - *Réactions de décomposition* (explosifs solides, substances instables).

Pour les effets de surpression, les seuils pour les personnes figurant dans l'arrêté du 29 septembre 2005 sont :

	Surpression (kPa)
Seuil des effets irréversibles	5
Seuil des premiers effets létaux	14
Seuil des effets létaux significatifs	20

Tableau 13 : Effets de surpression pour les personnes figurant dans l'arrêté du 29 septembre 2005

Pour les phénomènes de type boule de feu (BLEVE), les seuils d'effets thermiques pour les personnes figurant dans l'arrêté du 29 septembre 2005 sont :

	Dose thermique (kW/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> .s
Seuil des effets irréversibles	600
Seuil des premiers effets létaux	1000
Seuil des effets létaux significatifs	1800

Tableau 14 : Doses thermiques pour les personnes figurant dans l'arrêté du 29 septembre 2005

## Annexe 1

# Principaux phénomènes dangereux

rencontrés dans les études de dangers

## VCE (vapeur cloud explosion)

### Description du phénomène physique

Les explosions accidentelles de gaz à l'air libre, ou VCE (tiré de l'anglais «Vapour Cloud Explosion »), constituent un des événements les plus redoutés dès lors qu'est considérée la sécurité des activités associées aux gaz inflammables. Ce type d'accident comprend généralement la succession d'étapes suivantes :

- ❑ **Rejet dans l'atmosphère d'un produit combustible**, le produit étant en phase gaz ou en phase liquide ; les combustibles liquides rejetés peuvent rester en suspension (formation d'aérosols) ou se disperser au sol pour former une flaque qui en s'évaporant conduit à son tour à un rejet diffus de gaz,
- ❑ **Mélange avec l'oxygène de l'air** pour former un volume inflammable, et de manière concomitante, dispersion du nuage de gaz dont une partie du volume reste inflammable,
- ❑ **Inflammation** de ce volume,
- ❑ **Propagation d'un front de flamme** au travers de la ou des parties inflammables du nuage. Ce front de flamme agit à la manière d'un piston sur les gaz environnants et peut être à l'origine de la formation d'une onde de pression aérienne si sa vitesse de propagation est suffisante ou si les gaz sont confinés. Dans tous les cas, la propagation des flammes s'accompagne d'une expansion des gaz brûlés qui passent par des températures de plusieurs centaines de °C et jusqu'à 2000 °C environ.

### Exemple concret : Débordement de bac d'essence + VCE - 11 décembre 2005 - Buncefield - Royaume-Uni

#### Chronologie :

- ❑ 05h20 : Débordement d'un réservoir de super sans plomb par surremplissage suite à défaillance du système de sécurité - épandage dans la cuvette de rétention et génération d'un nuage de gaz inflammable
- ❑ 05h38 : Le nuage inflammable s'étend hors de la cuvette.
- ❑ 05h50 : Le nuage s'étend hors du site et atteint des routes et des parkings.
- ❑ 06h01 : Première explosion centrée sur un parking suivie de deux autres quelques minutes plus tard, et début d'un incendie très étendu.



Le niveau de pression maximal au cœur des explosions a été estimé à plus de 500 mbar (700 à 1 000 mbar).

#### Conséquences :

- ❑ Humaines : 43 blessés, 2 000 évacués.
- ❑ Matériel : Dégâts importants sur le site et sur des sites industriels voisins - Vitres brisées jusqu'à 2 km
- ❑ Environnement: Impact écologique jugé faible à ce stade de l'investigation

## Annexe 1

# Principaux phénomènes dangereux

## rencontrés dans les études de dangers

### Sources

The Buncefield Investigation - Third progress report, disponible sur <http://www.hse.gov.uk/news/buncefield/>  
Fiche BARPI n°31312

### Rappel des effets à considérer

Les effets thermiques et de pression sur les personnes et les structures sont à considérer.

### Méthodologie de calcul

Les principales étapes de modélisation des effets produits par un VCE sont les suivantes :

- **Détermination du terme source**, cette étape est en tout point identique à celle décrite pour la dispersion de produits toxiques ou inflammables ;
- **Calcul de dispersion du nuage inflammable**, cette étape est également identique à celle décrite pour la dispersion de produits toxiques ou inflammables. L'objectif est de déterminer jusqu'à quelle distance la concentration dans le nuage est supérieure ou égale à la Limite Inférieure d'Explosivité (LIE) ainsi que la masse inflammable dans le nuage ;
- **Évaluation des effets de pression** suite à l'inflammation du nuage formé et à la propagation de la flamme qui génère une onde de pression. La propagation de la flamme dans le nuage inflammable va dépendre de plusieurs paramètres :
  - De la quantité d'énergie apportée par la source d'inflammation (en un temps donné)
  - De la concentration du nuage. La vitesse de propagation dépend de la richesse du mélange, elle est d'autant plus rapide que cette richesse est proche de 1 (c-à-d dans des proportions stoechiométriques)
  - De la turbulence du jet qui accélère la flamme
  - Du confinement du nuage qui favorise la propagation de la flamme
  - De l'encombrement. La présence d'obstacles génère de la turbulence et donc accélère la flamme.
- **Évaluation des effets thermiques** : il est couramment admis que la distance aux effets létaux et effets létaux significatifs est de l'ordre de grandeur de la distance à la LIE pour les personnes, en raison de la faible durée du phénomène dangereux.

# Annexe 1

## Principaux phénomènes dangereux

rencontrés dans les études de dangers

### Incendie

Plusieurs types d'incendie peuvent se produire ; ils dépendent généralement de la nature du combustible impliqué et de la phase de ce combustible (solide, liquide, ou gaz).

A quelques rares exceptions près, tous ces produits brûlent en phase gazeuse. Pour les liquides, la combustion se développe dans la zone où se mélangent l'air et les vapeurs issues du liquide. Lorsque la combustion est installée, de nouvelles vapeurs sont produites en permanence sous l'effet du rayonnement de la flamme.

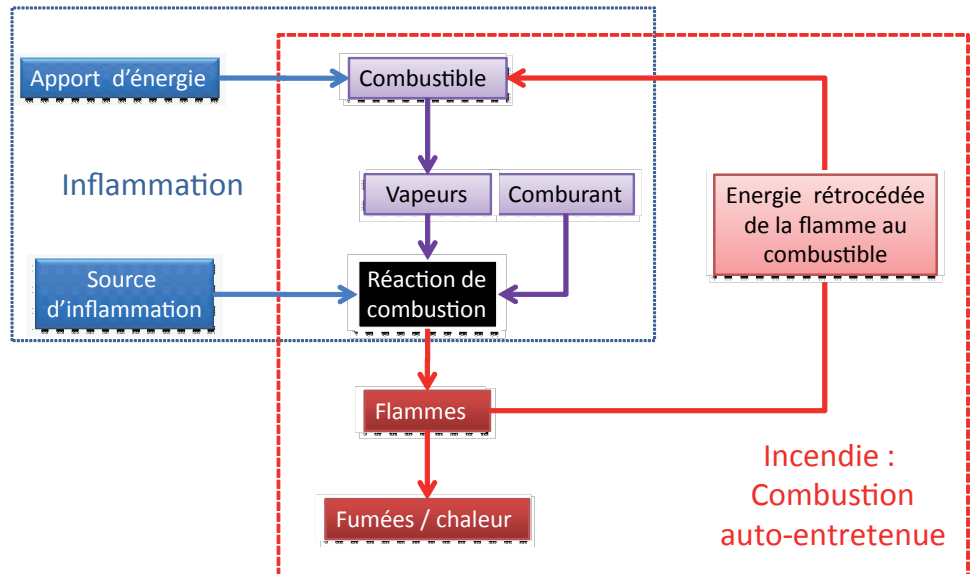


Figure 30 : Principe de l'inflammation et de la combustion auto-entretenue

Pour les effets associés aux phénomènes durant plus de deux minutes, les seuils (pour les personnes) qui figurent dans l'arrêté du 29 septembre 2005 sont :

	Flux thermique (kW/m <sup>2</sup> )
Seuil des effets irréversibles	3
Seuil des premiers effets létaux	5
Seuil des effets létaux significatifs	8

Tableau 15 : Flux thermiques pour les personnes qui figurent dans l'arrêté du 29 septembre 2005

Pour les feux qui durent moins de deux minutes, comme certains feux torche par exemple, les seuils pour les personnes qui figurent dans l'arrêté du 29/09/05 sont :

	Dose thermique (kW/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> .s
Seuil des effets irréversibles	600
Seuil des premiers effets létaux	1000
Seuil des effets létaux significatifs	1800

Tableau 16 : Doses thermiques pour les personnes qui figurent dans l'arrêté du 29 septembre 2005

## Annexe 1

# Principaux phénomènes dangereux

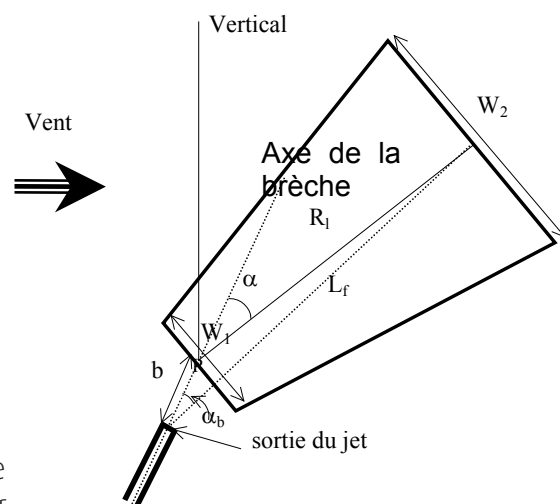
rencontrés dans les études de dangers

## Feu torche

### Description du phénomène physique

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

- Le jet combustible se mélange à l'air et avec l'aide d'une source d'inflammation, se met à brûler seulement lorsque les concentrations de combustible et d'air sont comprises dans une plage définie entre les limites d'inflammabilité (domaine d'inflammabilité).
- Après inflammation du jet, le feu torche s'établit et il en résulte une flamme de diffusion dont l'apparence dépend de la nature du combustible mais aussi de la vitesse du jet combustible par rapport à l'air ambiant.



**Exemple concret : 30/07/2004 - GHISLENGHIEN (Belgique) Violente explosion d'un gazoduc reliant Zeebrugge à la frontière franco-belge dans une zone industrielle.**

<http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/27681/>

### Chronologie :

- Vers 8h30, une fuite est décelée par le sifflement émis par le gaz. Les secours se rendent pour les premières interventions sur zone : elle se situe à proximité d'une usine de fabrication d'outils abrasifs en construction où travaille une trentaine de personnes. Le gazoduc est enterré à 1,10 m de profondeur (diamètre : 1 m ; P= 80 bars).
- A 9h, une violente explosion, ressentie à plusieurs km, se produit, accompagnée de boules de feu spectaculaires : 200 m de haut, 500 m de diamètre. Le feu s'étend à 2 entreprises voisines qui sont détruites : une station-service et le site en construction. Le gazoduc est isolé.



### Conséquences :

- 23 personnes décédées (5 pompiers, 1 policier, des employés d'entreprises voisines), 50 blessés graves, brûlés pour la plupart et 79 blessés plus légers (130 blessés au total),
- cratère d'une dizaine de m de diamètre et d'une profondeur de 5 m,



# Annexe 1

## Principaux phénomènes dangereux

### rencontrés dans les études de dangers

- zone brûlée sur plusieurs centaines de m,
- voitures calcinées jusqu'à 500 m, débris éparpillés jusqu'à 6 km.

#### Rappel des seuils à considérer

Dose thermique ou seuil thermique avec effets sur les personnes et les structures.

#### Méthodologie de calcul

Le calcul des conséquences d'un feu torche passe par 2 étapes essentielles :

- La première concerne le **terme source** et plus particulièrement le **débit de fuite**. Il est calculé avec les mêmes outils et modèles que ceux utilisés dans le paragraphe relatif à la dispersion atmosphérique. Le modèle à retenir va essentiellement dépendre des caractéristiques du produit et de celles du scénario retenu (brèche ras de paroi ou fuite sur canalisation, pression de stockage dans la capacité et phase du produit sous ces conditions de pression et température). Il est à noter que le phénomène de combustion ne modifie pas le calcul du terme source.
- La seconde concerne le **développement du feu torche** proprement dit. Il s'agira de calculer les caractéristiques du feu torche : ses dimensions géométriques (longueur, diamètre et hauteur) et ses caractéristiques liées à la combustion (émittance des flammes notamment). Ce calcul va dépendre essentiellement des caractéristiques du produit rejeté (chaleur de combustion) et du débit déterminé à l'étape précédente. Sur la base des caractéristiques de la flamme, il est alors possible de déterminer l'impact possible sur les personnes ou les structures en faisant l'hypothèse d'une flamme solide.

Il est à noter par ailleurs que la géométrie et la position de la flamme (son inclinaison particulièrement) sont influencées par le vent.

## Annexe 1

# Principaux phénomènes dangereux

rencontrés dans les études de dangers

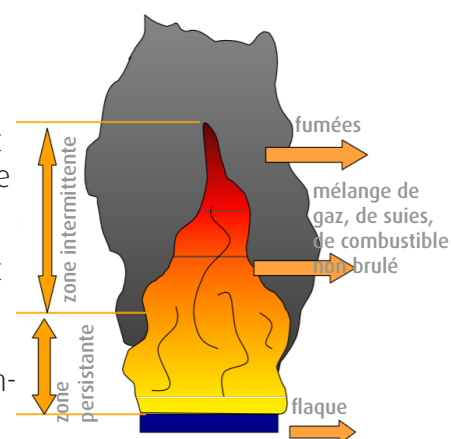
## Feux de liquides

### Description du phénomène physique

Le risque d'incendie est à considérer lorsqu'il est possible de réunir simultanément en présence d'oxygène un produit combustible et une source d'inflammation d'énergie suffisante (triangle du feu).

De manière schématisée, le combustible émet une certaine quantité de vapeurs à une température donnée. Cette émission de vapeurs conduit à la formation d'une zone riche en combustible. Au fur et à mesure de son élévation, le combustible entraîne de l'air froid extérieur.

Lorsque le mélange air-combustible se trouve dans le domaine d'inflammabilité et en présence d'une source d'inflammation, il s'enflamme.



**Exemple concret : Incendie dépôt pétrolier - Buncefield (Grande-Bretagne) - 11/12/05** - <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/31312/>

### Chronologie :

- ❑ Vers 6h du matin, dimanche 11/12/05, 3 explosions se produisent dans le dépôt de produits pétroliers de Buncefield (Grande-Bretagne) situé à 40 km au Nord de Londres. Un gigantesque incendie s'est alors immédiatement allumé.
- ❑ Un important dispositif de secours est monté sur place, 600 soldats du feu combattent les flammes. Le feu qui a occasionné un important panache de fumée se poursuit pendant plusieurs jours et n'est éteint que mardi 13/12/05 dans l'après-midi.

### Conséquences :

Le bilan fait état de 43 blessés, pour la plupart sans gravité.

### Rappel des effets à considérer

Les effets thermiques sur les personnes et les structures sont à calculer.



### Méthodologie de calcul

Pour les feux de liquide, la méthodologie préconisée est la suivante :

- ❑ Rechercher les **caractéristiques du combustible liquide** impliqué (chaleur de combustion, vitesse de combustion – de régression, masse volumique)
- ❑ Identifier les **dimensions de la nappe** de liquide (surface, dimensions caractéristiques, hauteur de liquide), le dernier paramètre est utilisé pour estimer la durée maximale du feu.
- ❑ A l'aide de ces valeurs, il est possible de déterminer les **caractéristiques des flammes** à partir de corrélations empiriques : hauteur et émittance.
- ❑ Une fois ces caractéristiques connues, il est possible de déterminer le flux thermique reçu par une cible par le calcul de l'angle solide entre la cible et les flammes en intégrant la présence éventuelle d'écrans thermiques capables de masquer tout ou partie de la flamme.

## Annexe 2

### Exemples d'application

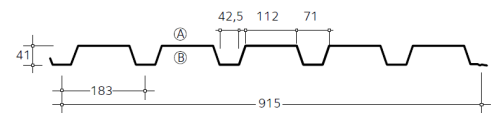
pour l'analyse de la protection - effets thermiques

#### Cas n°1 : étude du comportement d'un bâtiment métallique soumis à un niveau de flux de 5 puis de 12 kW/m<sup>2</sup>

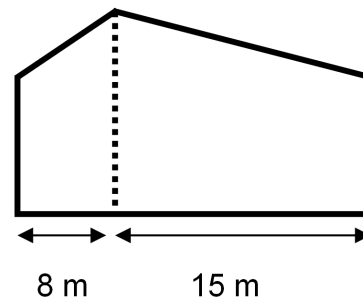
##### Caractéristiques du bâtiment

Le bâtiment qui sera étudié dans cet exemple possède les caractéristiques suivantes :

- Parois et toiture en bardage simple peau 0,75 mm de type HACIERBA 40.183.195. Chaque panneau de bardage possède une vingtaine de fixations en mesure de résister à un effort axial de 60 daN.



- Translucides en PMMA (polyméthylmétacrylate) d'épaisseur 4 mm
- Fenêtres composées de châssis PVC simple vantail et de vitrages 4/12/44.2 en verre recuit. Dimensions vitrages : 1,1 x 1,2 m<sup>2</sup>
- Portes en châssis métalliques et munies de vitrages 4/12/44.2 en verre recuit.
- Ossature métallique composée de :
  - Poteaux de type IPE 300 avec intervalle de 5 m et hauteur variant de 7 à 12 m
  - Lisses de type IPE 160 possédant un entraxe de 2 m et de longueur 5 m
  - Poutres fermières de type IPE 300 et de longueur maximale 15 m (présence d'un poteau intermédiaire) et minimale 8 m (voir schéma du pignon ci-dessous)



- Pannes de type IPE 120 possédant un entraxe de 1,5 m et de longueur 5 m.



Figure 31 : Bâtiment fictif traité dans le cadre de cet exemple

(Source : [www.galco-cm.com/construction-bardage-metallique-commercial.php#panel-3](http://www.galco-cm.com/construction-bardage-metallique-commercial.php#panel-3))

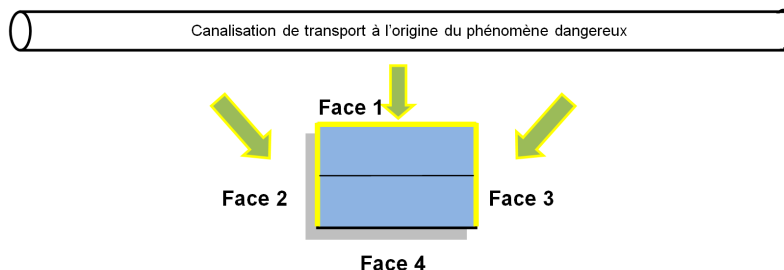
## Annexe 2

### Exemples d'application

pour l'analyse de la protection - effets thermiques

#### Caractéristiques de l'agression et effets perçus par le bâtiment

Le niveau d'intensité thermique impactant ce bâtiment est de 5 kW/m<sup>2</sup> puis de 12 kW/m<sup>2</sup>. Cette agression a une durée de deux heures.



Les parois du bâtiment ne sont pas comprises dans la flamme du phénomène majorant issu de la canalisation de transport. Dans un premier temps, les faces 1, 2, 3 ainsi que la toiture sont soumises à un **flux d'intensité 5 kW/m<sup>2</sup>**. Puis une **seconde étude** est menée avec un niveau de **flux incident de 12 kW/m<sup>2</sup>**. La face 4 n'est pas affectée par le phénomène thermique.

#### Évaluation de la tenue à un niveau de sollicitation de 5 kW/m<sup>2</sup>

*Étude des parois latérales et de la toiture*

Le niveau de température, exprimée en °C, atteint en paroi interne du bardage, est représenté sur la courbe suivante :

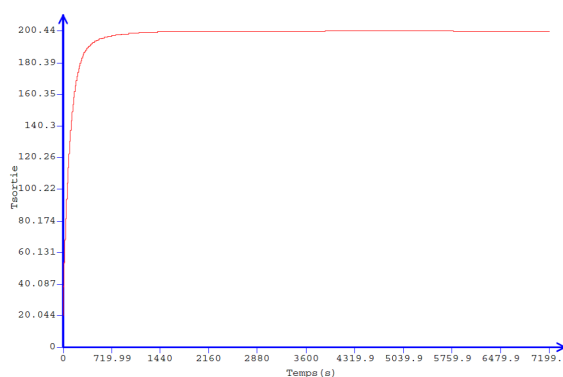


Figure 32 : Évolution de la température en paroi interne du bardage

L'évolution de la température au sein de l'enveloppe interne a également été étudiée. Les calculs ont été réalisés en considérant un taux de renouvellement d'air de 50 000 m<sup>3</sup>/h.

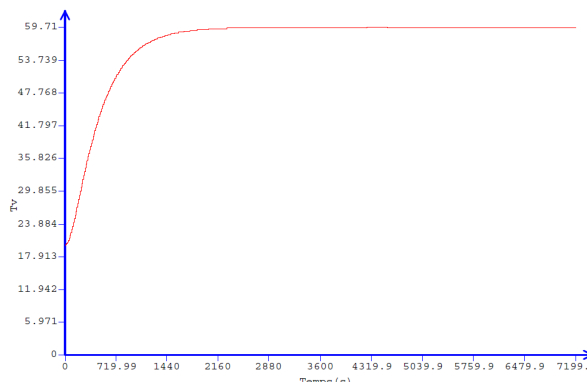


Figure 33 : Évolution de la température du volume de la pièce

## Annexe 2

### Exemples d'application

pour l'analyse de la protection - effets thermiques

Les résultats ci-avant indiquent que :

- Le niveau de température en paroi interne reste inférieur à 210°C. Comme indiqué dans le chapitre « *Objectifs de performance recherchés* » p49, les matériaux ne présentent pas de risque d'inflammation en dessous de 240°C. Par conséquent, il est considéré que la température atteinte en paroi interne du bardage n'est pas de nature à provoquer l'inflammation d'éléments.
- La température moyenne dans l'atmosphère interne est légèrement inférieure à 60°C. Par conséquent, ce critère de vulnérabilité n'est pas atteint.

#### Étude des translucides en PMMA (polyméthylméthacrylate)

Soumis à un signal thermique incident de 5 kW/m<sup>2</sup>, l'augmentation du niveau de température atteint dans l'épaisseur du translucide est représentée ci-dessous :

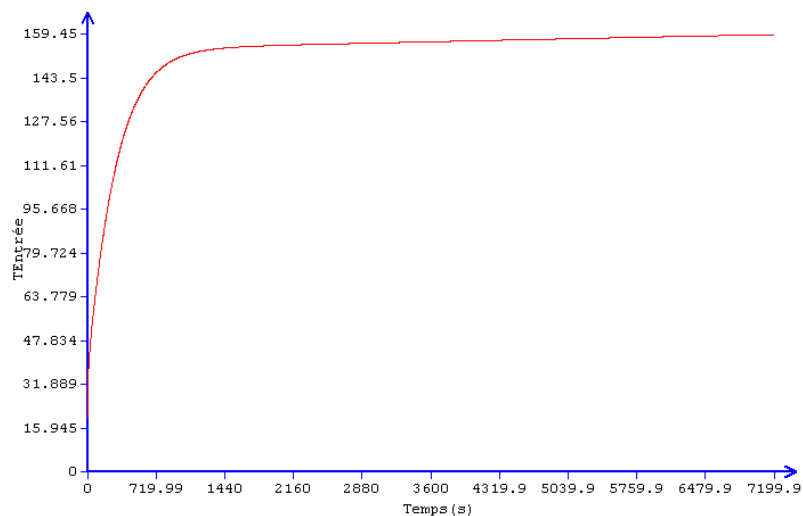


Figure 34 : Évolution de la température en paroi interne du translucide

La courbe ci-dessus permet de conclure que :

- La température maximale atteinte dans le translucide est de 159°C environ. Ce niveau de température est insuffisant pour engendrer l'inflammation du PMMA (température d'inflammation de l'ordre de 300°C).
- En outre, ce niveau de température est inférieur au niveau de température nécessaire à la propagation d'un incendie.

Enfin, la densité de flux thermique traversant le PMMA est quelque peu inférieure à 1 kW/m<sup>2</sup>, soit le niveau perçu en extérieur par une belle journée d'été. Par conséquent, la dose thermique perçue à l'intérieur du bâtiment n'est pas en mesure d'engendrer d'effets notoires sur ses occupants.

#### Étude des fenêtres munies de châssis PVC

Tout d'abord, la réponse des vitrages sous l'agression thermique doit être étudiée. Cela consiste à déterminer si ceux-ci sont en mesure de résister mécaniquement à la sollicitation thermique et si la dose thermique transmise au sein de l'ambiance interne n'est pas en mesure d'engendrer des effets irréversibles sur les occupants.

## Annexe 2

### Exemples d'application

pour l'analyse de la protection - effets thermiques

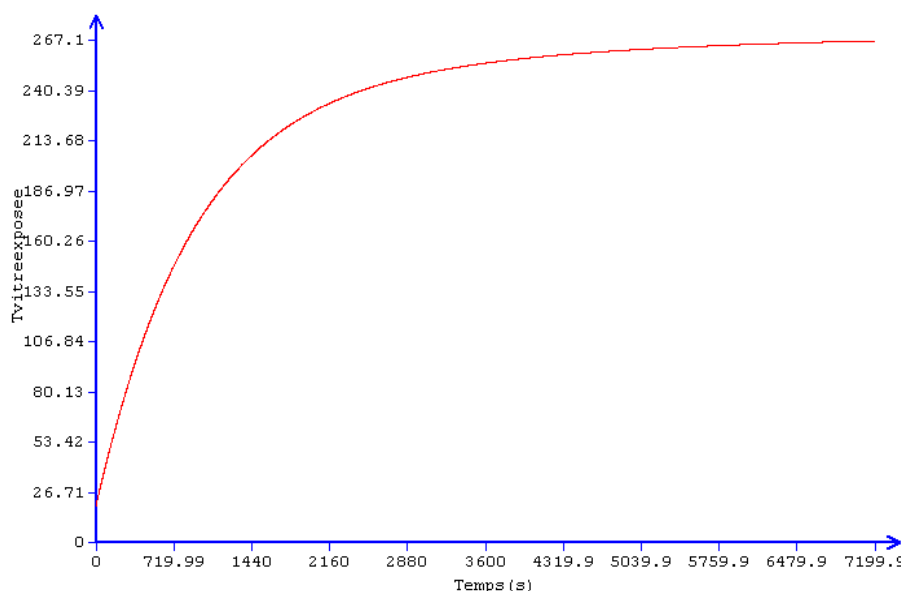


Figure 35 : Évolution de la température moyenne du vitrage exposé (4 mm)

L'augmentation de température du vitrage est d'environ 250°C.

En outre, la densité de flux transmis à travers le vitrage est de l'ordre de 1 kW/m<sup>2</sup>, ce qui correspond à une dose thermique transmise d'environ 120 [kW/m<sup>2</sup>]<sup>4/3</sup>.s sur deux minutes. On conclut donc que la dose thermique transmise n'est pas suffisante pour engendrer des effets irréversibles sur les occupants de l'établissement.

L'étude de la réponse des fenêtres implique également l'étude de la montée en température du châssis afin de s'assurer de la non propagation d'un incendie et de prévenir la chute du vitrage.

La courbe ci-après traduit l'augmentation de température sur la face exposée du châssis :

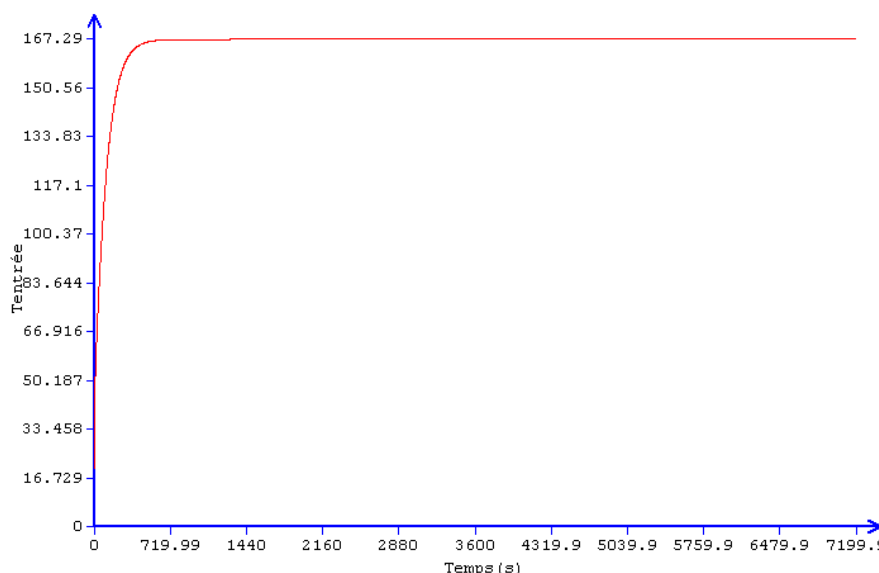


Figure 36 : Évolution de la température du châssis sur sa face exposée

Le niveau de température à la surface du châssis en PVC est d'environ 170°C, ce qui est inférieur à ses critères de vulnérabilité en température de cœur et/ou de peau. Le niveau de contraintes thermiques induit par cette augmentation de température n'est donc pas suffisant pour engendrer la chute du vitrage.

## Annexe 2

### Exemples d'application

pour l'analyse de la protection - effets thermiques

#### Étude des portes munies de châssis métalliques

Comme l'a montré le calcul mené précédemment, le niveau de contrainte thermique induit par l'échauffement des vitrages n'est pas suffisamment élevé pour engendrer sa ruine. Comme pour les fenêtres, le niveau de température maximal atteint dans le châssis métallique a été analysé :

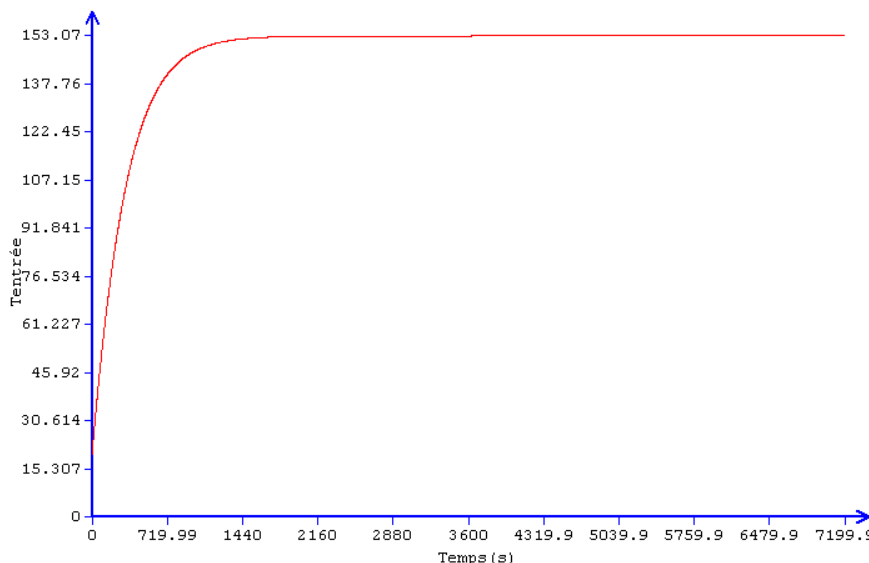


Figure 37 : Évolution de la température du châssis sur sa face exposée

Ce niveau de température engendrera une légère dilatation du châssis mais cela ne sera pas suffisant pour provoquer la ruine du vitrage. On peut donc conclure que les portes ne sont pas vulnérables au niveau d'aléa considéré.

#### Évaluation de la tenue à un niveau de sollicitation de 12 kW/m<sup>2</sup>

##### Étude des parois latérales et de la toiture

Le niveau de température atteint en paroi interne du bardage est représenté sur la courbe suivante :

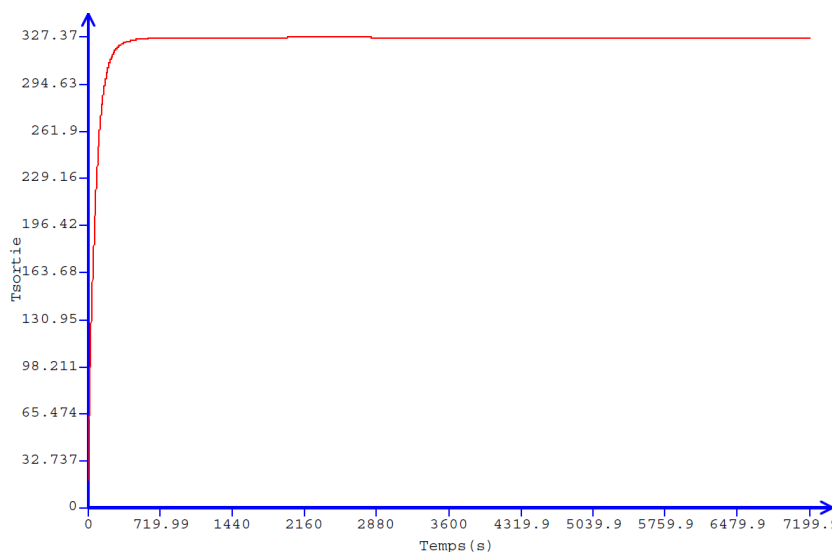


Figure 38 : Évolution de la température en paroi interne du bardage

L'évolution de la température au sein de l'enveloppe interne a également été étudiée. Les calculs ont été réalisés en considérant un taux de renouvellement d'air de 50 000 m<sup>3</sup>/h.

## Annexe 2

### Exemples d'application

pour l'analyse de la protection - effets thermiques

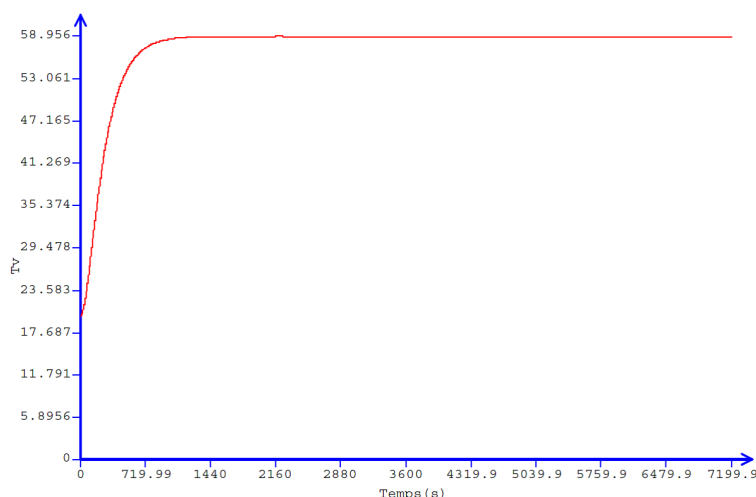


Figure 39 : Évolution de la température du volume de la pièce

Les résultats ci-dessus indiquent que :

- ❑ Le niveau de température en paroi interne est proche de 330°C. A ce niveau de température de nombreux matériaux listés à l'intérieur du volume et éventuellement en contact avec la paroi présentent un risque d'inflammation. Il est donc considéré que la température atteinte en paroi interne du bardage est de nature à provoquer l'inflammation d'éléments.
- ❑ La température moyenne dans l'atmosphère interne est légèrement inférieure à 60°C. Par conséquent, ce critère de vulnérabilité n'est pas atteint.

#### Étude des translucides en PMMA (polyméthylmétacrylate)

Soumis à un signal thermique incident de 12 kW/m<sup>2</sup>, l'augmentation du niveau de température atteint dans l'épaisseur du translucide est représentée ci-dessous :

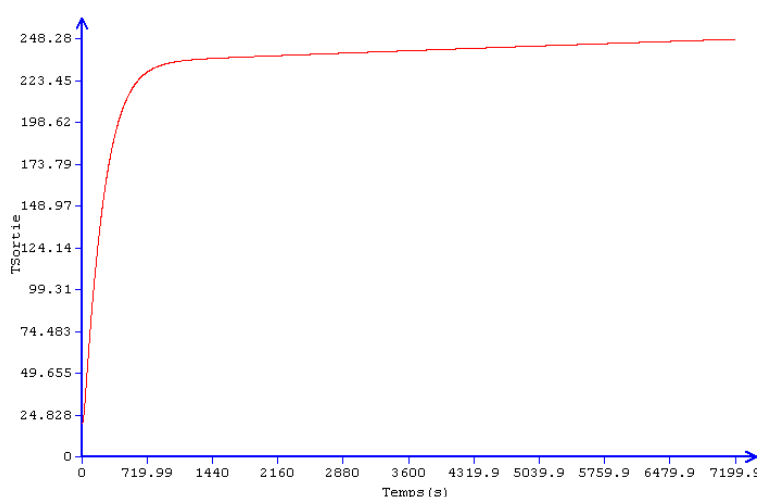


Figure 40 : Évolution de la température en paroi interne du translucide

La courbe ci-dessus permet de conclure que la température maximale atteinte dans le translucide est insuffisante pour engendrer son inflammation. En revanche, ce niveau de température est de nature à provoquer l'inflammation de certains matériaux en contact direct. Par conséquent, il sera nécessaire de veiller à ce que les matériaux en contact avec ces translucides ne soient pas inflammables pour de faibles niveaux de température.



## Annexe 2

### Exemples d'application

#### pour l'analyse de la protection - effets thermiques

Enfin, la densité de flux thermique traversant le PMMA est de l'ordre de 2,5 kW/m<sup>2</sup>, il serait donc nécessaire qu'un local de confinement dans lequel le flux transmis est au maximum de 1,5 kW/m<sup>2</sup>, soit identifié.

#### Étude des fenêtres munies de châssis PVC

La réponse des vitrages sous l'agression thermique doit tout d'abord être étudiée. Cela consiste à déterminer si ceux-ci sont en mesure de résister mécaniquement à la sollicitation thermique et si la dose thermique transmise au sein de l'ambiance interne n'est pas en mesure d'engendrer des effets irréversibles sur les occupants.

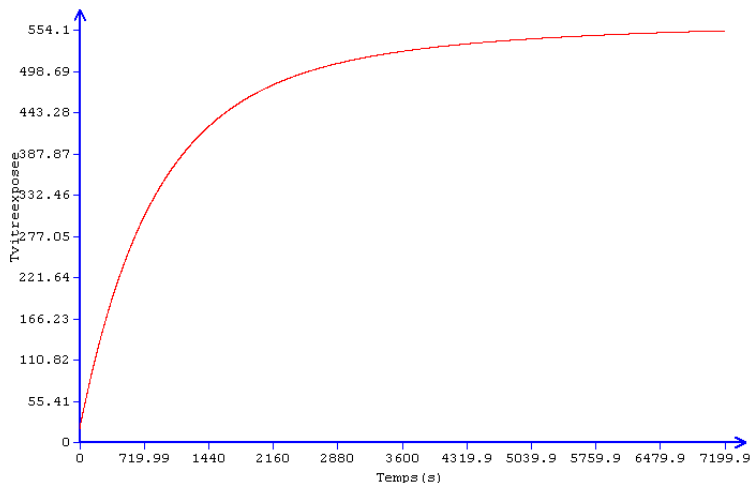


Figure 41 : Évolution de la température moyenne du vitrage exposé (4 mm)

L'augmentation de température du vitrage est d'environ 530°C. Le niveau de contraintes thermiques induit par cette augmentation de température peut engendrer la rupture du vitrage exposé.

La densité de flux transmis à travers le vitrage est de l'ordre de 2,4 kW/m<sup>2</sup>, ce qui correspond à une dose thermique transmise d'environ 390 [kW/m<sup>2</sup>]<sup>4/3</sup>.s sur deux minutes. On conclut donc que la dose thermique transmise n'est pas suffisante pour engendrer des effets irréversibles sur les occupants de l'établissement.

L'étude de la réponse des fenêtres implique également l'étude de la montée en température du châssis afin de s'assurer de la non propagation d'un incendie et de prévenir la chute du vitrage.

La courbe ci-dessous traduit l'augmentation de température sur la face intérieure du châssis :

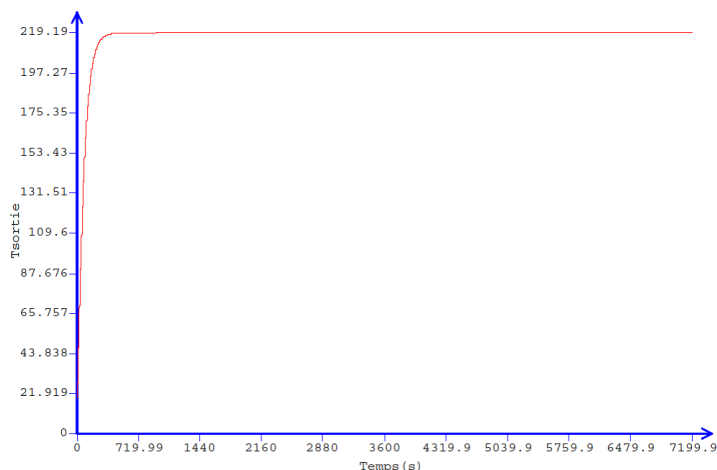


Figure 42 : Évolution de la température du châssis sur sa face intérieure

## Annexe 2

### Exemples d'application

pour l'analyse de la protection - effets thermiques

Le niveau de température à la surface du châssis en PVC est d'environ 220°C, ce qui est supérieur à ses critères de vulnérabilité en température de cœur. Le niveau de contraintes thermiques induit par cette augmentation de température est donc suffisant pour engendrer la chute du vitrage.

#### Étude des portes munies de châssis métalliques

Comme pour les fenêtres, le niveau de température maximal atteint dans le châssis métallique a été analysé :

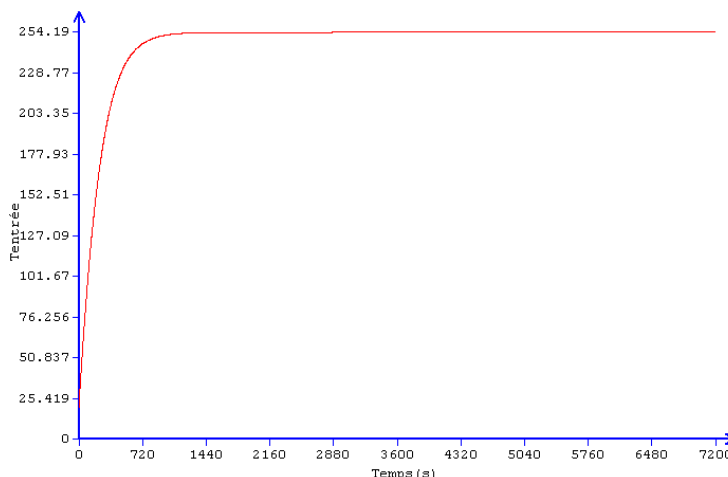


Figure 43 : Évolution de la température du châssis sur sa face exposée

Ce niveau de température engendrera une dilatation du châssis mais cela ne sera pas suffisant pour provoquer la ruine du vitrage.

### Cas n°2 : étude du comportement d'un ERP en maçonnerie soumis à un scénario de brèche de canalisation de transport

#### Caractéristiques du bâtiment

Le bâtiment qui sera étudié dans cet exemple possède les caractéristiques suivantes :

- Parois en béton armé d'épaisseur 30 cm avec un taux de ferrailage de 1,5%.  
Hauteur des parois : 7m
- Fenêtres châssis coupe feu REI 60
- Portes fenêtres coupe feu REI 60
- Porte pleine châssis acier avec quelques vitrages 8/8/8 trempés
- Toiture composée de dalles en béton d'épaisseur 20 cm



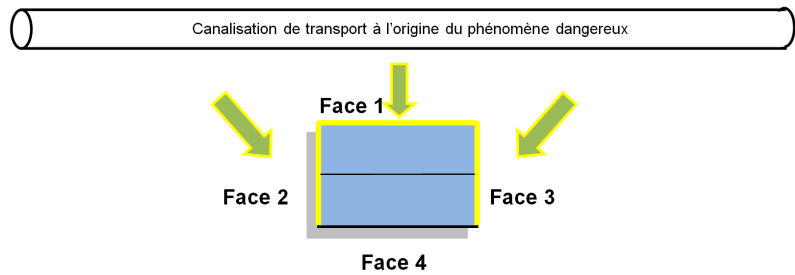
Figure 44 : Bâtiment fictif traité dans le cadre du cas n°2

## Annexe 2

### Exemples d'application

pour l'analyse de la protection - effets thermiques

## Caractéristiques de l'agression thermique et effets perçus par le bâtiment



Les parois du bâtiment ne sont pas comprises dans la flamme du phénomène majorant issu de la canalisation de transport. Les faces 1, 2, 3 ainsi que la toiture sont soumises à un **flux d'intensité 12 kW/m<sup>2</sup>**. La face 4 n'est pas affectée par le phénomène thermique.

### Tenue aux effets thermiques

#### Étude des parois latérales en béton armé

L'évolution de la température atteinte en paroi interne et en paroi externe est représentée sur le graphique ci-dessous :

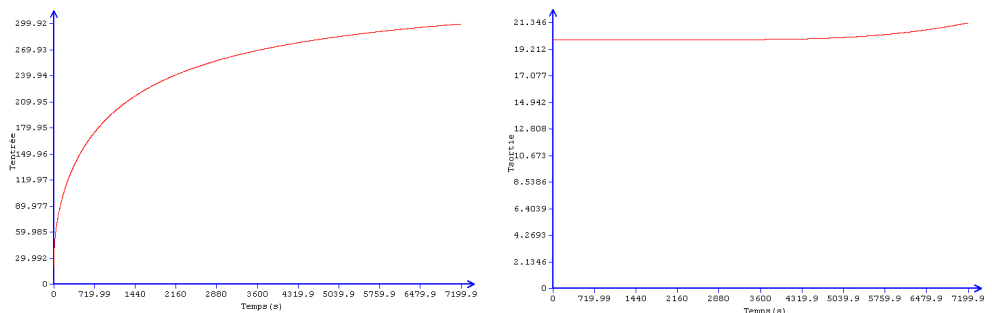


Figure 45 : Évolution de la température en paroi externe et interne

La température de la paroi externe s'approche de 300°C. A ce niveau de température, le béton commence à perdre une partie de sa capacité de résistance mais ne se dégrade pas encore. La température en paroi interne évolue très peu, le risque de propagation d'incendie en raison du flux thermique traversant les parois est écarté.

L'évolution de la température dans les ferrillages a également été calculée.

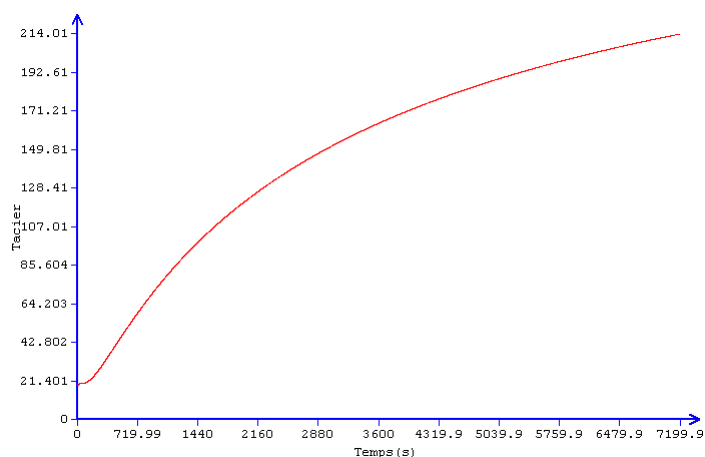


Figure 46 : Évolution de la température dans les ferrillages

## Annexe 2

### Exemples d'application

pour l'analyse de la protection - effets thermiques

Le niveau de température atteint reste inférieur au critère de 400°C défini dans le chapitre « **Critères de vulnérabilité** » p49.

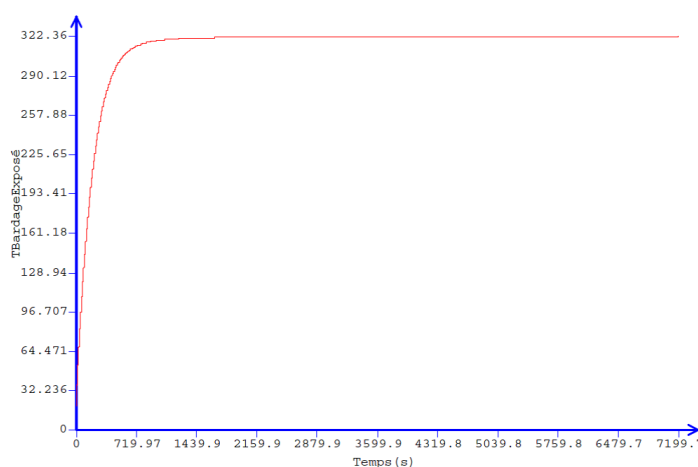
Par conséquent, les parois en béton armé ne sont pas vulnérables au signal thermique défini.

#### *Étude des fenêtres châssis coupe feu REI 60 et portes fenêtres coupe feu REI 60*

D'après le « Guide de prescriptions techniques pour la résistance du bâti face à un aléa technologique thermique » du LNE-Efectis (chapitre B.1.5) , les vitrages et les portes REI 60 sont en mesure de résister à un signal thermique de deux heures et d'intensité 12 kw/m<sup>2</sup>.

#### *Étude des portes pleines châssis acier munis de vitrages 8/8/8 en verre trempé*

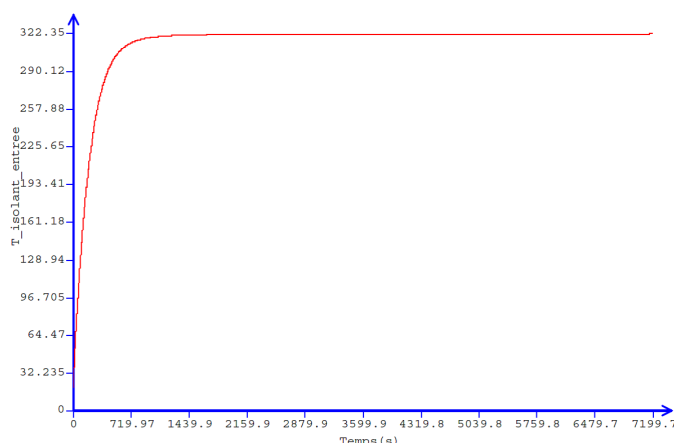
La température de la paroi externe de la porte a tout d'abord été calculée. Son évolution est indiquée sur la courbe ci-dessous :



**Figure 47 : Évolution de la température dans le parement en acier extérieur**

Ce niveau de température ne peut engendrer la dégradation du parement.

La température maximale atteinte dans l'âme isolante est représentée ci-dessous.



**Figure 48 : Évolution de la température dans l'âme isolante de la porte**

La température de dégradation de la laine minérale n'est pas atteinte. Par conséquent, l'isolant conserve son intégrité.

La température de paroi interne de la porte doit également être calculée afin de prévenir le risque de propagation d'incendie dans l'ambiance interne.

## Annexe 2

### Exemples d'application

pour l'analyse de la protection - effets thermiques

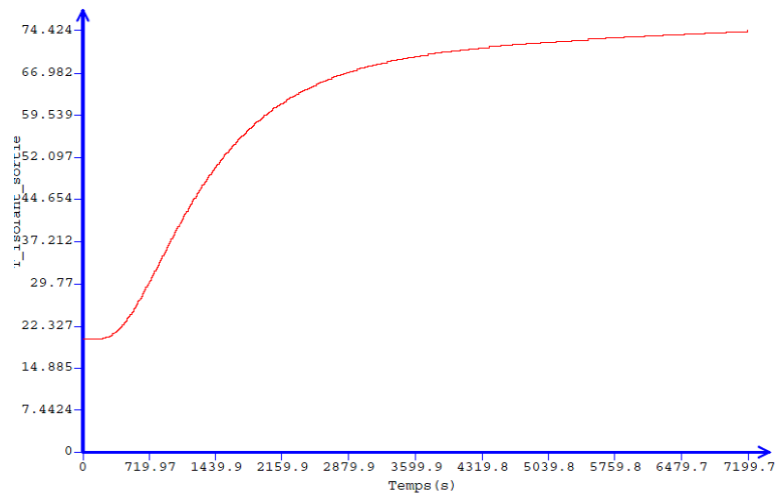


Figure 49 : Évolution de la température dans l'épaisseur d'acier en paroi interne

Le critère de propagation d'incendie n'est pas atteint.

La porte est munie de vitrages de faibles dimensions et d'épaisseur 8/8/8 en verre trempé. Il est tout d'abord nécessaire de s'assurer que le flux absorbé par le vitrage n'est pas en mesure de mener à sa ruine.

Il faut également calculer la valeur de la dose thermique transmise au cours des deux premières minutes afin de s'assurer qu'elle ne dépasse pas le seuil des effets irréversibles, soit  $600 \text{ [kW/m}^2\text{]}^{4/3}\cdot\text{s}$ .

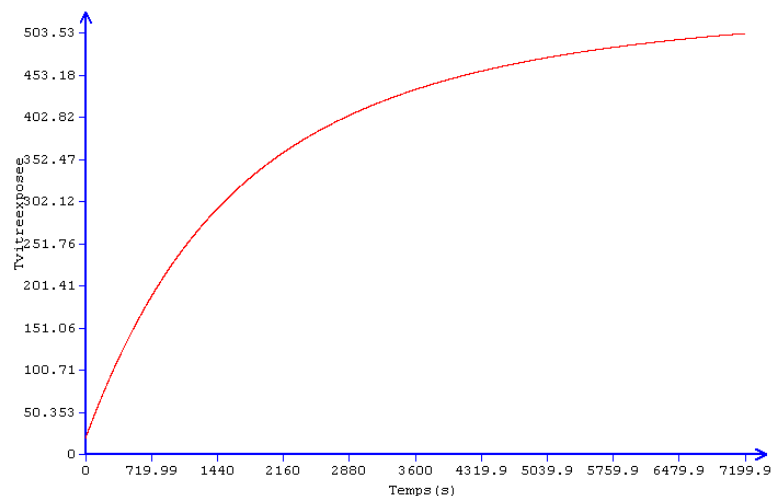


Figure 50 : Évolution de la température dans le vitrage directement exposé au flux thermique

Le niveau de température à la surface du châssis en acier est conçu pour ne pas dépasser un niveau d'environ  $320^\circ\text{C}$ , ce qui est inférieur à ses critères de vulnérabilité pour un double vitrage. Le niveau de contraintes thermiques induit par cette augmentation de température est donc suffisant pour engendrer la chute du vitrage.

En revanche la densité de flux transmis à travers le vitrage est de l'ordre de  $2,4 \text{ kW/m}^2$ , ce qui correspond à une dose thermique transmise d'environ  $390 \text{ [kW/m}^2\text{]}^{4/3}\cdot\text{s}$  sur deux minutes. On conclut donc que la dose thermique transmise n'est pas suffisante pour engendrer des effets irréversibles sur les occupants de l'établissement.

## Annexe 2

### Exemples d'application

pour l'analyse de la protection - effets thermiques

#### Étude de la toiture (dalles de béton)

Comme pour les parois latérales, il s'agit ici de vérifier que :

- ❑ Les ferrillages conservent des niveaux de température acceptables afin de garantir la stabilité de la toiture
- ❑ La température en paroi interne demeure inférieure au critère de propagation d'incendie

Les deux courbes ci-dessous indiquent l'évolution de la température en paroi externe et interne de la dalle en béton :

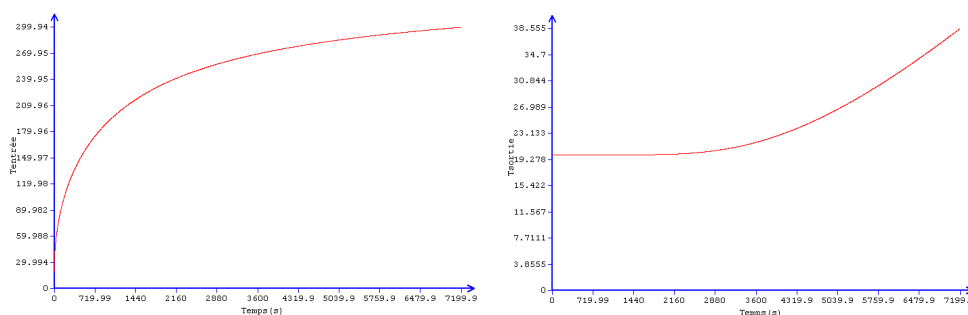


Figure 51 : Évolution de la température en paroi externe et interne

La courbe ci-dessous indique l'évolution de la température des fers au cours des deux premières heures.

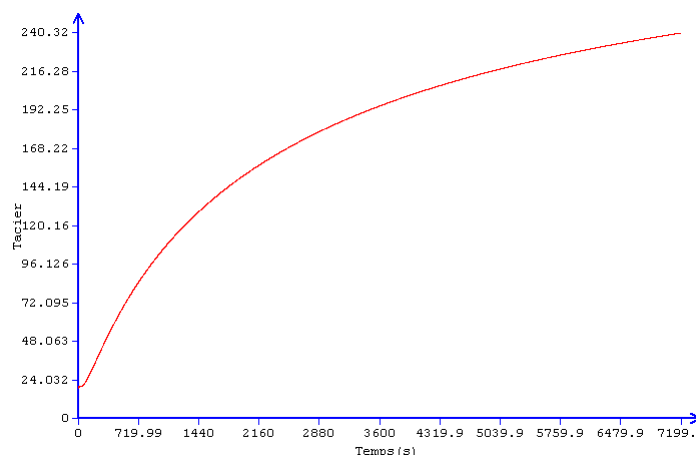


Figure 52 : Évolution de la température des fers du lit supérieur de la dalle au cours des deux premières heures

Le niveau de température de la paroi interne est largement inférieur au critère de propagation du feu. En outre, les fers de la dalle conservent un niveau de température acceptable et la stabilité de celle-ci n'est pas remise en cause.

## Annexe 3

### Exemples d'application

pour l'analyse de la protection - effets de surpression

#### Cas n°1 : étude du comportement d'un bâtiment métallique soumis à un niveau de surpression de 55 (signal 1) puis de 120 mbars (signal 2)

##### Caractéristiques du bâtiment

Le bâtiment étudié est le même que celui qui est décrit dans l'annexe « *cas n°1 étude du comportement d'un bâtiment métallique...* » p82.

##### Caractéristiques de l'agression de surpression

Deux signaux de surpression incidents ont été appliqués au bâtiment :

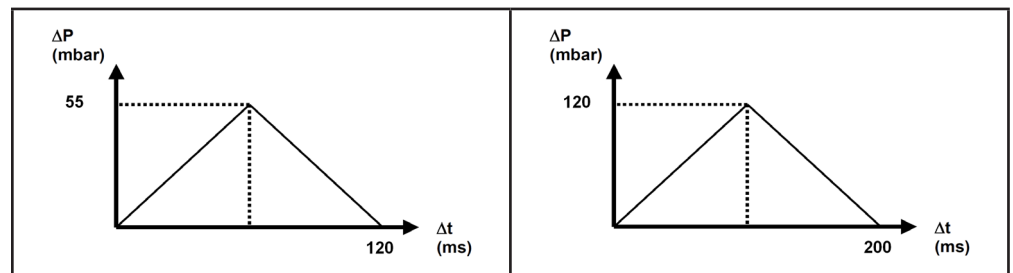


Figure 53 : Caractéristiques des signaux de surpression (signal 1 à gauche, signal 2 à droite) appliqués dans le cas n°1

Les signaux de surpression incidents calculés ci-dessus doivent être pondérés par les facteurs ci-dessous afin d'obtenir le signal de surpression réfléchi :

Paroi	Facteur	Surpression réfléchie signal 1 (mbars)	Surpression réfléchie signal 2 (mbars)
Face 1	1,6	88	195
Face 2	1,0	55	120
Face 3	1,0	55	120
Face 4	0,75	42	90
Toiture	1,0	55	120

Tableau 17 : Surpression réfléchie sur les différentes faces du bâtiment considéré dans le cas n°1, dans le cas du signal 1 et du signal 2

##### Évaluation de la tenue pour le signal n°1 (55 mbar, 120 ms)

*Étude de la tenue de l'ossature métallique*

□ **Poteaux** : les résultats indiquent que les poteaux situés sur les faces 1 et 4 et de hauteur 7 m se déforment dans le domaine plastique (coefficient de ductilité de 2) avec un angle de rotation de 1,5°. Ces valeurs sont inférieures aux seuils critiques indiqués dans le chapitre « *Étude élémentaire - critère de déformation* » p62.

En revanche, l'analyse a montré que les poteaux situés sur pignons 2 et 3 et de longueur supérieure à 9 m ne respectaient pas ces critères. Par conséquent, il sera nécessaire de diminuer leur entraxe à 2,5 m (contre 5 m actuellement).

□ **Lisses** : les lisses situées sur la face 1 se déforment dans le domaine plastique avec un coefficient de ductilité de 2 et un angle de rotation de 1,5°. Par conséquent, l'ensemble des lisses du bâtiment résistent au signal de surpression.

## Annexe 3

### Exemples d'application

pour l'analyse de la protection - effets de surpression

- **Poutres fermières** : les calculs réalisés pour analyser la tenue des poutres fermières ont montré qu'une poutre de longueur 15 m n'était pas en mesure de résister aux effets de surpression. En revanche, l'ajout d'un poteau intermédiaire de soutien au milieu de la poutre afin de limiter la portée à 7,5 m permet d'assurer la tenue de la toiture au signal de surpression.

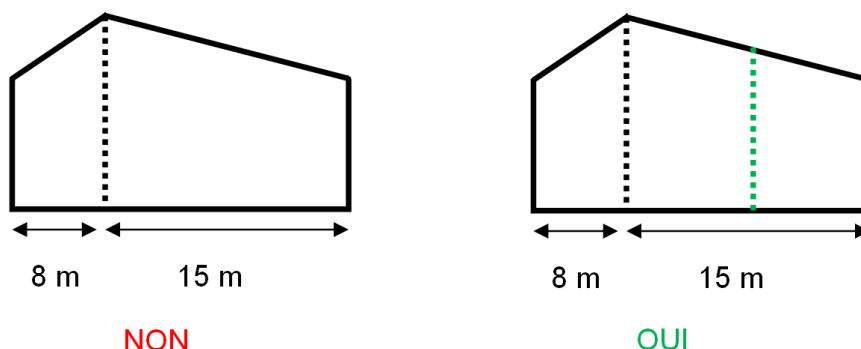


Figure 54 : Effet de l'ajout d'un poteau de soutien dans le cas n°1, signal de surpression n°1

- **Pannes** : d'après les modélisations élastoplastiques réalisées dans le cadre de cet exemple, les pannes de type IPE 120 se déforment dans le domaine plastique avec un taux de ductilité égal à 2 et un angle aux appuis égal à 2°.

#### Étude de la tenue des panneaux de bardages

Les calculs réalisés montrent que les panneaux de bardage ne seront pas en mesure de résister à l'onde de surpression. En effet la portée de 5 m est trop importante pour qu'un bardage simple peau puisse résister en flexion à un tel niveau de surpression.

En complément de l'analyse de tenue en flexion des bardages, il est nécessaire d'étudier la tenue des fixations assurant la jonction entre le panneau de bardage et l'ossature métallique du bâtiment. Chaque panneau est fixé par 20 fixations en mesure de reprendre un effort axial de 60 daN chacune. Les calculs réalisés dans le cadre de cet exemple indiquent que le nombre de fixations est suffisant.

#### Étude de la tenue des fenêtres

Les fenêtres sont réparties sur l'ensemble des 4 façades du bâtiment. Une analyse mécanique dynamique a été réalisée et montre que les vitrages résistent à l'onde de surpression indiquée dans la mesure où leurs dimensions restent relativement faibles (1,1 x 1,2 m<sup>2</sup>). En revanche, les calculs indiquent que des vitrages de plus grandes dimensions (à partir de 1,7 x 1,8 m<sup>2</sup>) ne seraient pas en mesure de résister.

Les autres caractéristiques des fenêtres (châssis, mode d'ouverture, système de fermeture) respectent les préconisations du « Guide pratique – Fenêtres dans la zone 20–50 mbar – Effets de surpression, diagnostic et mesures de renforcement »<sup>(12)</sup>. Il convient toutefois de renforcer les fixations de la fenêtre dans le mur en suivant les recommandations indiquées dans le dit guide.

#### Évaluation de la tenue pour le signal n°2 (120 mbar, 200 ms)

##### Étude de la tenue de l'ossature métallique

- **Poteaux** : les résultats indiquent que les poteaux situés sur la face 1 et de hauteur 7 m se déforment dans le domaine plastique avec un coefficient de ductilité largement supérieur aux seuils critiques indiqués dans le chapitre « *Étude élémentaire - critère de déformation* » p62.

(12) Document référencé  
INERIS-DRA-11-117437-05120c  
téléchargeable sur

<http://www.ineris.fr/centre-doc/rapport-final-dra-11-117437-05120c-1328539246.pdf>



## Annexe 3

### Exemples d'application

#### pour l'analyse de la protection - effets de surpression

En revanche, les poteaux de la face 4 étant soumis à un niveau de surpression réfléchi moins important, ceux-ci se déforment dans le domaine irréversible sans pour autant rompre (taux de ductilité de 3 et angle de rotation aux appuis de  $1,7^\circ$ ).

En outre, l'analyse a montré que les poteaux situés sur pignons 2 et 3 ne respectaient pas ces critères. En effet le taux de ductilité atteint pour les poteaux de portée 7m est de l'ordre de 30.

- **Lisses** : les lisses situées sur la face 1 se déforment dans le domaine plastique avec un coefficient de ductilité largement supérieur aux seuils autorisés. Les lisses les moins impactées par l'onde de souffle (face 4) se déforment également avec un taux de ductilité proche de 30. Par conséquent, l'ensemble des lisses du bâtiment vont rompre sous l'effet du signal de surpression.
- **Poutres fermières** : les calculs réalisés pour analyser la tenue des poutres fermières ont montré qu'une poutre de longueur 15 m n'était pas en mesure de résister aux effets de surpression. En outre, l'ajout d'un poteau intermédiaire de soutien au milieu de la poutre afin de limiter la portée à 7,5 m n'est pas suffisant pour assurer la tenue de la toiture au signal de surpression.

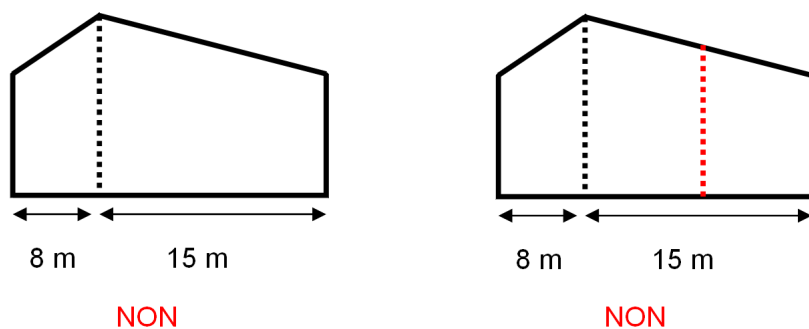


Figure 55 : Effet de l'ajout d'un poteau de soutien dans le cas n°1, signal de surpression n°2

Seul l'ajout de portiques supplémentaires combiné à l'ajout de poteaux intermédiaires permettrait aux portiques de reprendre les charges dynamiques induites par la surpression.

- **Pannes** : d'après les modélisations élastoplastiques réalisées dans le cadre de cet exemple, les pannes de type IPE 120 se déforment dans le domaine plastique avant de rompre. Le taux de ductilité alors calculé est largement supérieur aux critères autorisés.

#### Étude de la tenue des panneaux de bardages

Les calculs réalisés montrent que les panneaux de bardage ne seront pas en mesure de résister à l'onde de surpression. En effet la portée de 5 m est trop importante pour qu'un bardage simple peau puisse résister en flexion à un tel niveau de surpression.

En complément de l'analyse de tenue en flexion des bardages, il est nécessaire d'étudier la tenue des fixations assurant la jonction entre le panneau de bardage et l'ossature métallique du bâtiment. Chaque panneau est fixé par 20 fixations en mesure de reprendre un effort axial de 60 daN chacune. Les calculs réalisés dans le cadre de cet exemple indiquent que ce nombre de fixations n'est pas suffisamment élevé pour reprendre les efforts induits par la pression d'explosion.

## Annexe 3

# Exemples d'application

## pour l'analyse de la protection - effets de surpression

(13) publié en juin 2016, téléchargeable sur

[http://www.installations-classees.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Guide\\_diagnostic\\_vdef\\_25juillet2016.pdf](http://www.installations-classees.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_diagnostic_vdef_25juillet2016.pdf)

### Étude de la tenue des fenêtres

Les fenêtres sont réparties sur l'ensemble des 4 façades du bâtiment. Une analyse mécanique dynamique a été réalisée et montre que les vitrages ne sont pas en mesure de résister à un tel niveau de surpression.

A ce niveau de surpression, les fenêtres doivent:

- soit respecter les préconisations indiquées à l'annexe 2 du « Guide de réalisation des diagnostics de la vulnérabilité de l'habitat existant face aux risques technologiques »<sup>(13)</sup> et portant sur le panneau vitré, le mode d'ouverture de la fenêtre, la nature et les caractéristiques du châssis, le système de fermeture et le mode de fixation de la fenêtre dans le mur.
- soit être certifiées de classe EPR1 selon la norme EN13123-1 « Fenêtres, portes et fermetures - Résistance à l'explosion - Prescriptions et classification Partie 1 : Tube à effet de souffle (shock tube) ». Cette norme définit expérimentalement des ensembles châssis/vitres résistant à des ondes de chocs. L'EPR1 correspond à la première qualité.

### Étude de la tenue des translucides

Pour des niveaux de surpression compris entre 50 et 140 mbar, le retour d'expérience montre que les bandes de translucides ne seront pas en mesure de résister et risquent d'être projetés à l'intérieur du bâtiment.

## Cas n°2 : étude du comportement d'un bâtiment en béton armé soumis à un niveau de surpression de 120 mbars

### Caractéristiques du bâtiment

Le bâtiment étudié est le même que celui qui est décrit dans le chapitre « **cas n°2** » de l'annexe n°2:

- Parois en béton armé d'épaisseur 30 cm avec un taux de ferrailage de 1,5%.
- Hauteur des parois : 7m
- Fenêtres châssis coupe feu REI 60
- Portes fenêtres coupe feu REI 60
- Porte pleine châssis acier avec quelques vitrages 8/8/8 trempés
- Toiture composée de dalles en béton d'épaisseur 20 cm

### Caractéristiques de l'agression de surpression

Le signal de surpression incident appliqué au bâtiment possède les mêmes caractéristiques que le signal n°2 du cas n°1 de l'annexe n°3 (120 mbar, 200 ms), représenté sur la **figure 53 p94**.

Paroi	Facteur	Surpression réfléchie signal 2 (mbars)
Face 1	1,6	195
Face 2	1,0	120
Face 3	1,0	120
Face 4	0,75	90
Toiture	1,0	120

Tableau 18 : Surpression réfléchie sur les différentes faces du bâtiment considéré dans le cas n°2

## Annexe 3

### Exemples d'application

#### pour l'analyse de la protection - effets de surpression

(14) publié en juin 2016, téléchargeable sur

[http://www.installations-classees.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Guide\\_diagnostic\\_vdef\\_25juillet2016.pdf](http://www.installations-classees.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_diagnostic_vdef_25juillet2016.pdf)

### Tenue pour l'agression de surpression

#### Étude des parois latérales en béton armé

Une analyse élastoplastique de la tenue des façades en béton armé de 7 m de hauteur a été réalisée dans le cadre de cet exemple. Le ferrailage considéré se présente comme suit :

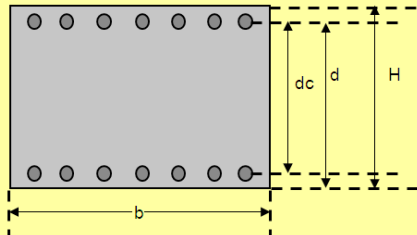
	Épaisseur (H)	300	mm
	Largeur (b)	1000	mm
	d	250	mm
	d <sub>c</sub>	200	mm
	longueur	7	m
	% armature (w)	1,50	%

Figure 56 : Caractéristiques du ferrailage du béton armé, cas n°2, surpression 120 mbars

Les calculs montrent que le mur résiste largement à ce niveau de surpression.

#### Étude de la tenue des fenêtres châssis coupe feu REI60

A ce niveau de surpression, les fenêtres doivent :

- soit respecter les préconisations indiquées à l'annexe 2 du « Guide de réalisation des diagnostics de la vulnérabilité de l'habitat existant face aux risques technologiques »<sup>(14)</sup> et portant sur le panneau vitré, le mode d'ouverture de la fenêtre, la nature et les caractéristiques du châssis, le système de fermeture et le mode de fixation de la fenêtre dans le mur.
- soit être certifiées de classe EPR1 selon la norme EN13123-1 « Fenêtres, portes et fermetures - Résistance à l'explosion - Prescriptions et classification Partie 1 : Tube à effet de souffle (shock tube) ». Cette norme définit expérimentalement des ensembles châssis/vitres résistant à des ondes de chocs. L'EPR1 correspond à la première qualité.

#### Étude de la tenue de la toiture composée de dalles en béton

Le ferrailage des dalles en béton présentes sur le bâtiment possède les caractéristiques suivantes :

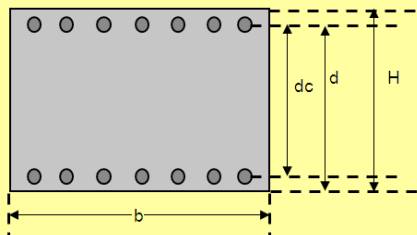
	Épaisseur (H)	200	mm
	Largeur (b)	1000	mm
	d	175	mm
	d <sub>c</sub>	150	mm
	longueur	10	m
	% armature (w)	1,50	%

Figure 57 : Caractéristiques du ferrailage de la dalle de béton armé en toiture, cas n°2, surpression 120 mbars

D'après les calculs réalisés dans le cadre de cet exemple, ces dalles seront en mesure de résister à l'onde de surpression et ne s'effondreront pas.

Le présent guide comporte 98 pages, hors couverture et quatrième de couverture

# INERIS

*maîtriser le risque |  
pour un développement durable*

Rédaction : Adrien WILLOT, Raphaël CANDÉ, Mathieu REIMERINGER et Sandrine DESCOURRIERE  
INERIS - Direction des risques accidentels  
Parc Alata, BP2, 60550 VERNEUIL EN HALATTE - [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr)

Mise en forme pédagogique, conception graphique et mise en page :  
Olivier PERON, INERIS, Parc Alata, BP2, 60550 VERNEUIL EN HALATTE