

**ANNEXE C2**

**26/10/2009**

INERIS- DRA-09-103218-11382D

**Guide pratique**

**Fenêtres dans la zone des effets de surpression  
d'intensité 20-50 mbar, diagnostic et mesures de  
renforcement**





## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>5</b>
<b>2. MODES DE CONSTRUCTION, TYPOLOGIE DES FENETRES EN FRANCE 7</b>	
2.1 Eléments constituant une fenêtre .....	7
2.2 Les principaux modes d'ouverture.....	8
2.3 Les principaux types de pose .....	10
2.4 Les principaux types de vitrage .....	12
2.5 Les principaux types de verre.....	13
2.6 Les films de protection anti-fragment.....	14
<b>3. ELEMENTS PRATIQUES POUR PROTEGER LES FENETRES .....</b>	<b>17</b>
3.1 Introduction.....	17
3.2 Dimensions des panneaux vitrés.....	17
3.3 Règles simples a respecter sur les châssis, le système de fermeture.....	34
3.4 Fixation de la fenêtre dans le mur .....	38
<b>4. EXEMPLE D'APPLICATION POUR LES BATIMENTS EXISTANTS : PROTECTION OFFERTE PAR UN DES TYPES DE FENETRES LES PLUS COURAMMENT RENCONTRES.....</b>	<b>43</b>
<b>5. REFERENCES.....</b>	<b>47</b>
<b>6. LISTES DES ANNEXES .....</b>	<b>49</b>

## TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Dormant et ouvrants d'une fenêtre à ouverture à la française.....	7
Figure 2 : Paumelles, châssis mobile, parcloses et panneaux vitrés d'une fenêtre.....	7
Figure 3 : Illustration d'un système de fermeture à crémone avec sortie de tringle.....	8
Figure 4 : Les principaux types d'ouverture des fenêtres en France.....	9
Figure 5 : Schéma de la pose en feuillure.....	10
Figure 6 : Schéma de la pose en tunnel.....	10
Figure 7 : Schéma d'une pose en applique.....	11
Figure 8 : Schéma d'un vitrage simple feuilleté de type 44.2 (à gauche) et 666.4 (à droite).....	12
Figure 9 : Schéma d'un vitrage isolant double de type 4/16/4 (à gauche) et 44.2/12/4 (à droite).....	12
Figure 10 : Fixation du film par simple adhérence.....	15
Figure 11 : Fixation chimique du film.....	15
Figure 12 : Fixation mécanique du film.....	16
Figure 13 : Types de vitrages étudiés.....	18
Figure 14 : Illustration des dimensions L et l d'un panneau vitré.....	18
Figure 15 : Signaux de surpression typiques.....	19
Figure 16 : Orientation des façades du bâtiment par rapport au centre de l'explosion.....	19
Figure 17 : Largeur maximale (l) d'un panneau vitré isolant double 4/16/4 en fonction de la nature de l'explosion, de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment, de la face du bâtiment considérée et du rapport L/20	
Figure 18 : Configuration admissibles des panneaux vitrés de type 4/16/4 de dimensions 0.6 m x 1.1 m de fenêtres à ouverture à la française à 2 vantaux de dimensions hors tout standards : 1.40 m de large et de 1.25 m de haut.....	22
Figure 19 : Largeur maximale (l) d'un panneau vitré isolant double 44.2/12/4 en fonction de la nature de l'explosion, de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment, de la face du bâtiment considérée et du rapport L/23	
Figure 20 : Largeur maximale (l) d'un panneau vitré isolant double 4/12/44.2 en fonction de la nature de l'explosion, de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment, de la face du bâtiment considérée et du rapport L/25	
Figure 21 : Largeur maximale (l) d'un panneau vitré isolant double 44.2/8/44.2 en fonction de la nature de l'explosion, de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment, de la face du bâtiment considérée et du rapport L/26	
Figure 22 : Largeur maximale (l) d'un panneau vitré isolant double 8/8/8 en verre trempé en fonction de la nature de l'explosion, de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment, de la face du bâtiment considérée et du rapport L/l.....	28
Figure 23 : Largeur maximale (l) d'un panneau vitré muni d'un vitrage simple monolithique recuit de 4mm avec film de sécurité en fonction de la nature de l'explosion, de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment, de la face du bâtiment considérée et du rapport L/l.....	31
Figure 24 : Largeur maximale (l) d'un panneau vitré isolant double 4/16/4 avec film de sécurité en fonction de la nature de l'explosion, de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment, de la face du bâtiment considérée et du rapport L/l.....	32
Figure 25 : Exemple pour une fenêtre à ouverture à la française à deux vantaux de dimensions tableaux h=1.25 m x l = 1.40 m.....	35
Figure 26 : Système de fermeture classique à crémone 3 points avec sortie de tringle (sans renvoi d'angle) d'une fenêtre à ouverture à la française.....	35
Figure 27 : Disposition des fixations principales pour les fenêtres à ouverture à la française à deux vantaux munies d'un système de fermeture à sortie de tringle en face 1 à 4 d'une construction dans la zone 20-50.....	41
Figure 28 : Disposition des fixations principales pour les fenêtres à ouverture à la française avec système de fermeture à renvoi d'angle en face 1 à 4 d'une construction dans la zone 20-50.....	41
Figure 29 : Exemple de disposition des fixations pour une fenêtre à ouverture à la française de dimensions largeur = 1.40 m, hauteur = 1.25 m en face 1 d'une construction dans la zone 35-50.....	42
Figure 30 : Exemple de disposition des fixations pour une fenêtre à ouverture à la française de dimensions largeur = 1.40 m, hauteur = 1.25 m en face 2, 3 et 4 d'une construction dans la zone 35-50 ou en face 1 à 4 d'une construction dans la zone 20-35.....	42
Figure 31 : Tableau de la vulnérabilité dans la zone 20-50 mbar d'une fenêtre à ouverture à la française à deux vantaux de dimensions h=1.25 m x l=1.40 m munie de panneaux vitrés de type 4/16/4 et d'un système de fermeture 3 points avec sortie de tringle.....	44
Figure 32 : Orientation des façades du bâtiment par rapport au centre de l'explosion.....	53

<i>Figure 33 : Angles retenus.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 34. Affectation des numéros de faces .....</i>	<i>55</i>

## 1. INTRODUCTION

Dans le cas où un établissement à risques est à l'origine de phénomène dangereux d'explosion conduisant dans son environnement à des ondes de surpression d'intensité 20 à 50 mbar, le règlement du Plan de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) prescrit ou recommande, dans cette zone, la tenue des fenêtres standards des maisons individuelles ou bâtiments d'activité situés dans cette zone.

Ce document est à destination des maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et professionnels de la construction. Il a pour objectif de les aider à mieux appréhender les demandes de travaux faites par les propriétaires dans le cadre de la mise en œuvre des prescriptions d'objectif de performance ou des recommandations du règlement du PPRT.

Il propose des éléments pratiques simples permettant de protéger les fenêtres des bâtis actuels ou futurs et ainsi garantir une protection efficace des personnes situées à l'intérieur des habitations dans la zone des effets de surpression d'intensité 20-50 mbar. Les mesures constructives proposées se veulent les moins onéreuses possibles.

Elaboré par l'INERIS, il se fonde sur des travaux tant théoriques que pratiques et complète un certain nombre de documents référencés en dernière page du présent rapport [1], [2], [3] et [4].

Il présente :

- Les principaux modes de constructions des fenêtres en France [Chap. 2] ;
- Des éléments pratiques pour garantir la tenue des fenêtres dans la zone des effets de surpression d'intensité 20-50 mbar [Chap. 3], afférents :
  - à la nature et aux dimensions des panneaux vitrés [Chap. 3.2] ;
  - à la nature du châssis, au système de fermeture et au mode de pose de la fenêtre [Chap. 3.3] ;
  - au mode de fixation de la fenêtre dans le mur [Chap. 3.4].
- Un exemple d'application dressant la protection offerte par un des types de fenêtres les plus couramment rencontrés dans l'habitat français.





## 2. MODES DE CONSTRUCTION, TYPOLOGIE DES FENETRES EN FRANCE

### 2.1 ELEMENTS CONSTITUANT UNE FENETRE

Une fenêtre est typiquement constituée des éléments suivants :

- le dormant : encadrement fixe de la fenêtre fixé au mur et sur lequel sont fixés les vantaux (cadre ouvrant) de la fenêtre ; Le dormant est aussi appelé le fixe, le bâti, ou le châssis dormant ;
- le cadre ouvrant : partie mobile de la fenêtre qui s'articule autour de paumelles ou gonds ; l'ouvrant est encore appelé le battant ou le vantail.

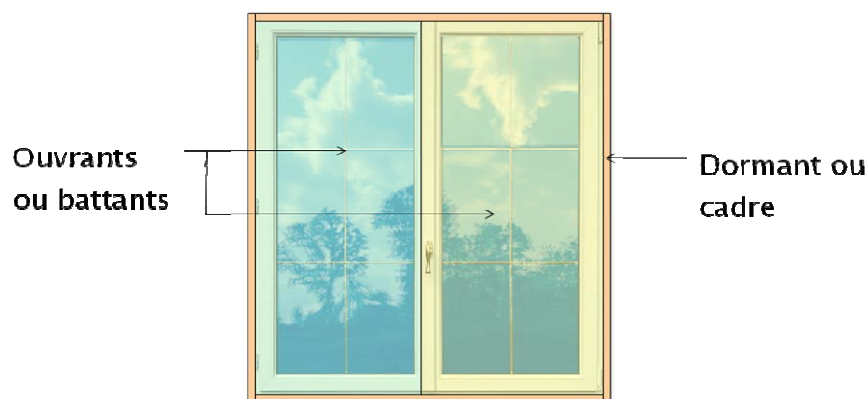


Figure 1 : Dormant et ouvrants d'une fenêtre à ouverture à la française

- les paumelles : organes constituées de 2 pièces métalliques mobiles qui assurent la fixation du battant sur le dormant en permettant la rotation du battant ;
- le vitrage proprement dit, encore appelé « panneau vitré » ;
- le châssis mobile : assemblage de montants (parties verticales) et de traverses (parties horizontales) qui encadre et maintient le vitrage ;
- les parcloses : pièces de petite section servant au maintien des vitrages ;

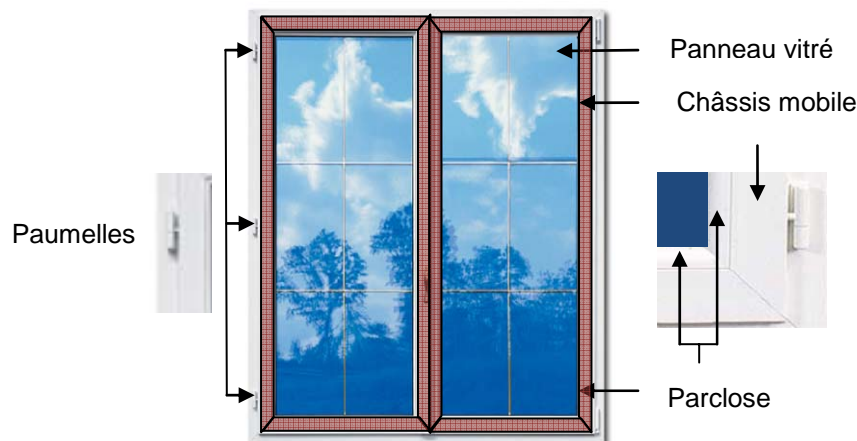
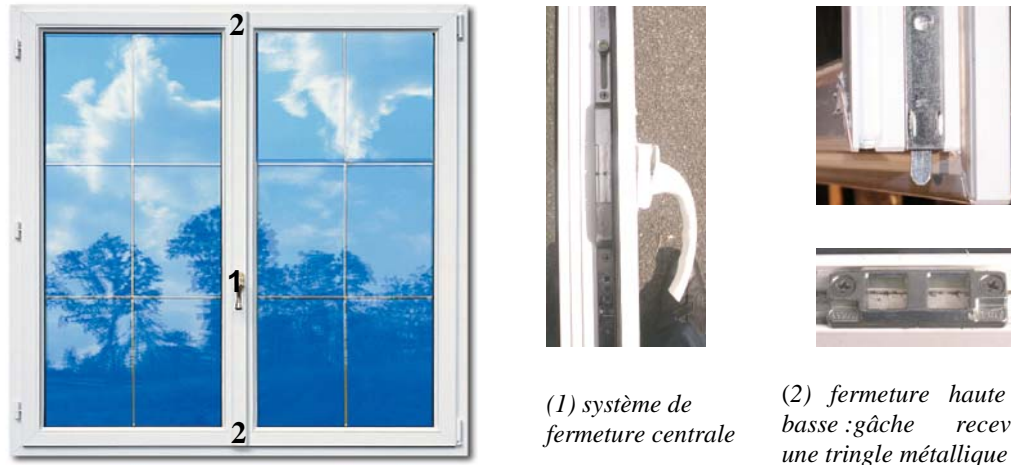


Figure 2 : Paumelles, châssis mobile, parcloses et panneaux vitrés d'une fenêtre

- sans oublier le système de fermeture ; Parmi les plus courants, peut être cité le système de fermeture à crémone avec sortie de tringle. Le verrouillage est assuré en partie basse et en haute par une gâche (pièce en métal ou en plastique) fixée au dormant et dans laquelle vient s'engager une tige métallique.



(1) système de fermeture centrale

(2) fermeture haute et basse : gâche recevant une tringle métallique

Figure 3 : Illustration d'un système de fermeture à crémone avec sortie de tringle

## 2.2 LES PRINCIPAUX MODES D'OUVERTURE

Il existe une douzaine de types d'ouverture. On retiendra pour l'essentiel :

- L'ouverture à la française : l'ouverture se fait vers l'intérieur. Le nombre de battant peut varier de 1 à 2 ;
- L'ouverture à soufflet : l'ouverture se fait vers l'intérieur sur un axe horizontal, ce qui permet d'entrebâiller la fenêtre sur sa partie haute ;
- L'ouverture en oscillo-battant : la fenêtre s'ouvre de 2 façons :
  - « normalement » comme une fenêtre à battant, avec ouverture à la française ;
  - en soufflet sur un axe horizontal (fenêtre entrebâillée sur sa partie haute), ou bien sur un axe vertical ;
- L'ouverture coulissante : la fenêtre s'ouvre par glissement d'un vantail sur un autre ;
- L'ouverture basculante : la fenêtre s'ouvre en haut vers l'intérieur, en bas vers l'extérieur. En France, ce type d'ouverture est surtout utilisé pour les fenêtres de toit.



Ouverture à la française  
à 1 ou 2 vantaux



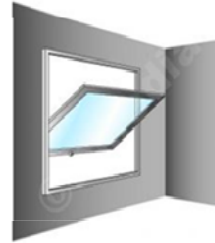
Ouverture oscillo-battante  
à 1 ou 2 vantaux



Ouverture à soufflet



Ouverture coulissante



Ouverture basculante

*Figure 4 : Les principaux types d'ouverture des fenêtres en France*

## 2.3 LES PRINCIPAUX TYPES DE POSE

Il existe trois grands types de pose :

### - La pose en feuillure :

La fenêtre, plus grande que le tableau, vient se placer à l'intérieur de la feuillure de l'ancien bâti. Elle est scellée dans le mur par l'intermédiaire de pattes de scellement généralement disposées au niveau des organes de rotation et un ancrage sur la traverse haute et basse.

La pose en feuillure est utilisée pour les constructions neuves ou en rénovation pour le remplacement total d'une ancienne fenêtre par une nouvelle.

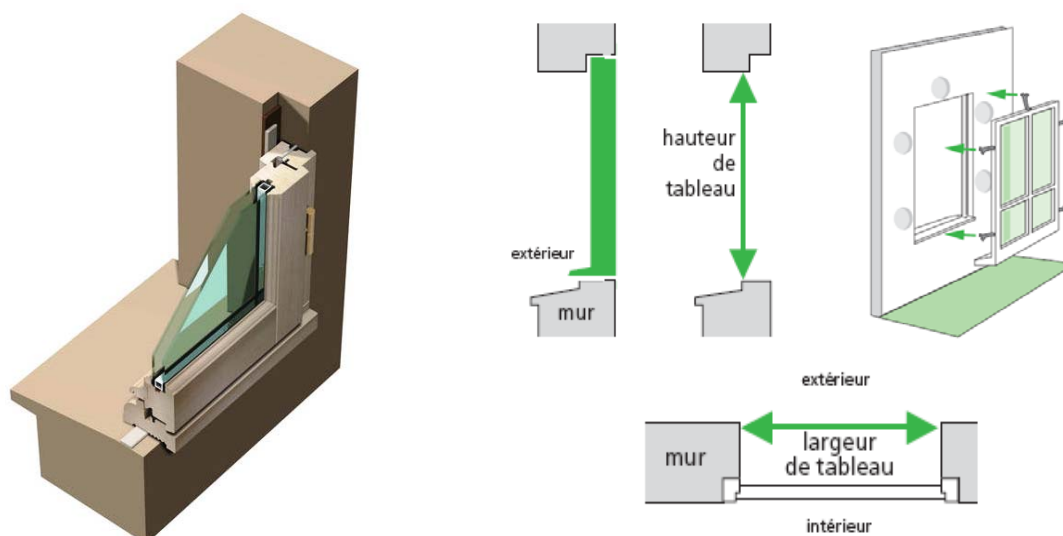


Figure 5 : Schéma de la pose en feuillure

### - La pose en tunnel (ou encore appelée pose en tableau) :

La fenêtre est fixée dans l'épaisseur du mur par chevillage à travers l' huisserie. Les chevillages sont disposés au niveau des organes de rotation et en traverses hautes et basses. La dimension totale de la menuiserie est donc légèrement inférieure à la dimension de l'ouverture.

La pose en tunnel est utilisée pour les constructions neuves ou pour les rénovations, avec ou sans isolation.

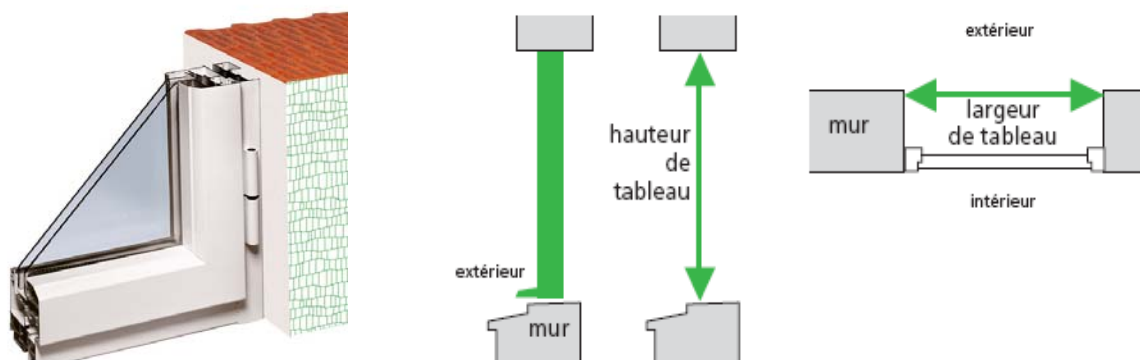


Figure 6 : Schéma de la pose en tunnel

- **La pose en applique :**

Comme son nom l'indique, la fenêtre vient s'appliquer sur le mur et est fixée à celui-ci par l'intermédiaire de pattes de fixation. Ces dernières sont disposées en priorité au voisinage des organes de rotation et des points de condamnation sur le dormant avec un écartement maximum entre les fixations de 80 cm et une à 10 cm de chaque angle. La menuiserie est plus grande que le tableau.

La pose en applique est utilisée pour les constructions neuves avec isolation intérieure ou en rénovation avec pose d'une isolation.

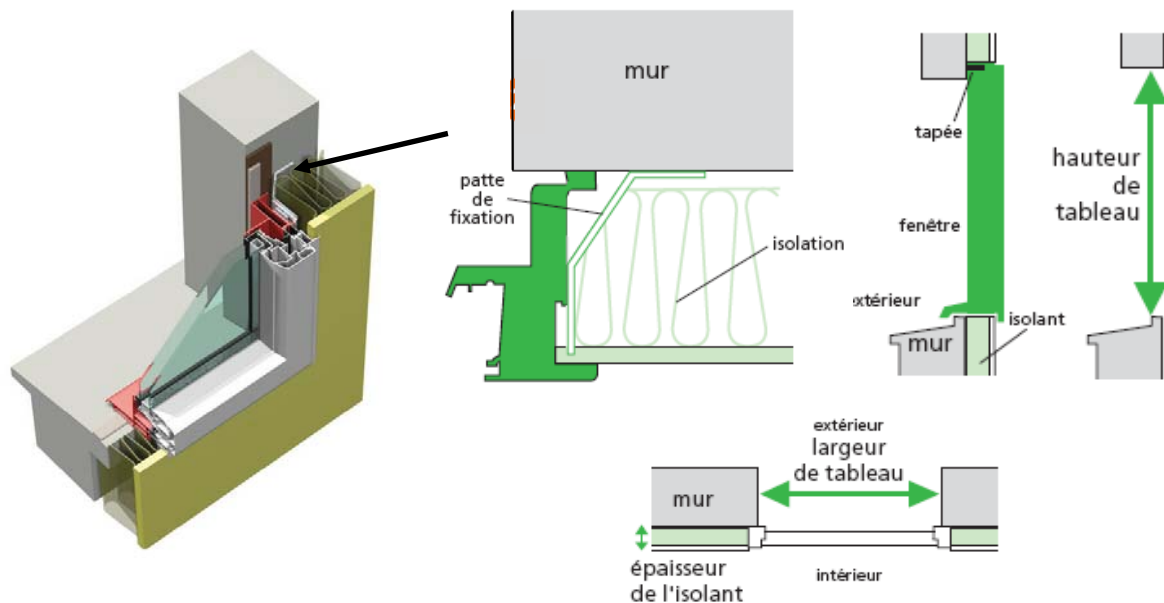


Figure 7 : Schéma d'une pose en applique

## 2.4 LES PRINCIPAUX TYPES DE VITRAGE

On peut distinguer trois grands types de vitrage :

- Vitrages simples monolithiques : constitués d'une seule feuille de verre ;
- Vitrages simples feuilletés : composés de 2 ou plusieurs feuilles de verre assemblées entre elles par un ou plusieurs films intercalaires en butyral de polyvinyle (PVB). Ces films de PVB permettent de retenir les fragments formés lors de la rupture du verre.

Ils sont caractérisés par leur importante capacité d'allongement pouvant atteindre 240% (1 mètre de PVB peut s'allonger jusqu'à 2,40 m). Ces vitrages sont notés XX.Y. Le nombre de X donne le nombre de panneaux de verre utilisés dans l'assemblage. La valeur X indique (en mm) l'épaisseur. Le dernier chiffre Y, séparé des précédents par un point indique le nombre de couches de films PVB. Par exemple un vitrage feuilleté 44.2 sera constitué de deux panneaux de verre de 4 mm séparés par deux couches de film PVB.



Figure 8 : Schéma d'un vitrage simple feuilleté de type 44.2 (à gauche) et 666.4 (à droite)

- Vitrages isolants doubles : composés de deux vitrages qui peuvent être simples monolithiques ou simples feuilletés séparés par une lame d'air ou autre gaz (argon).

Ces vitrages sont notés X/Y/Z. Les lettres X et Z indiquent l'épaisseur de chacun des composants verriers situés de part et d'autre de la lame d'isolant d'épaisseur Y (en mm). Par exemple un vitrage 4/16/4 est un vitrage constitué de deux vitrages simples monolithiques de 4mm séparés par une lame d'isolant de 16 mm. Un vitrage 44.2/12/4 est un vitrage composé d'un vitrage simple feuilleté de type 44.2, d'une lame d'air de 12 mm et d'un vitrage simple monolithique de 4 mm d'épaisseur.

Il existe sur le même principe des vitrages triples isolants.



Figure 9 : Schéma d'un vitrage isolant double de type 4/16/4 (à gauche) et 44.2/12/4 (à droite)

## 2.5 LES PRINCIPAUX TYPES DE VERRE

Le type de verre le plus couramment rencontré est le verre recuit. Lorsqu'il se fragmente, ce type de verre forme de grands fragments, très coupants, pouvant causer de nombreuses blessures.

Il existe également deux grands autres types de verres :

- le verre trempé thermiquement : ce verre a subi un processus de trempe thermique modifiant ses propriétés de résistance mécanique. Le volume de verre est chauffé jusqu'à 700°C (température où les molécules peuvent se déplacer), puis refroidi très rapidement et uniformément à 300°C par des jets d'air froid. Les couches externes sont refroidies en premier. Quand les régions internes se contractent à leur tour, elles «tirent» sur la surface et **créent une tension résiduelle de compression**.

Par ce processus, la résistance à la flexion du verre se trouve considérablement accrue : elle est 3 à 5 fois plus résistante qu'un verre recuit. Par ailleurs, lors de sa rupture, le verre présente la particularité de se fragmenter en une multitude de petits éclats.

- le verre semi-trempé ou durci : ce verre a également subi un traitement thermique visant à renforcer sa résistance mécanique. Son mode d'obtention est similaire à celui d'un verre trempé. Cependant la phase de refroidissement est plus lente.

Par ce processus, la résistance du verre à la flexion se trouve accrue. Elle est comprise entre celle du verre recuit et du verre trempé. Cependant le mode de rupture de ce type de verre se rapproche davantage d'un verre recuit. Il se fragmente en effet en morceaux de grandes dimensions et très coupants.

## **2.6 LES FILMS DE PROTECTION ANTI-FRAGMENT**

### **2.6.1 GENERALITES**

Les films de sécurité plastiques plus communément appelés films de protection anti-fragment sont utilisés pour améliorer les performances post-rupture des vitrages. Ils sont appliqués sur les faces intérieures des fenêtres. Il existe sur le marché un grand nombre de produits. Ils peuvent être teintés ou non. Les films non teintés ont de faibles effets sur les caractéristiques optiques du vitrage (Ils maintiennent la totalité de la luminosité du vitrage). Ceux teintés peuvent améliorer les caractéristiques du vitrage actuel en terme de déperdition thermique notamment. La plupart est conçue pour bloquer les rayons UV.

Ils peuvent être monocouches ou multicouches dont l'épaisseur totale varie en général de 50 microns et 400 microns.

L'application d'un film de sécurité permet d'améliorer les performances post-rupture des vitrages :

- augmentation de la résistance du vitrage ; Lors de la rupture de la vitre soumise à une onde de surpression, les fragments de verre restent collés au film et ce dernier absorbe une grande partie de l'énergie par déformation élastique et plastique ;
- forte réduction de la formation de fragments ;
- diminution de la vitesse des fragments projetés ;
- réduction de la distance de projection des fragments ;

L'efficacité des films plastiques dépend notamment :

- des caractéristiques matériaux du film : résistance à la rupture, capacité d'élongation, résistance à l'élongation ;
- de l'épaisseur du film ; plus le film est épais est plus la protection qu'il offre augmente.
- du mode de pose du film ;

### **2.6.2 MODE DE POSE DES FILMS DE PROTECTION ANTI-FRAGMENT**

Les films plastiques anti-fragment peuvent être classés en trois grandes catégories selon leur mode d'installation :

- Pose par simple adhérence au vitrage ;
- Installation par adhérence et fixation chimique au châssis ;
- Installation par adhérence et fixation mécanique au châssis ;

#### **2.6.2.1 POSE PAR SIMPLE ADHERENCE**

Ce mode d'installation du film de sécurité est la pose standard.

Le film est simplement posé sur le vitrage sans être fixé d'une quelconque manière au châssis. L'application de ce type de film doit au minimum couvrir la partie visible du vitrage de la fenêtre.



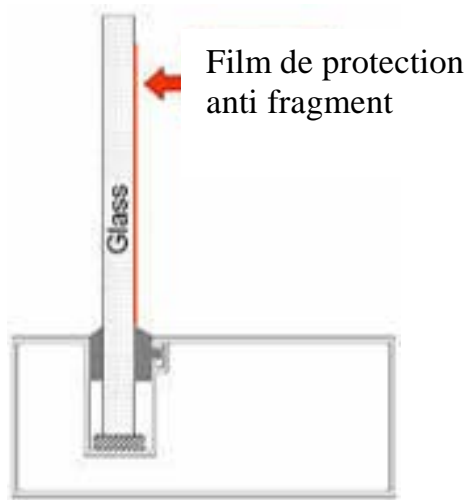


Figure 10 : Fixation du film par simple adhérence

### 2.6.2.2 SYSTEME DE FIXATION CHIMIQUE

Ce système de fixation aussi appelé fixation par enduit humide. Ce mode d'installation permet de fixer définitivement le film de protection au cadre de la vitre à l'aide d'un enduit structural ou d'un adhésif en silicone. Le film de protection est tout d'abord appliqué au verre, et il est ensuite fixé au cadre du verre à l'aide d'un enduit structural. L'enduit est appliqué aux quatre coins du film, comblant les orifices par où passe la lumière et faisant déborder le film du cadre afin de créer un lien chimique entre le film et le cadre.

Cette méthode est utilisée dans le but de renforcer la capacité de rétention d'éclats de verre du film. Il offre une protection plus grande que le système précédent. Cependant son coût est plus élevé, de l'ordre de 150 euros / m<sup>2</sup> hors pose.

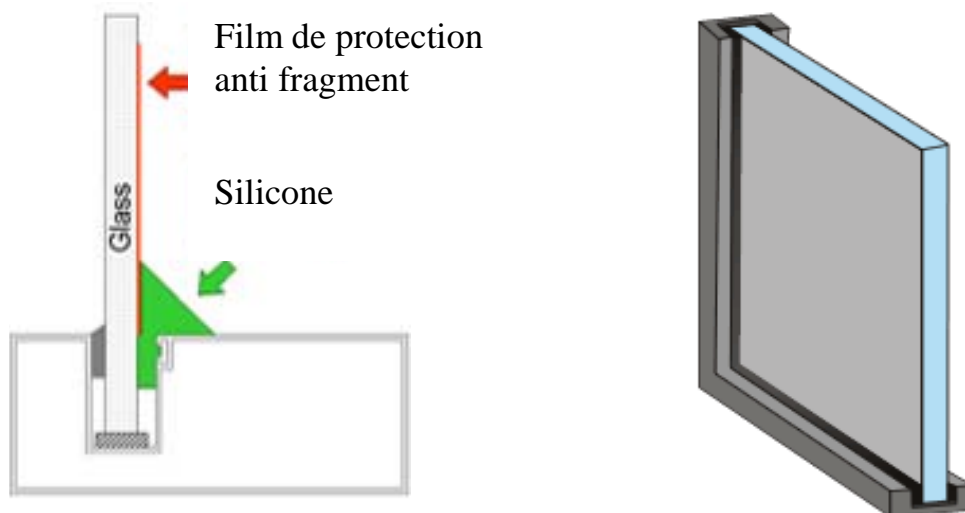


Figure 11 : Fixation chimique du film

### 2.6.2.3 SYSTEME DE FIXATION MECANIQUE

Ce type d'installation permet de fixer de manière mécanique le film au cadre de la vitre à l'aide d'un système de lattes métalliques. Le film de protection est appliqué au verre et dépasse le cadre de la vitre d'environ 2,5 cm. Une série de lattes métalliques est placée sur le film apposé et vissée au cadre de la vitre existant, ce qui permet de fixer définitivement le film au cadre. En fonction du type de rétention d'éclats de verre recherché, ce système mécanique peut être fixé sur un côté (bord supérieur), deux côtés ou sur les quatre côtés.

Ce système permet de diminuer la probabilité du vitrage à quitter le châssis. Il est plus efficace que les deux autres mais également beaucoup plus onéreux. Par ailleurs, il peut se révéler moins esthétique.

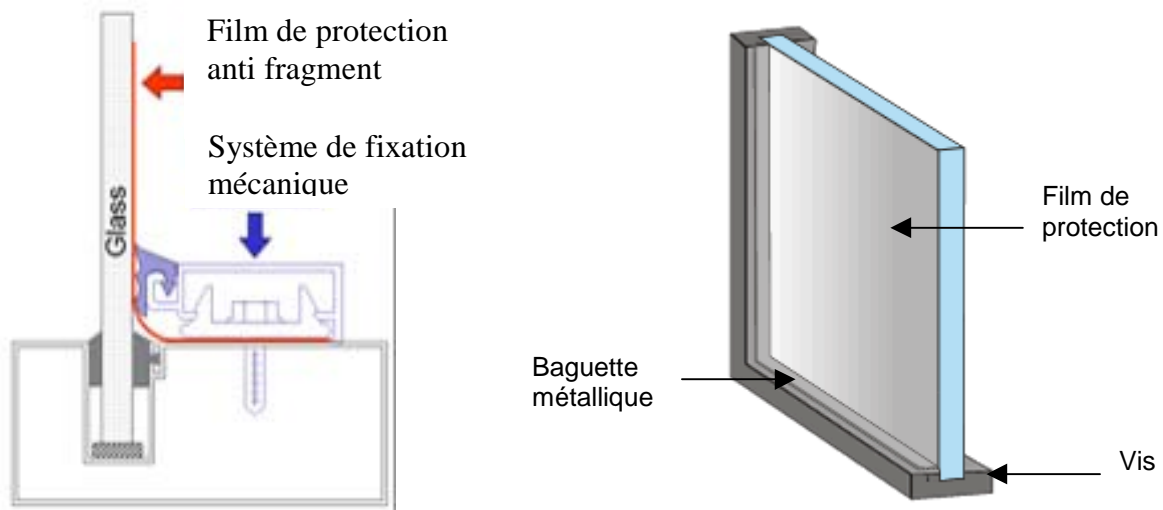


Figure 12 : Fixation mécanique du film

Toutes ces méthodes d'installation peuvent être utilisées sur des châssis en acier, en aluminium ou en bois. Sur les châssis en PVC seules sont possibles la pose par simple adhérence et la fixation chimique.

### **3. ELEMENTS PRATIQUES POUR PROTEGER LES FENETRES**

#### **3.1 INTRODUCTION**

Afin de garantir la protection des personnes se trouvant à l'intérieur d'une habitation située dans la zone des effets de surpression d'intensité 20-50 mbar (appelé par la suite zone 20-50 mbar), la tenue des fenêtres dans une telle zone doit être assurée.

Pour ce faire, les panneaux vitrés constituant la fenêtre doivent être capables de résister à une onde de surpression de 20 à 50 mbar ou dans une moindre mesure de casser sans risque de blessure (les bris de vitre susceptibles d'être projetés étant retenus). Cependant, cela ne suffit pas. En effet, en cas d'ouverture de la fenêtre, les vantaux peuvent être arrachés et projetés à l'intérieur des habitations causant alors de graves blessures. De même, une fixation non adaptée du cadre de la fenêtre dans le mur peut amener la fenêtre à s'arracher du mur et à être projetée.

Ainsi, garantir la tenue d'une fenêtre dans la zone 20-50 mbar, nécessite une démarche en 3 étapes :

- définir les dimensions maximales admissibles de différents panneaux vitrés isolants doubles standards ou feuilleté afin de résister ou casser sans risque de blessure dans la zone 20-50 mbar. On trouvera les éléments correspondants au chapitre 3.2.
- définir la configuration du châssis admissible en tenant compte :
  - du matériau constituant le châssis (PVC, aluminium, bois) ;
  - du mode d'ouverture de la fenêtre (ouverture à la française, coulissant, ...) ;
  - du système de fermeture de la fenêtre ;
  - du mode de pose ;

On trouvera les éléments correspondants au chapitre 3.3.

- définir la configuration admissible du mode de fixation du châssis dans le mur (chapitre 3.4)

Ces règles définissent un ensemble d'éléments pratiques permettant de garantir la tenue des fenêtres et ainsi protéger efficacement les personnes.

#### **3.2 DIMENSIONS DES PANNEAUX VITRES**

Le comportement d'un panneau vitré face à une onde de surpression dépend notamment :

- des caractéristiques du vitrage proprement dit : vitrage isolant double « standard », vitrage isolant double feuilleté ;
- des caractéristiques géométriques du panneau vitré : longueur L, largeur I, épaisseur e ;

Les tableaux en figure 17 à 23 présentent pour 5 vitrages isolants doubles différents, les dimensions maximales du panneau vitré correspondant permettant :

- de résister à une onde de surpression incidente de 20 à 50 mbar ;
- ou dans une moindre mesure de protéger efficacement les personnes contre ces agressions en cassant sans risque de blessure.

<b>Vitrage isolant double standard</b>	<b>4/16/4</b>
<b>Vitrages isolants doubles feuilletés</b>	<b>44.2/12/4</b>
	<b>4/12/44.2</b>
	<b>44.2/8/44.2</b>
<b>Vitrage sur mesure</b>	<b>8/8/8</b>

Figure 13 : Types de vitrages étudiés

Les valeurs sont données pour des vitrages constitués de composants verriers en verre recuit (sauf pour le 8/8/8 où les composants sont en verre trempé). Elles sont cependant encore applicables de manière conservatrice si le verre considéré est un verre durci ou semi-trempé.

Les panneaux vitrés considérés sont des panneaux rectangulaires de longueur  $L$  (considérée par définition comme la plus grande des deux dimensions) et de largeur  $l$  (correspondant par définition à la plus petite des deux dimensions). De fait, le rapport des dimensions  $L/l$  est supérieur ou égal à 1.

Il est à noter que les dimensions du panneau vitré sont à distinguer de celles de la fenêtre puisque par exemple une fenêtre à ouverture à la française à 2 vantaux est composée de deux panneaux vitrés.

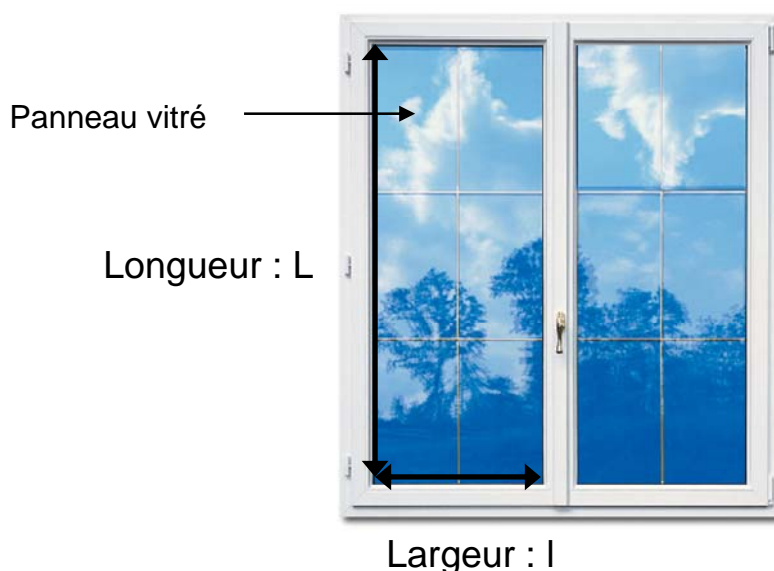


Figure 14 : Illustration des dimensions  $L$  et  $l$  d'un panneau vitré

Ces tableaux tiennent également compte :

- de la nature de l'onde de surpression générée par l'explosion : Le « *cahier applicatif du complément technique de la vulnérabilité du bâti aux effets de surpression* » [3] regroupe les phénomènes accidentels d'explosions en 6 catégories. Il est ici à retenir que selon le type de phénomènes, la nature du

produit mis en jeu, la masse ou le volume de produit retenu, deux régimes d'explosion sont à distinguer : le régime de déflagration et le régime de détonation (appelé par la suite onde de choc).

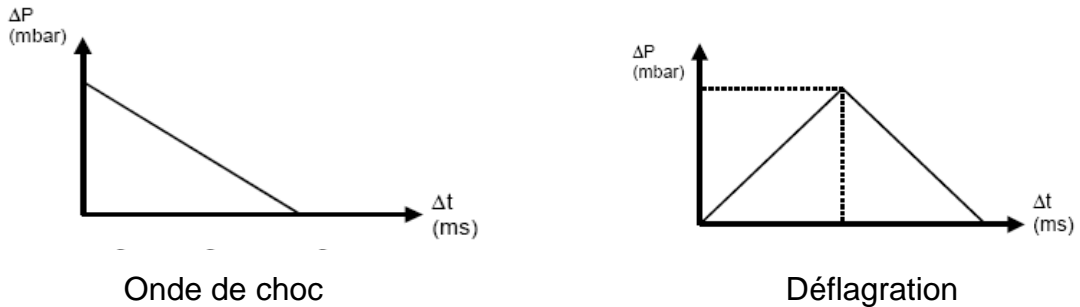


Figure 15 : Signaux de surpression typiques

- de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment. La zone réglementaire 20-50 mbar est en effet divisée en deux zones. Ainsi un bâtiment peut soit se trouver dans la zone 20-35 mbar soit dans la zone 35-50 mbar.
- de l'orientation des façades du bâtiment par rapport au centre de l'explosion repérée par un numéro : face 1 (la plus exposée), face 2, face 3 ou face 4 (la moins exposée). En effet, suivant leur orientation, les façades et donc les fenêtres sont plus ou moins exposées aux effets de l'explosion conduisant à différencier en fonction des faces les dimensions maximales des panneaux vitrés composant les fenêtres.

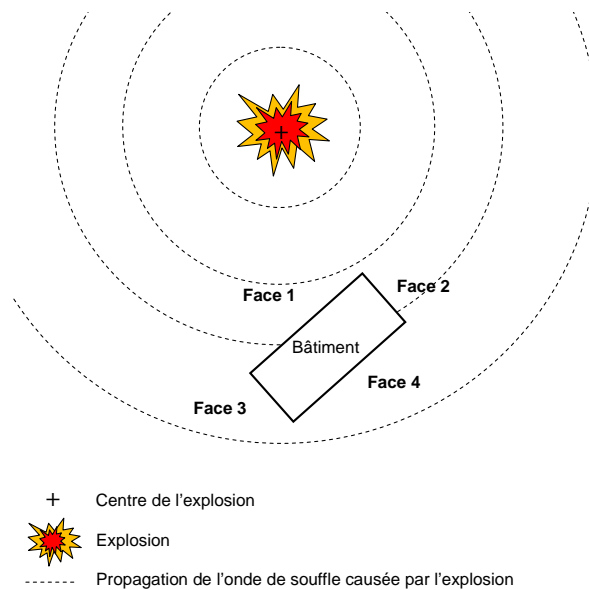


Figure 16 : Orientation des façades du bâtiment par rapport au centre de l'explosion

L'attribution des numéros de face obéit à des règles précises spécifiées dans le « *cahier applicatif du complément technique de la vulnérabilité du bâti aux effets de surpression* » [3] et présentées en annexe 1.

Ainsi connaissant la nature de l'explosion, la zone dans laquelle se trouve le bâtiment et le numéro de face du bâtiment, le tableau donne en fonction du rapport L/l variant de 1 à 4 (1, 1.5, 2, 3 et 4) la largeur maximale (l) admissible du panneau vitré afin de résister ou casser sans risque de blessure.

### 3.2.1 PANNEAUX VITRES EN DOUBLE VITRAGE 4/16/4

Les tableaux suivants donnent les dimensions maximales admissibles d'un panneau vitré constitué d'un vitrage 4/16/4 permettant de résister à une onde de choc ou une déflagration caractérisée par une surpression incidente de 20-35 mbar ou 35-50 mbar.

Onde de choc							
Zone	N° de face	Largeur du panneau vitré	L/l				
			1	1.5	2	3	4
Zone 35-50	Face 1	l (m)	0.55	0.40	0.30	0.25	0.25
	Face 2		0.65	0.55	0.40	0.30	0.30
	Face 3		0.90	0.70	0.65	0.40	0.40
	Face 4		0.95	0.75	0.70	0.45	0.45
Zone 20-35	Face 1	l (m)	0.70	0.55	0.40	0.35	0.35
	Face 2		0.90	0.70	0.65	0.40	0.40
	Face 3		1.15	0.90	0.80	0.55	0.50
	Face 4		1.20	0.95	0.85	0.55	0.55

Nota : L : longueur du panneau vitré, l : largeur du panneau vitré.

Déflagration							
Zone	N° de face	Largeur du panneau vitré	L/l				
			1	1.5	2	3	4
Zone 35-50	Face 1	l (m)	0.80	0.60	0.45	0.35	0.35
	Face 2		0.90	0.70	0.65	0.40	0.40
	Face 3		1.05	0.85	0.75	0.50	0.50
	Face 4		1.15	0.90	0.80	0.55	0.50
Zone 20-35	Face 1	l (m)	0.95	0.75	0.70	0.45	0.45
	Face 2		1.15	0.90	0.80	0.55	0.50
	Face 3		1.30	1.05	0.95	0.65	0.60
	Face 4		1.35	1.10	1.0	0.70	0.65

Figure 17 : Largeur maximale (l) d'un panneau vitré isolant double 4/16/4 en fonction de la nature de l'explosion, de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment, de la face du bâtiment considérée et du rapport L/l

### Exemple d'application :

- Exemple n°1 :

Considérons un panneau vitré isolant double 4/16/4 de dimensions 0.20X0.60 m<sup>2</sup> en face 1 d'une construction située dans la zone 35-50 d'une onde de choc.

Longueur : L=0.60 m

Largeur : l=0.20 m

Le rapport L/l est donc égal à 3.

D'après le premier tableau ci-dessus, un tel panneau vitré ne casse pas face à une onde de choc de surpression incidente de 35-50 mbar : la largeur du panneau vitré est en effet inférieure à la largeur maximale admissible pour un rapport L/l égale à 0.25 m.

Ainsi un tel panneau semble pouvoir protéger efficacement les personnes contre les blessures par bris de vitre.

- Exemple n°2 :

Considérons un panneau vitré isolant double 4/16/4 de dimensions 0.60X1.10 m<sup>2</sup>. Ces dimensions sont typiquement celles des panneaux vitrés composant un des types de fenêtres les plus couramment rencontrés dans l'habitat français à savoir les fenêtres à ouverture à la française à 2 vantaux de 1.40 m de large et de 1.25 m de haut.

Ce panneau vitré est placé en face 1 d'une construction située en zone 35-50 d'une onde de choc.

Pour ce panneau vitré : Longueur=1.10 m,

Largeur=0.60 m

Le rapport L/l est égal à 1.83

La valeur du rapport L/l de 1.83 ne figurant pas dans le premier tableau, la valeur L/l à retenir est la valeur supérieure la plus proche figurant dans le tableau, soit L/l = 2.

Pour cette valeur de L/l=2, la largeur du panneau vitré est supérieure à 0.30 m, la largeur maximale admissible (l) afin de ne pas casser face à une onde de choc de surpression incidente de 35 à 50 mbar.

Le panneau vitré casse. Les personnes ne peuvent pas être efficacement protégées. En effet, les fragments formés lors de la rupture de ce type de vitrage même pour les niveaux de surpression considérés sont généralement de taille relativement importante et sont projetés avec des vitesses moyennes de l'ordre de 20 m/s, susceptibles d'engendrer des risques de blessures pour une personne située derrière la fenêtre.

Plus généralement, ces panneaux, situés sur les faces des constructions les plus exposées par rapport à l'explosion (face 1 et 2) ne résistent pas à une onde de choc de surpression incidente de 35-50 mbar. Seuls les panneaux, placés sur les faces 3 et 4 des constructions peuvent résister à de tels effets et donc protéger les personnes contre les blessures par bris de vitre.

De plus, dans la zone 20-35 d'une onde de choc ou dans la zone 35-50 d'une déflagration, seuls les panneaux placés en face 2, 3 ou 4 des constructions peuvent résister.

Dans la zone 20-35 d'une déflagration, les panneaux de toutes les faces des constructions peuvent résister et donc protéger les personnes contre les blessures par bris de vitre.

Zone	Nature de l'onde de surpression	Face du bâtiment sur laquelle est la fenêtre
Zone 35-50	Onde de choc	Face 3 et 4
	Déflagration	Face 2, 3 et 4
Zone 20-35	Onde de choc	Face 2, 3 et 4
	Déflagration	Face 1, 2, 3 et 4

*Figure 18 : Configuration admissibles des panneaux vitrés de type 4/16/4 de dimensions 0.6 m x 1.1 m de fenêtres à ouverture à la française à 2 vantaux de dimensions hors tout standards : 1.40 m de large et de 1.25 m de haut*



### 3.2.2 PANNEAUX VITRES EN DOUBLE VITRAGE 44.2/12/4, VERRE FEUILLETE 44.2 POSE COTE EXTERIEUR

Les tableaux suivant donnent les dimensions maximales admissibles d'un panneau vitré constitué d'un vitrage 44.2/12/4, le verre simple monolithique de 4 mm étant posé côté intérieur, permettant de résister à une onde de choc ou une déflagration caractérisée par une surpression incidente de 20-35 mbar ou 35-50 mbar.

Onde de choc							
Zone	N° de face	Largeur du panneau vitré	L/l				
			1	1.5	2	3	4
Zone 35-50	Face 1	l (m)	0.90	0.75	0.70	0.50	0.45
	Face 2		1.0	0.80	0.80	0.55	0.50
	Face 3		1.30	1.05	0.95	0.75	0.65
	Face 4		1.35	1.10	1.0	0.80	0.70
Zone 20-35	Face 1	l (m)	1.10	0.90	0.85	0.65	0.55
	Face 2		1.30	1.05	0.95	0.75	0.65
	Face 3		1.55	1.25	1.15	0.90	0.80
	Face 4		1.65	1.35	1.25	1.05	0.90

Nota : L : longueur du panneau vitré, l : largeur du panneau vitré.

Déflagration							
Zone	N° de face	Largeur du panneau vitré	L/l				
			1	1.5	2	3	4
Zone 35-50	Face 1	l (m)	1.2	1.0	0.90	0.70	0.60
	Face 2		1.30	1.05	0.95	0.75	0.65
	Face 3		1.45	1.20	1.10	0.85	0.75
	Face 4		1.55	1.25	1.15	0.90	0.80
Zone 20-35	Face 1	l (m)	1.35	1.10	1.0	0.80	0.70
	Face 2		1.55	1.25	1.15	0.90	0.80
	Face 3		1.80	1.45	1.35	1.15	1.0
	Face 4		1.85	1.55	1.40	1.20	1.05

Figure 19 : Largeur maximale (l) d'un panneau vitré isolant double 44.2/12/4 en fonction de la nature de l'explosion, de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment, de la face du bâtiment considérée et du rapport L/l

### Exemple d'application n°3 :

Considérons un panneau vitré isolant double 44.2/12/4 de dimensions identiques à celles de l'exemple n°2 :  $0.60 \times 1.10 \text{ m}^2$ , en face 1 d'une habitation dans la zone 35-50 mbar d'une onde de choc.

La largeur du panneau vitré est inférieure à 0.70 m, la largeur maximale admissible (l) afin de ne pas casser face à une onde de choc dans la zone 35-50 mbar pour un rapport  $L/l=2$ .

Le panneau vitré ne casse pas. Il semble pouvoir protéger efficacement les personnes contre les blessures par bris de vitre.

### 3.2.3 PANNEAUX VITRES EN DOUBLE VITRAGE 4/12/44.2, VERRE FEUILLETE 44.2 POSE COTE INTERIEUR

Les tableaux suivant donnent les dimensions maximales admissibles d'un panneau vitré constitué d'un vitrage 4/12/44.2, le verre simple feuilleté 44.2 étant posé côté intérieur, permettant de résister à une onde de choc ou une déflagration caractérisée par une surpression incidente de 20-35 mbar ou 35-50 mbar.

Onde de choc							
Zone	N° de face	Largeur du panneau vitré	L/l				
			1	1.5	2	3	4
Zone 35-50	Face 1	l (m)	1.40	1.15	0.80	0.70	0.70
	Face 2		1.65	1.35	1.0	0.85	0.80
	Face 3		2.10	1.70	1.55	1.10	1.0
	Face 4		2.15	1.75	1.60	1.15	1.05
Zone 20-35	Face 1	l (m)	1.70	1.35	1.05	0.85	0.80
	Face 2		1.95	1.60	1.45	1.0	0.95
	Face 3		2.40	1.95	1.80	1.30	1.20
	Face 4		2.50	2.05	1.90	1.40	1.25

Nota : L : longueur du panneau vitré, l : largeur du panneau vitré.

Déflagration							
Zone	N° de face	Largeur du panneau vitré	L/l				
			1	1.5	2	3	4
Zone 35-50	Face 1	l (m)	1.85	1.50	1.40	0.95	0.90
	Face 2		2.10	1.70	1.55	1.10	1.0
	Face 3		2.35	1.90	1.75	1.25	1.15
	Face 4		2.50	2.05	1.90	1.40	1.25
Zone 20-35	Face 1	l (m)	2.15	1.75	1.60	1.15	1.05
	Face 2		2.40	1.95	1.80	1.30	1.20
	Face 3		2.70	2.25	2.10	1.60	1.40
	Face 4		2.80	2.35	2.20	1.70	1.50

Figure 20 : Largeur maximale (l) d'un panneau vitré isolant double 4/12/44.2 en fonction de la nature de l'explosion, de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment, de la face du bâtiment considérée et du rapport L/l

### 3.2.4 PANNEAUX VITRES EN DOUBLE VITRAGE 44.2/8/44.2

Les tableaux suivant donnent les dimensions maximales admissibles d'un panneau vitré constitué d'un vitrage 44.2/8/44.2 permettant résister ou casser sans risque de blessure contre une onde de choc ou une déflagration caractérisée par une surpression incidente de 20-35 mbar ou 35-50 mbar.

Onde de choc							
Zone	N° de face	Largeur du panneau vitré	L/l				
			1	1.5	2	3	4
Zone 35-50	Face 1	l (m)	1.80	1.45	1.20	0.90	0.85
	Face 2		2.10	1.70	1.55	1.10	1.0
	Face 3		2.65	2.20	2.0	1.50	1.35
	Face 4		2.70	2.25	2.05	1.60	1.40
Zone 20-35	Face 1	l (m)	2.15	1.75	1.60	1.15	1.05
	Face 2		2.50	2.05	1.85	1.40	1.25
	Face 3		3.15	2.55	2.30	2.10	1.65
	Face 4		3.25	2.65	2.40	2.20	1.75

Nota : L : longueur du panneau vitré, l : largeur du panneau vitré.

Déflagration							
Zone	N° de face	Largeur du panneau vitré	L/l				
			1	1.5	2	3	4
Zone 35-50	Face 1	l (m)	2.35	1.95	1.80	1.30	1.15
	Face 2		2.65	2.20	2.0	1.50	1.35
	Face 3		3.05	2.50	2.25	2.0	1.60
	Face 4		3.25	2.65	2.40	2.20	1.75
Zone 20-35	Face 1	l (m)	2.70	2.25	2.05	1.60	1.40
	Face 2		3.15	2.55	2.30	2.10	1.65
	Face 3		3.40	2.85	2.60	2.40	1.95
	Face 4		3.50	3.0	2.75	2.50	2.05

Figure 21 : Largeur maximale (l) d'un panneau vitré isolant double 44.2/8/44.2 en fonction de la nature de l'explosion, de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment, de la face du bâtiment considérée et du rapport L/l

#### Exemples d'application n°4 :

Considérons un panneau vitré isolant double 44.2/8/44.2 de dimensions  $0.60 \times 1.80 \text{ m}^2$  en face 1 d'une construction située dans la zone 35-50 d'une onde de choc.

Longueur :  $L=1.80 \text{ m}$

Largeur :  $l=0.6 \text{ m}$

Le rapport  $L/l$  est donc égal à 3.

D'après le tableau ci-dessous, un tel panneau vitré ne casse pas ou casse sans risque de blessure face à une onde de choc de surpression incidente de 35-50 mbar : la largeur du panneau vitré est en effet inférieure à la largeur maximale admissible égale à 0.90 m pour un rapport  $L/l$  de 3.

Ainsi un tel panneau semble pouvoir protéger efficacement les personnes contre les blessures par bris de vitre.

### 3.2.5 PANNEAUX VITRES EN DOUBLE VITRAGE 8/8/8 EN VERRE TREMPÉ

Les tableaux suivant donnent les dimensions maximales admissibles d'un panneau vitré constitué d'un vitrage 8/8/8, qui contrairement aux autres serait en verre trempé, permettant de résister à une onde de choc ou une déflagration caractérisée par une surpression incidente de 20-35 mbar ou 35-50 mbar.

Onde de choc							
Zone	N° de face	Largeur du panneau vitré	L/l				
			1	1.5	2	3	4
Zone 35-50	Face 1	l (m)	1.50	1.20	1.05	0.70	0.70
	Face 2		1.75	1.40	1.30	0.90	0.80
	Face 3		2.20	1.80	1.65	1.20	1.10
	Face 4		2.30	1.85	1.70	1.30	1.15
Zone 20-35	Face 1	l (m)	1.80	1.45	1.35	0.90	0.85
	Face 2		2.15	1.75	1.60	1.15	1.05
	Face 3		2.60	2.15	1.95	1.75	1.40
	Face 4		2.75	2.25	2.0	1.80	1.45

Nota : L : longueur du panneau vitré, l : largeur du panneau vitré.

Déflagration							
Zone	N° de face	Largeur du panneau vitré	L/l				
			1	1.5	2	3	4
Zone 35-50	Face 1	l (m)	1.95	1.60	1.45	1.0	0.95
	Face 2		2.15	1.75	1.60	1.20	1.05
	Face 3		2.45	2.0	1.85	1.55	1.25
	Face 4		2.60	2.15	1.95	1.75	1.40
Zone 20-35	Face 1	l (m)	2.30	1.85	1.70	1.30	1.15
	Face 2		2.60	2.15	1.95	1.75	1.40
	Face 3		2.90	2.40	2.15	1.80	1.65
	Face 4		3.0	2.50	2.20	1.85	1.70

Figure 22 : Largeur maximale (l) d'un panneau vitré isolant double 8/8/8 en verre trempé en fonction de la nature de l'explosion, de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment, de la face du bâtiment considérée et du rapport L/l

#### Exemple d'application n°5 :

Considérons un panneau vitré isolant double 8/8/8 de dimensions identiques à celles de l'exemple n°1 :  $0.60 \times 1.80 \text{ m}^2$ , placé en face 1 d'une construction située en zone 35-50 d'une onde de choc.

Pour ce panneau vitré, la largeur est de 0.6 m et le rapport  $L/l$  est égal à 3.

Pour cette valeur de  $L/l=3$ , la largeur du panneau vitré est inférieure à 0.7 m, la largeur maximale admissible ( $l$ ) afin de ne pas casser face à une onde de choc de surpression incidente de 35-50 mbar.

Le panneau vitré ne casse donc pas. Il semble ainsi pouvoir protéger efficacement les personnes situées à l'intérieur de l'habitation contre les blessures par bris de vitre.

### 3.2.6 PANNEAUX VITRES MUNIS DE FILMS DE PROTECTION ANTI-FRAGMENT

Des films de sécurité appliqués sur des vitrages simples monolithiques ou des vitrages isolants doubles standards 4/16/4 peuvent, sous certaines conditions, garantir la protection des personnes à l'intérieur d'une habitation située dans la zone 20-50 mbar. En effet les films de sécurité peuvent améliorer les performances post-rupture des vitrages en réduisant significativement la projection des fragments formés lors de la rupture du vitrage (ceux-ci restant en grande majorité collés au film), et en maintenant le panneau vitré dans le cadre de la fenêtre.

Les préconisations suivantes sont à respecter :

- Les films de sécurité doivent être posés dans les règles de l'art par des professionnels.
- Parmi les trois principaux modes de pose, seules sont acceptées :
  - La pose par fixation mécanique : Ce type d'installation permet de fixer de manière mécanique le film au cadre de la vitre à l'aide d'un système de baguettes métalliques vissées au cadre de la vitre existant. Ce système doit permettre de fixer le film sur les quatre côtés.
  - La pose par fixation chimique : Ce mode d'installation permet de fixer le film de protection au cadre de la vitre à l'aide d'un enduit structural ou d'un adhésif en silicone.
- Les films de sécurité doivent être des films de haute performance.

Les films de sécurité pourront par exemple respecter les caractéristiques suivantes :

<b>Elongation (%)</b>	<b>&gt; = 140 %</b>
<b>Epaisseur x Contrainte à la rupture (MPa.m)</b>	<b>&gt; = 0.03</b>
<b>Classement norme GSA<sup>(1)</sup></b>	<b>Minimum 3b</b>

<sup>(1)</sup>Cette recommandation s'applique pour un film testé dans les conditions suivantes :

- appliqué sur un vitrage monolithique recuit de 1.6 m x 1.3 m et de 6 mm d'épaisseur
- classé au minimum 3b lorsque cet ensemble est soumis à un signal triangulaire rectangle d'intensité 275 mbar et de 14 ms

Ce film est ainsi testé en accord avec le protocole et les spécifications de la norme GSA.

- Les dimensions maximales des panneaux vitrés doivent être conformes aux tableaux suivants :
  - Panneaux en vitrages simples monolithiques recuits de 4 mm d'épaisseur munis d'un film de protection anti-fragment



Onde de choc							
Zone	N° de face	Largeur du panneau vitré	L/l				
			1	1.5	2	3	4
Zone 35-50	Face 1	l (m)	0.4	0.30	0.25	0.25	0.20
	Face 2		0.5	0.35	0.30	0.30	0.25
	Face 3		0.70	0.50	0.40	0.35	0.35
	Face 4		0.70	0.55	0.40	0.35	0.35
Zone 20-35	Face 1	l (m)	0.55	0.35	0.30	0.30	0.25
	Face 2		0.65	0.45	0.35	0.30	0.30
	Face 3		0.85	0.65	0.50	0.40	0.40
	Face 4		0.90	0.70	0.55	0.45	0.40

Nota : L : longueur du panneau vitré, l : largeur du panneau vitré.

Déflagration							
Zone	N° de face	Largeur du panneau vitré	L/l				
			1	1.5	2	3	4
Zone 35-50	Face 1	l (m)	0.60	0.40	0.35	0.30	0.30
	Face 2		0.70	0.50	0.40	0.35	0.35
	Face 3		0.80	0.65	0.45	0.40	0.40
	Face 4		0.90	0.70	0.55	0.45	0.40
Zone 20-35	Face 1	l (m)	0.70	0.55	0.40	0.35	0.35
	Face 2		0.85	0.65	0.50	0.40	0.40
	Face 3		0.95	0.80	0.70	0.50	0.45
	Face 4		1.05	0.85	0.80	0.55	0.50

Figure 23 : Largeur maximale (l) d'un panneau vitré muni d'un vitrage simple monolithique recuit de 4mm avec film de sécurité en fonction de la nature de l'explosion, de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment, de la face du bâtiment considérée et du rapport L/l

- Panneaux en double vitrage 4/16/4 munis d'un film de protection anti-fragment

Onde de choc							
Zone	N° de face	Largeur du panneau vitré	L/l				
			1	1.5	2	3	4
Zone 35-50	Face 1	l (m)	0.85	0.70	0.65	0.50	0.45
	Face 2		1.0	0.85	0.75	0.60	0.55
	Face 3		1.25	1.0	0.95	0.75	0.65
	Face 4		1.30	1.05	0.95	0.80	0.70
Zone 20-35	Face 1	l (m)	1.0	0.85	0.80	0.60	0.55
	Face 2		1.20	0.95	0.90	0.70	0.65
	Face 3		1.45	1.20	1.10	1.0	0.80
	Face 4		1.50	1.20	1.15	1.0	0.85

Nota : L : longueur du panneau vitré, l : largeur du panneau vitré.

Déflagration							
Zone	N° de face	Largeur du panneau vitré	L/l				
			1	1.5	2	3	4
Zone 35-50	Face 1	l (m)	1.10	0.90	0.85	0.65	0.60
	Face 2		1.25	1.0	0.95	0.75	0.65
	Face 3		1.40	1.15	1.05	0.95	0.75
	Face 4		1.50	1.20	1.15	1.0	0.85
Zone 20-35	Face 1	l (m)	1.30	1.05	0.95	0.80	0.70
	Face 2		1.45	1.20	1.10	1.0	0.80
	Face 3		1.65	1.35	1.20	1.05	0.95
	Face 4		1.75	1.45	1.25	1.10	1.0

Figure 24 : Largeur maximale (l) d'un panneau vitré isolant double 4/16/4 avec film de sécurité en fonction de la nature de l'explosion, de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment, de la face du bâtiment considérée et du rapport L/l

Exemple d'application n°6 :

Considérons un panneau vitré simple monolithique recuit de 4 mm d'épaisseur, de dimensions 0.60X1.10 m<sup>2</sup>. Celui-ci est muni d'un film de protection anti-fragment posé par fixation chimique ou mécanique.

L'ensemble est supposé être en face 3 d'une construction située en zone 20-35 d'une onde de choc.

Pour ce panneau vitré : Longueur=1.10 m,

Largeur=0.60 m

Le rapport L/l est égal à 1.83

La valeur du rapport L/l de 1.83 ne figurant pas dans le premier tableau, la valeur L/l à retenir est la valeur supérieure la plus proche figurant dans le tableau, soit L/l = 2.

Pour cette valeur de L/l=2, la largeur du panneau vitré est supérieure à 0.50 m, la largeur maximale admissible (l) afin de casser sans risque de blessure face à une onde de choc de surpression incidente de 20-35 mbar.

En conséquence le panneau casse et un nombre important de fragments risque d'être projeté. Les personnes ne peuvent donc pas être efficacement protégées contre les blessures par bris de vitre.

Exemple d'application n°7 :

L'application de film de sécurité sur des panneaux vitrés isolants doubles de type 4/16/4, de dimensions 0.60X1.10m<sup>2</sup>, en face 1 d'une construction située dans la zone 35-50 mbar d'une onde de choc, permettrait résister ou casser sans risques de blessures par bris de vitre pour les personnes.

Le chapitre 3.2 s'est attaché à définir les dimensions maximales admissibles de différents panneaux vitrés isolants doubles standards ou feuilletés, ainsi que l'influence de la pose de film de protection anti-fragment afin de résister ou casser sans risque de blessure dans la zone 20-50. Cependant, garantir la tenue d'une fenêtre dans cette zone, c'est certes disposer de panneaux vitrés capables de résister à de telles intensités, mais également respecter des règles particulières quant aux :

- matériau constituant le châssis (PVC, aluminium, bois) ;
- mode d'ouverture de la fenêtre (ouverture à la française, coulissant, ...) ;
- système de fermeture de la fenêtre ;
- mode de pose de la fenêtre (en applique, en tunnel, ...).

### **3.3 REGLES SIMPLES A RESPECTER SUR LES CHASSIS, LE SYSTEME DE FERMETURE**

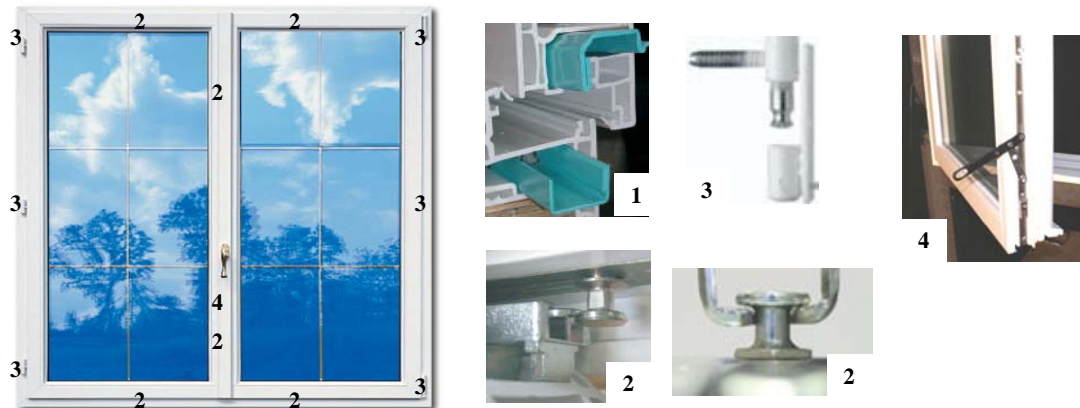
Les modes d'ouverture possibles de fenêtres sont très variés. Il en existe une douzaine. Il paraît alors difficile d'étudier chacun d'entre eux de manière exhaustive. Néanmoins l'INERIS a pris le parti de donner des recommandations qui s'appliquent sur l'ensemble de ceux-ci.

#### **3.3.1 CHASSIS PVC**

Dans la zone 20-50 mbar, l'utilisation de fenêtre en PVC doit être accompagnée d'une des mesures suivantes :

- Les panneaux vitrés sont montés sur châssis fixe. La fenêtre ne comporte pas d'ouvrant, le vitrage est monté dans le cadre de la fenêtre qui est fixé au mur ;
- Les fenêtres sont munies d'ouvrants orientés vers l'extérieur (comme l'ouverture à l'anglaise ou à l'italienne) ;
- Les fenêtres sont munies d'ouvrants orientés vers l'intérieur respectant au moins les préconisations suivantes :
  - Tout mode d'ouverture vers l'intérieur autre que l'ouverture à la française est à proscrire ;
  - Les fenêtres sont posées en applique, en feuillure ou en tunnel en respectant les préconisations données au chapitre 3.4 ;
  - Les traverses et montants du dormant et des châssis mobiles doivent être renforcés par des armatures en acier ;
  - Les fenêtres sont munies d'un système de fermeture individuelle des ouvrants avec renvoi d'angle constitué de gâches métalliques de sécurité anti-décrochement avec galets champignon. Les gâches sont fixées sur les éléments en PVC par l'intermédiaire de vis de longueur suffisante pour traverser la première épaisseur de PVC et le renfort métallique ;
  - Les paumelles sont munies d'un système anti-dégondage et doivent être vissées dans l'acier des dormants et des battants ;

- Le nombre de points (paumelles ou points de condamnation de type gâche métallique + galet champignon) liant les ouvrants au dormant de la fenêtre doit au moins être égal à  $N = 6S_f$  où  $S_f$  est la surface totale de la fenêtre en  $m^2$ .



(1) Armature en acier, (2) Gâche métallique avec galet champignon, (3) Paumelle anti-dégondage  
(4) Exemple de système de fermeture individuelle de l'ouvrant

Figure 25 : Exemple pour une fenêtre à ouverture à la française à deux vantaux de dimensions tableaux  $h=1.25\text{ m} \times l = 1.40\text{ m}$

Les caractéristiques précitées sont classiquement celles d'une fenêtre retardataire d'effraction.

Quel que soit le mode de pose considéré, un système de fermeture à crémone, munie d'une tringle métallique sans renvoi d'angle s'enfonçant en partie haute et basse dans des gâches (voir Figure 26), ne permet de garantir le maintien de la fenêtre en position fermée. Les ouvrants peuvent alors être arrachés et projetés, causant potentiellement de graves blessures pour une personne située à quelques mètres derrière la fenêtre.



(1) système de fermeture centrale

(2) fermeture haute et basse sans renvoi d'angle : gâche recevant une tringle métallique

Figure 26 : Système de fermeture classique à crémone 3 points avec sortie de tringle (sans renvoi d'angle) d'une fenêtre à ouverture à la française

Ainsi les fenêtres à ouverture à la française constituées d'un châssis en PVC et d'un système de fermeture classique à crémone avec sortie de tringle (sans

renvoi d'angle) sont à proscrire, et ce quel que soit le mode de pose (tunnel, feuillure, applique). Elles ne permettent pas en effet de protéger efficacement les personnes se trouvant à l'intérieur des habitations dans la zone d'intensité 20-50.

### 3.3.2 CHASSIS ALUMINIUM

Dans la zone 20-50 mbar, l'utilisation de fenêtres en aluminium doit être accompagnée d'une des mesures suivantes :

- Les panneaux vitrés sont montés sur châssis fixe ;
- Les fenêtres sont munies d'ouvrants orientés vers l'extérieur (comme l'ouverture à l'anglaise ou à l'italienne) ;
- Les fenêtres sont munies d'ouvrants orientés vers l'intérieur respectant au moins les éléments de préconisation suivants :
  - Tout mode d'ouverture vers l'intérieur autre que l'ouverture à la française est à proscrire.
  - Les fenêtres doivent être posées en tunnel, en feuillure ou en applique en respectant les préconisations données au chapitre 3.4 ;
  - Les fenêtres sont munies d'un système de fermeture individuelle des ouvrants avec renvoi d'angle constitué de gâches métalliques de sécurité anti-décrochement avec galets champignon. Les gâches sont fixées sur les traverses du dormant par l'intermédiaire de vis de longueur suffisante pour traverser deux épaisseurs d'aluminium ;
  - Les paumelles sont munies d'un système anti-dégondage et doivent être vissées dans les dormants et les battants ;
  - Le nombre de points (paumelles ou points de condamnation de type gâche métallique + galet champignon) liant les ouvrants au dormant de la fenêtre doit au moins être égal à  $N = 6S_f$  où  $S_f$  est la surface totale de la fenêtre en  $m^2$ .

Les fenêtres à ouverture à la française constituées d'un châssis en aluminium munies d'un système de fermeture à crémone avec sortie de tringle sans renvoi d'angle, quel que soit le mode de pose considéré, ne semblent pas permettre de protéger efficacement les personnes se trouvant à l'intérieur des habitations dans la zone 20-50 mbar. Elles sont donc à proscrire.

### 3.3.3 CHASSIS BOIS

Dans la zone 20-50 mbar, l'utilisation de fenêtres en bois doit être accompagnée d'une des mesures suivantes :

- Les panneaux vitrés sont montés sur châssis fixe ;
- Les fenêtres sont munies d'ouvrants orientés vers l'extérieur (comme l'ouverture à l'anglaise ou à l'italienne) ;
- Les fenêtres sont munies d'ouvrants orientés vers l'intérieur respectant au moins les éléments de préconisation suivants :
  - Tout mode d'ouverture vers l'intérieur autre que l'ouverture à la française est à proscrire.

- Les fenêtres doivent être posées en tunnel, en feuillure ou en applique selon les préconisations données au chapitre 3.4 ;
- Si la fenêtre est posée en tunnel ou en feuillure :
  - o le système de fermeture de la fenêtre peut être un système de fermeture à crémonne avec sortie de tringle sans renvoi d'angle. Il est recommandé l'utilisation de gâches métalliques fixées à l'intérieur des traverses du dormant par l'intermédiaire d'au moins deux vis de longueur suffisante capable de reprendre un effort de cisaillement égal à  $R = 1.05 \cdot 10^4 \times \frac{S_f}{N_p + 2}$  (en N) avec  $S_f$ : surface totale de la fenêtre (en  $m^2$ ) et  $N_p$  le nombre de paumelle de la fenêtre ;
  - o Un système de fermeture individuelle des ouvrants avec renvoi d'angle constitué de gâches métalliques de sécurité anti-décrochement avec galet champignon est préférable. La gâche est fixée sur les éléments en bois par l'intermédiaire de vis de longueur suffisante ;
- Si la fenêtre est posée en applique, elle doit être munie d'un système de fermeture individuelle des ouvrants avec renvoi d'angle constitué de gâches métalliques de sécurité anti-décrochement avec galets champignon ;

Le nombre de points (paumelles ou points de condamnation de type gâche métallique + galet champignon) liant les ouvrants au dormant de la fenêtre doit au moins être égal à  $N = 6S_f$  où  $S_f$  est la surface totale de la fenêtre en  $m^2$ .

Les fenêtres à ouverture à la française munies d'un système de fermeture à crémonne avec sortie de tringle sans renvoi d'angle, posées en applique, sont à proscrire dans la zone 20-50. Elles ne permettent pas de protéger efficacement les personnes se trouvant à l'intérieur des habitations.

- Les paumelles sont munies d'un système anti-dégondage et doivent être vissées dans les dormants et les battants.

### 3.4 FIXATION DE LA FENETRE DANS LE MUR

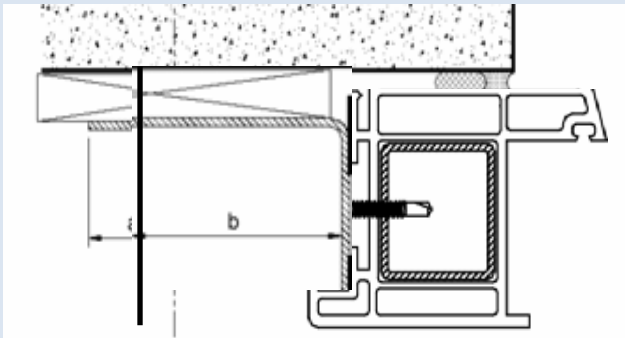
Les tableaux suivant dressent les recommandations à respecter quant à la fixation dans le mur d'une fenêtre à ouverture à la française à doubles vantaux. Ces recommandations sont données en fonction de plusieurs paramètres :

- la zone dans laquelle se trouve le bâtiment :
  - o zone 35-50 mbar ;
  - o zone 20-35 mbar.
- l'orientation des façades du bâtiment par rapport au centre de l'explosion repérée par un numéro : face 1 (la plus exposée), face 2, face 3 ou face 4 (la moins exposée) ;
- le type de pose : en feuillure, en tunnel ou en applique.

#### 3.4.1 ZONE 35-50 MBAR

		Recommandations		
Type de pose	Intitulés	Face 1	Face 2	Face 3 et 4
Pose en feuillure	Emplacement des pattes de scellement principales	Figure 27 ou Figure 28		
	Distance maximale entre 2 pattes à la périphérie du dormant	25 cm	50 cm	
Pose en tunnel	Emplacement des chevillages principaux	Figure 27 ou Figure 28		
	Distance maximale entre 2 chevillages à la périphérie du dormant	25 cm	50 cm	
	Tenue des chevillages au cisaillement $V_c$ (en N)	$V_c > (C \times S_f) / N_f$ avec $S_f$ : surface de la fenêtre en $m^2$ $N_f$ : nombre total de chevilles C coefficient donné ci-dessous		
		$C=2.1 \times 10^4$	$C=1.6 \times 10^4$	$C=1.0 \times 10^4$



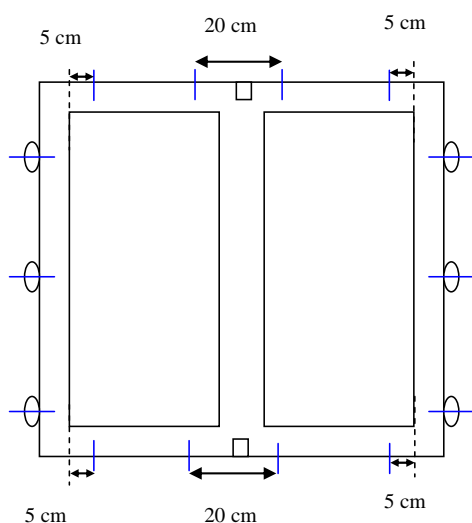
	Recommandations			
Type de pose	Intitulés	Face 1	Face 2	Face 3 et 4
Pose en applique	Emplacement des équerres de fixation principales	Figure 27 ou Figure 28		
	Distance maximale entre 2 équerres à la périphérie du dormant	25 cm	50 cm	
	Les équerres de fixation doivent être fixées sur le dormant de la fenêtre par vissage direct. Les systèmes à clippage, clame ou à griffe sont à proscrire.			
	Tenue au cisaillement des vis de fixation dans le dormant $V_v$	$V_v > (C \times S_f) / N_f$ avec $S_f$ : surface de la fenêtre en $m^2$ $N_f$ : nombre total de vis C coefficient donné ci-dessous		
		$C=2.1 \times 10^4$	$C=1.6 \times 10^4$	$C=1.0 \times 10^4$
Tenue à l'arrachement des chevillages dans le mur $A_c$ (en N)	$A_c > V_v \cdot (1 + 1.5 \cdot b/a)$			
	 <p>L'aile d'appui sur la structure porteuse est de dimension <math>a+b</math>  <math>a</math> : longueur entre l'axe de la vis et l'extrémité de la patte</p>			

### 3.4.2 ZONE 20-35 MBAR

	Recommandations		
Type de pose	Intitulés	Face 1	Face 2, 3 et 4
Pose en feuillure	Emplacement des pattes de scellement principales	Figure 27 ou Figure 28	
	Distance maximale entre 2 pattes à la périphérie du dormant	50 cm	
Pose en tunnel	Emplacement des chevillages principaux	Figure 27 ou Figure 28	
	Distance maximale entre 2 chevillages à la périphérie du dormant	50 cm	
	Tenue des chevillages au cisaillement $V_c$ (en N)	$V_c > (C \times S_f) / N_f$ avec $S_f$ : surface de la fenêtre en $m^2$ $N_f$ : nombre total de chevilles $C$ coefficient donné ci-dessous	
		$C=1.3 \times 10^4$	$C=1.0 \times 10^4$
Pose en applique	Emplacement des équerres de fixation principales	Figure 27 ou Figure 28	
	Distance maximale entre 2 équerres à la périphérie du dormant	50 cm	
	Les équerres de fixation doivent être fixées sur le dormant de la fenêtre par vissage direct. Les systèmes à clippage, clame ou à griffe sont à proscrire.		
	Tenue au cisaillement des vis de fixation dans le dormant $V_v$	$V_v > (C \times S_f) / N_f$ avec $S_f$ : surface de la fenêtre en $m^2$ $N_f$ : nombre total de vis $C$ coefficient donné ci-dessous	
		$C=1.3 \times 10^4$	$C=1.0 \times 10^4$
Tenue à l'arrachement des chevillages dans le mur $A_c$ (en N)	$A_c > V_v \cdot (1 + 1.5 \cdot b/a)$		

L'emplacement des fixations, quel que soit le mode de pose doit être conforme aux schémas suivants :

- Fenêtre munie d'un système de fermeture à sortie de tringle



Sur chacun des montants du dormant :

- Une fixation au niveau de chaque organe de rotation (paumelle) ;

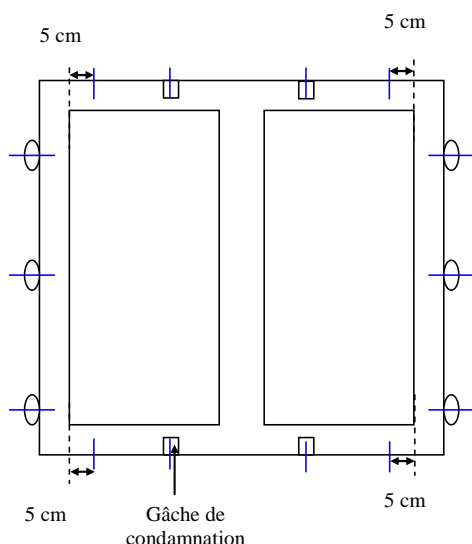
Sur la traverse haute et sur la pièce d'appui :

- 1 fixation entre 5 et 10 cm maximum du bord du fond de feuillure d'un angle du dormant
- 1 fixation de part et d'autre du meneau central et donc des points de condamnation sur le dormant : écartement maximale de 20 cm ;

Des équerres sont ensuite rajoutées, le cas échéant, afin de respecter la distance maximale permise

*Figure 27 : Disposition des fixations principales pour les fenêtres à ouverture à la française à deux vantaux munies d'un système de fermeture à sortie de tringle en face 1 à 4 d'une construction dans la zone 20-50*

- Fenêtre munie d'un système de fermeture à renvoi d'angle



Sur chacun des montants du dormant :

- Une fixation au niveau de chaque organe de rotation (paumelle) ;

Sur la traverse haute et sur la pièce d'appui :

- 1 fixation entre 5 et 10 cm maximum du bord du fond de feuillure d'un angle du dormant
- 1 fixation au voisinage de chaque gâche de condamnation

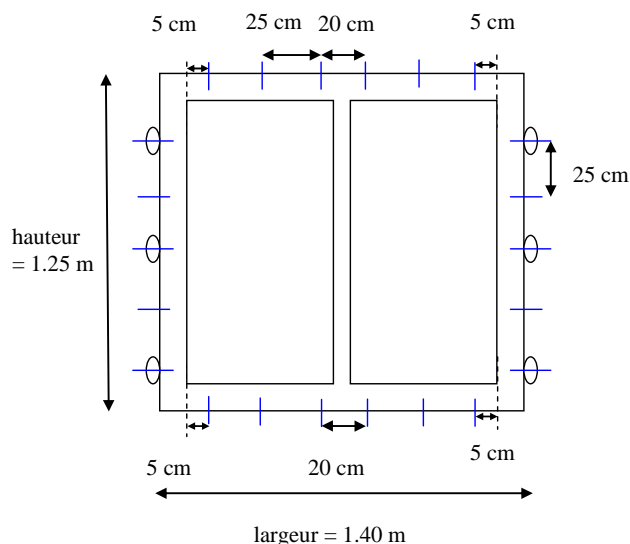
Des équerres sont ensuite rajoutées, le cas échéant, afin de respecter la distance maximale permise

*Figure 28 : Disposition des fixations principales pour les fenêtres à ouverture à la française avec système de fermeture à renvoi d'angle en face 1 à 4 d'une construction dans la zone 20-50*

### Exemple d'application :

Emplacement des fixations d'une fenêtre à ouverture à la française à 2 vantaux de dimensions largeur = 1.40 m, hauteur = 1.25 m munie d'un système de fermeture à sortie de triangle

- En face 1 d'une construction située dans la zone 35-50 :



Sur chacun des montants du dormant :

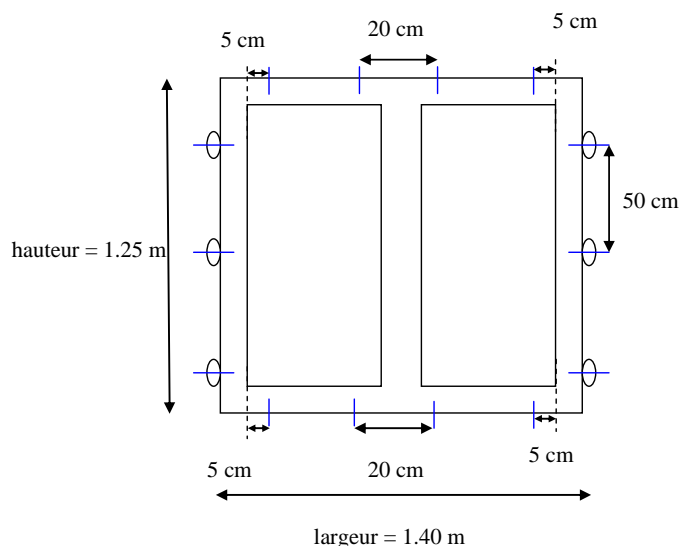
- Une fixation au niveau de chaque organe de rotation (paumelle)
- Une fixation à mi-distance entre deux paumelles consécutives ;

Sur la traverse haute et sur la pièce d'appui :

- 1 fixation entre 5 et 10 cm maximum du bord du fond de feuillure d'un angle du dormant
- 1 fixation de part et d'autre du meneau central et donc des points de condamnation sur le dormant : écartement de 20 cm ;
- 1 fixation entre les deux précédentes ;

Figure 29 : Exemple de disposition des fixations pour une fenêtre à ouverture à la française de dimensions largeur = 1.40 m, hauteur = 1.25 m en face 1 d'une construction dans la zone 35-50

- En face 2 à 4 d'une construction située dans la zone 35-50 mbar ou en face 1 à 4 d'une construction située dans la zone 20-35 mbar :



Une patte au niveau de chaque organe de rotation (paumelle)

Sur la traverse haute et sur la pièce d'appui :

- 1 fixation entre 5 et 10 cm maximum du bord du fond de feuillure d'un angle du dormant
- 1 fixation de part et d'autre du meneau central et donc des points de condamnation sur le dormant : écartement de 20 cm ;

Figure 30 : Exemple de disposition des fixations pour une fenêtre à ouverture à la française de dimensions largeur = 1.40 m, hauteur = 1.25 m en face 2, 3 et 4 d'une construction dans la zone 35-50 ou en face 1 à 4 d'une construction dans la zone 20-35

#### **4. EXEMPLE D'APPLICATION POUR LES BATIMENTS EXISTANTS : PROTECTION OFFERTE PAR UN DES TYPES DE FENETRES LES PLUS COURAMMENT RENCONTRES**

Le chapitre suivant propose un exemple d'application. A partir des éléments pratiques du chapitre 3, le tableau en page suivante dresse la vulnérabilité dans la zone 20-50 mbar d'un des types de fenêtres les plus couramment rencontrés dans l'habitat français.

La fenêtre étudiée est :

- à ouverture à la française à 2 vantaux de dimensions hors tout : 1.40 m de large et de 1.25 m de haut ;
- constituée de panneaux vitrés de type 4/16/4 ;
- munie d'un système de fermeture classique 3 points à crémone avec sortie de tringle ;
- d'un nombre de paumelle égale à 6 (3 pour chaque ouvrant) ;
- d'un châssis en plastique, en aluminium ou en bois ;
- posée selon un des modes de pose suivants : feuillure, tunnel ou applique.

En fonction des différentes configurations que l'on peut rencontrer, la fenêtre est rangée dans une des quatre classes suivantes :

**Cas A** La protection des personnes nécessite de **renforcer le système de fermeture et la fixation de la fenêtre dans le mur** ;

**Cas B** La protection des personnes nécessite soit de **remplacer le système de fermeture et de renforcer la fixation de la fenêtre dans le mur**, soit de **remplacer la fenêtre** ;

**Cas C** La protection des personnes nécessite de **renforcer les panneaux vitrés, de renforcer le système de fermeture et la fixation de la fenêtre dans le mur** ;

**Cas D** La protection des personnes nécessite soit **de renforcer les panneaux vitrés, de remplacer le système de fermeture et de renforcer la fixation de la fenêtre dans le mur** soit de **remplacer la fenêtre** ;

Zone	Nature de l'onde de surpression	Nature du châssis	Type de pose	N° de face			
				Face 1	Face 2	Face 3	Face 4
Zone 35-50	Onde de choc	Bois	Tunnel / feuillure	Cas C		Cas A	
			Applique	Cas D		Cas B	
		PVC Aluminium	Tunnel / feuillure/ applique	Cas D		Cas B	
	Déflagration	Bois	Tunnel / feuillure	Cas C	Cas A		
			Applique	Cas D	Cas B		
		PVC Aluminium	Tunnel / feuillure/ applique	Cas D	Cas B		
Zone 20-35	Onde de choc	Bois	Tunnel / feuillure	Cas C	Cas A		
			Applique	Cas D	Cas B		
		PVC Aluminium	Tunnel / feuillure/ applique	Cas D	Cas B		
	Déflagration	Bois	Tunnel / feuillure	Cas A			
			Applique	Cas B			
		PVC Aluminium	Tunnel / feuillure/ applique	Cas B			

Figure 31 : Tableau de la vulnérabilité dans la zone 20-50 mbar d'une fenêtre à ouverture à la française à deux vantaux de dimensions  $h=1.25\text{ m} \times l=1.40\text{ m}$  munie de panneaux vitrés de type 4/16/4 et d'un système de fermeture 3 points avec sortie de tringle

**Cas A : La protection des personnes nécessite les vérifications ou travaux de renforcement suivants :**

- vérifier si la gâche du système de fermeture est une gâche métallique, et dans le cas contraire (de) la remplacer par une gâche métallique.
- remplacer les vis de fixation de la gâche au dormant par de 2 vis capables de reprendre un effort de cisaillement de 2300 N chacune ;  
D'après le chapitre 3.3.3, l'effort de cisaillement à reprendre par chacune des vis est en effet donné par :  $R = 1.05 \cdot 10^4 \times \frac{S_f}{N_p + 2}$  (en N).

Pour la fenêtre considérée :

- $S_f$  = surface totale de la fenêtre(en m<sup>2</sup>)= 1.40\*1.25 m<sup>2</sup>
- $N_p$  = le nombre de paumelle de la fenêtre = 6
- renforcer le système de fixation de la fenêtre posée en tunnel ou en feuillure selon les recommandations du chapitre 3.4.

**Cas B : La protection des personnes nécessite les travaux de renforcement suivants :**

- remplacer le système de fermeture de la fenêtre par un système de fermeture dit « retardataire d'effraction » respectant les recommandations du chapitre 3.3 ou (de) remplacer la fenêtre.
- renforcer le système de fixation de la fenêtre selon les recommandations du chapitre 3.4.

**Cas C : La protection des personnes nécessite les vérifications ou travaux de renforcement suivants :**

- renforcer les panneaux vitrés. Une solution envisageable est l'application de film de protection anti-fragment selon les recommandations du chapitre 3.2.6.
- vérifier si la gâche du système de fermeture est une gâche métallique, et dans le cas contraire (de) la remplacer par une gâche métallique.
- remplacer les vis de fixation de la gâche au dormant par de 2 vis capables de reprendre un effort de cisaillement de 2300 N chacune ;
- renforcer le système de fixation de la fenêtre posée selon les recommandations du chapitre 3.4.

**Cas D : La protection des personnes nécessite les travaux de renforcement suivants :**

- renforcer les panneaux vitrés. Une solution envisageable est l'application de film de protection anti-fragment selon les recommandations du chapitre 3.2.6.
- remplacer le système de fermeture de la fenêtre par un système de fermeture dit « retardataire d'effraction » respectant les recommandations du chapitre 3.3 ou (de) remplacer la fenêtre.
- renforcer le système de fixation de la fenêtre posée selon les recommandations du chapitre 3.4.

Dans chacun des cas, la réalisation de ces travaux de renforcement par un professionnel est fortement conseillée.





## **5. REFERENCES**

- [1]** Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. Guide méthodologique « Plan de Prévention des Risques Technologiques ». 2005 version 1, 2007 version 2.
- [2]** CSTB. Complément technique relatif à l'effet de surpression. Recommandations et précautions en vue de réduire les risques. Référence 26005165. Mars 2008 version 2.
- [3]** INERIS, CETE Normandie-Centre, et al. Cahier applicatif du complément technique de la vulnérabilité du bâti aux effets de surpression. Décembre 2008.
- [4]** INERIS, Rapport d'étude, Etude de la vulnérabilité des fenêtres dans la zone de surpression d'intensité 20 à 50 mbar dans le cadre des PPRTs (Plans de Prévention des Risques Technologiques). Juillet 2009.



## 6. LISTES DES ANNEXES

<b>Repère</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
Annexe 1	Orientation des façades d'un bâtiment par rapport au centre d'explosion : Attribution des numéros de face	4



**ANNEXE 1 :**

**ORIENTATION DES FAÇADES D'UN BATIMENT PAR RAPPORT AU  
CENTRE D'EXPLOSION : ATTRIBUTION DES NUMEROS DE FACES**



Considérons un bâtiment situé à l'intérieur de la zone de surpression d'intensité 20-50 mbar générée par une explosion. Suivant leur orientation par rapport au centre de cette explosion, les façades du bâtiment sont plus ou moins exposées aux effets de l'explosion. Afin de prendre en compte cet aspect, les façades des bâtiments sont repérées par un numéro : face 1 (la plus exposée), face 2, face 3 ou face 4 (la moins exposée).

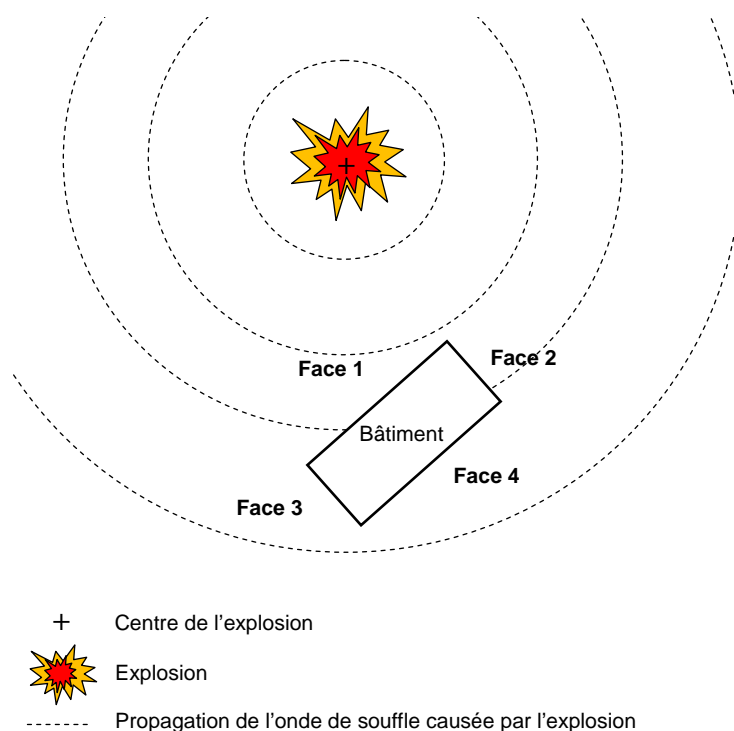


Figure 32 : Orientation des façades du bâtiment par rapport au centre de l'explosion

L'attribution des numéros se fait selon une démarche en 3 étapes rappelés ci-dessous et tirées du « *cahier applicatif du complément technique de la vulnérabilité du bâti aux effets de surpression* » [3].

- **Etape 1 : Relever toutes les faces du bâtiment**
- **Etape 2 : Pour chaque centre d'explosion retenu, déterminer l'angle de chaque face par rapport au centre d'explosion :**
  - o Calculer la valeur des 2 angles formés entre:
    - la normale de la face
    - et le segment [centre du phénomène retenu-extrémité de la face] (en pratique, dans la majorité des cas il y a une différence seulement de quelques degrés).
  - o Retenir l'angle le plus défavorable (le plus faible en valeur absolu)

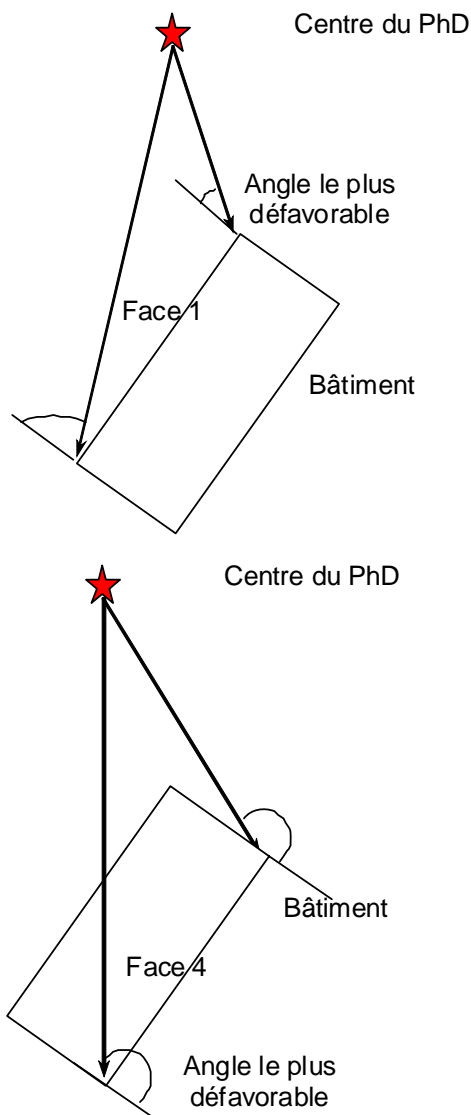
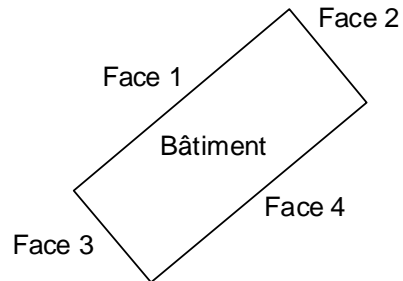


Figure 33 : Angles retenus

**Etape 3 : Affecter aux faces un numéro de face selon la règle suivante :**

- Face 1 angle compris entre 0 et 45 ;
- Face 2 angle compris entre 45 et 90 ;
- Face 3 angle compris entre 90 et 135 ;
- Face 4 angle compris entre 135 et 180.





*Figure 34. Affectation des numéros de faces*

Lorsque l'étude doit prendre en compte deux centres de phénomènes, deux numéros de face peuvent alors être affectés à une même face. Le numéro de face le plus faible doit être retenu (si une face est 1 et 3, le numéro de face 1 est retenu).