

Fenêtres et portes extérieures bois

Conception de la liaison ouvrant-dormant

par **Marcel DENANCÉ**

Ingénieur ESB, Expert Menuiserie - Panneaux au Centre technique du bois
et de l'ameublement

1. Perméabilité à l'air	C 3 611 - 2
1.1 Généralités	— 2
1.2 État de l'art des fenêtres avec profilés d'étanchéité	— 2
1.3 Exigences de base pour un profilé d'étanchéité	— 3
1.4 Continuité de la barrière	— 4
2. Étanchéité à l'eau	— 5
2.1 Dispositifs d'arrêt d'eau extérieur	— 5
2.2 Espace intermédiaire	— 5
2.3 Barrière de contrôle de la perméabilité à l'air	— 6
2.4 Cas particuliers	— 7
3. Résistance au vent	— 8
3.1 Rigidité	— 8
3.1.1 Méthodes simplifiées (charges simples)	— 8
3.1.2 Charges complexes	— 9
3.2 Conservation des performances	— 10
3.3 Sécurité	— 10
4. Résistance mécanique	— 12

Si, lorsqu'elle est d'un seul tenant, faire une paroi étanche paraît simple, réaliser un ouvrage qui doit s'ouvrir et se fermer tout en étant étanche apparaît, de manière indéniable, plus complexe.

D'ailleurs, pendant des siècles, les fenêtres et les portes extérieures n'étaient pas étanches à l'eau et contrôlaient l'entrée de manière grossière ; les meilleures réalisations étaient bien loin d'un niveau d'étanchéité qui paraît évident aujourd'hui.

Les premières approches pour rechercher une meilleure étanchéité ont été fondées sur le sens commun et sur l'expérience d'objet ou de matériel étanches : interposer entre le milieu à protéger et le milieu hostile une garniture d'étanchéité dont la réaction assure par elle-même l'étanchéité, c'est la technique du sous-marin ou du bocal.

Sa transposition aux fenêtres a été un échec du fait de :

— la discontinuité de la barrière d'étanchéité à cause de la complexité des profils ;

— la réaction nécessaire de la garniture pour assurer l'étanchéité qui est incompatible avec un effort de manœuvre acceptable ;

— la rigidité des parties mobiles (vantaux) bien en deçà du nécessaire pour reprendre la réaction de la garniture d'étanchéité.

Ce n'est qu'au début des années 1970 que le secteur a élaboré, de manière empirique (par les essais), les principes d'étanchéité d'une liaison ouvrant-dormant et la finalisation n'est intervenue qu'au début des années 1980 par la quantification plus précise des limites de chacun des paramètres.

Compte tenu du nombre de combinaisons dimensionnelles des profilés en bois et compte tenu du rôle des finitions sur le bois et de leurs adjuvants, on peut d'ailleurs considérer que cette voie n'est pas épuisée.

Pour atteindre un niveau de performances donné, la conception de la liaison ouvrant-dormant doit suivre certaines règles bien précises plus ou moins propres à chaque fonction.

La rubrique « Fenêtres et portes extérieures » se compose de plusieurs articles :

- C 3 610 - Fonctions de base et terminologie ;
- C 3 611 - Conception de la liaison ouvrant-dormant ;
- C 3 612 - Techniques d'assemblage ;
- C 3 613 dans lequel sont traités d'autres aspects (remplissage, profilés d'étanchéité, mise en œuvre, thermique, bois, stabilité).

1. Perméabilité à l'air

1.1 Généralités

La maîtrise de la perméabilité à l'air repose sur la maîtrise des jeux de la liaison entre ouvrant et dormant. Ainsi qu'il a été explicité dans le paragraphe 1 de l'article précédent [C 3 610], au droit de la liaison ouvrant-dormant, subsiste une perméabilité résiduelle qui doit être aussi faible que possible.

En fonction de la pression, le débit d'air (m^3/h) est donné par :

$$Q_{\Delta p} = K \cdot \Delta p^n$$

avec K constante de débit qui caractérise la fenêtre (en fonction de sa taille et des caractéristiques de son calfeutrement ouvrant-dormant),

Δp pression différentielle (en Pa),

n exposant de la loi de débit : pour une fenêtre correctement conçue, il vaut 2/3 ; une valeur supérieure traduit une conception défailante du couple quincaillerie-profilé d'étanchéité.

Pour bien saisir la difficulté pratique de cette maîtrise, il convient de savoir que dans la plage de jeu 0,1 à 1 mm, la perméabilité à l'air varie sensiblement comme le carré de la variation du jeu minimal. Ainsi, si le jeu double (par exemple de 0,2 à 0,4 mm), la perméabilité à l'air, elle, quadruple, d'où la difficulté de connaître précisément cette perméabilité, compte tenu de l'incertitude de la valeur des tolérances effectives de fabrication.

Pour les fenêtres à frappe, une réalisation très soignée ne faisant pas appel à des profilés d'étanchéité (usinage précis, bois de fil bien droit et bien sec, quincaillerie réglable tant pour le verrouillage que pour la rotation) permet d'atteindre, au mieux, une classe A*1 [perméabilité de $50 m^3/(h \cdot m^2)$ en proximité de plafond de cette classe (*)].

(*) Pour les classes se reporter au paragraphe 1.2.1 de l'article [C 3 610].

Par ailleurs, le FD P 20-201 (DTU 36.1/37.1) conduit à exiger, pour des fenêtres destinées à des locaux chauffés ou climatisés (en zone tropicale), une perméabilité de classe A*2 au minimum.

1.2 État de l'art des fenêtres avec profilés d'étanchéité

La généralisation des profilés d'étanchéité dans la liaison ouvrant-dormant date de la deuxième moitié des années 1970 (à la

suite de la parution de la première réglementation thermique consécutivement au premier choc pétrolier).

Dans le cadre de la marque CTB-Fenêtres qui a précédé l'actuelle marque NF Nouvelle fenêtre bois, une exploitation statistique des résultats de perméabilité à l'air a pu être faite sur un échantillonnage représentatif de la production de fenêtres bois ouvrant à la française (*).

(*) On peut estimer que tous les ouvrants à frappe en bois doivent avoir des résultats similaires. Par contre, la perméabilité des châssis coulissants (horizontalement ou verticalement) se situe probablement à un niveau plus élevé.

L'analyse des résultats a porté sur la perméabilité linéique à l'air à 100 Pa (pression de référence pour la définition des classes) et 500 Pa (pression maximale dans le cadre de la norme française alors appliquée). Comme le classement selon le mètre linéaire de joint ouvrant-dormant nous paraît le plus pertinent, nous ne présentons que ces résultats. L'échantillon est de 550 fenêtres provenant de 31 fabricants. Le rapport périmètre du joint sur aire d'ouvrant correspondant se situe à 3,8 (*).

(*) La valeur moyenne du marché se situe plutôt vers 4,2 ; la valeur retenue dans la norme NF EN 12207 est de 4.

Les résultats sont consignés dans le tableau 1.

Le coefficient de variation est le coefficient de variation résultant intra-fabricant. La distribution de la perméabilité à l'air ne suit pas une loi normale mais une loi de type log-normale.

Il apparaît que :

- plus de la moitié des fenêtres appartiennent à la classe 4 de perméabilité ;
- la dispersion est très forte [coefficient de variation (écart-type/moyenne) de plus de 65 %] (*) ;
- pour la perméabilité à 100 Pa, environ 80 % des fenêtres appartiennent à la classe 4.

Nota : (*) La forte dispersion relative constatée ici est du même ordre pour des fenêtres traditionnelles sans profilés d'étanchéité. Si cette dispersion relative avait été faible (10 %), il aurait été concevable d'assurer le renouvellement d'air par la liaison ouvrant-dormant. Ce n'est pas le cas.

Tableau 1 – Résultats de l'analyse de perméabilité à l'air de fenêtres bois ouvrant à la française

Pression..... (Pa)	100	500
Perméabilité linéique moyenne [$m^3/(h \cdot m)$]	0,48	1,74
Coefficient de variation..... (%)	65	79
Plafond classe 4..... [$m^3/(h \cdot m)$]	0,75	2,19

Pour le **contrôle du renouvellement d'air**, l'option la plus courante est donc la suivante :

- fenêtre à faible perméabilité à l'air ;
- entrée d'air autoréglable.

Faire un orifice dans une fenêtre pour assurer le renouvellement d'air heurte le sens commun de nombre de menuisiers. Pourtant cela peut se justifier par les calculs faits dans l'exemple qui suit, sachant que :

- la perméabilité moyenne (à 100 Pa) d'une fenêtre sans profilé d'étanchéité est de $90 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$;
- la perméabilité moyenne (à 100 Pa) d'une fenêtre à frappe est de $1,8 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$.

Exemple : soit une fenêtre de 2 m^2 d'aire assurant l'éclairage et la ventilation d'une pièce, les débits correspondant aux perméabilités ci-dessus, toujours à 100 Pa, sont égaux respectivement à 180 et $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$. La pression moyenne assurant la ventilation naturelle des logements se situe vers 7 Pa. Les débits réels correspondants sont donnés par (cf. § 1.2.1 [C 3 610]) :

$$Q_{7 \text{ Pa}} = Q_{100 \text{ Pa}} \times \left(\frac{7}{100} \right)^{2/3} \approx \frac{1}{6} Q_{100 \text{ Pa}}$$

ce qui donne, respectivement pour une fenêtre sans profilé et une fenêtre à frappe, **30 et $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$** .

Ainsi, si le volume de la pièce est de 30 m^3 , un renouvellement d'air par heure est assuré par la fenêtre sans profilé d'étanchéité. Cependant si on prend en compte la distribution de perméabilité des fenêtres, le débit caractéristique se calcule ainsi :

$$Q_k = \bar{Q} \left(1 + k \frac{C_v}{100} \right)$$

avec \bar{Q} (m^3/h) débit moyen,
 k coefficient lié à la distribution statistique : $k = +2$ ou -1 ,
 C_v (%) coefficient de variation : $C_v = 100 \frac{\sigma}{\bar{Q}}$ avec σ écart-type ; $C_v = 65 \%$ pour $p = 100 \text{ Pa}$ (cf. tableau 1), et admis comme tel pour $p = 7 \text{ Pa}$.

Dans le cas des fenêtres situées à 2 écarts-types et plus au-dessus de la moyenne (plus de 5 % des cas dans la présente distribution), le débit d'air à 7 Pa se situe à environ $69 \text{ m}^3/\text{h}$ [$= 30 \times (1 + 2 \times 0,65)$].

Par contre, à l'autre extrémité de la distribution dans le cas des fenêtres situées à 1 écart-type en dessous de la moyenne (un peu moins de 10 % des fenêtres), le débit est égal à $10,5 \text{ m}^3/\text{h}$ [$= 30 \times (1 - 1 \times 0,65)$] et il y a alors sous-ventilation.

Le débit d'air passant par une gamme de fenêtres **sans profilé** variera donc de **10,5 à $69 \text{ m}^3/\text{h}$** .

S'il s'agit des fenêtres **avec profilé** d'étanchéité, la gamme de débits d'air sera, pour la même plage de dispersion, comprise entre **0,21 et $1,38 \text{ m}^3/\text{h}$** .

Si l'on **associe la bouche d'entrée d'air autoréglable**, le débit d'air entrant dans le logement sera compris entre **30,2 et $31,4 \text{ m}^3/\text{h}$** (à comparer à la plage $10,5$ à $69 \text{ m}^3/\text{h}$ pour une pièce équipée d'une fenêtre sans profilé d'étanchéité) ; il y a donc un bien meilleur contrôle de la ventilation du logement (dans le rapport de l'amélioration du contrôle de la perméabilité à l'air des fenêtres soit 50 fois).

Conclusion : le niveau de performance de perméabilité à l'air requis dès la classe 2 (voir [C 3 610], tableau 2) ne peut être atteint que par la mise en œuvre, dans les profils de la liaison ouvrant-dormant, de profilés d'étanchéité, et le renouvellement d'air par une bouche d'entrée d'air autoréglable.

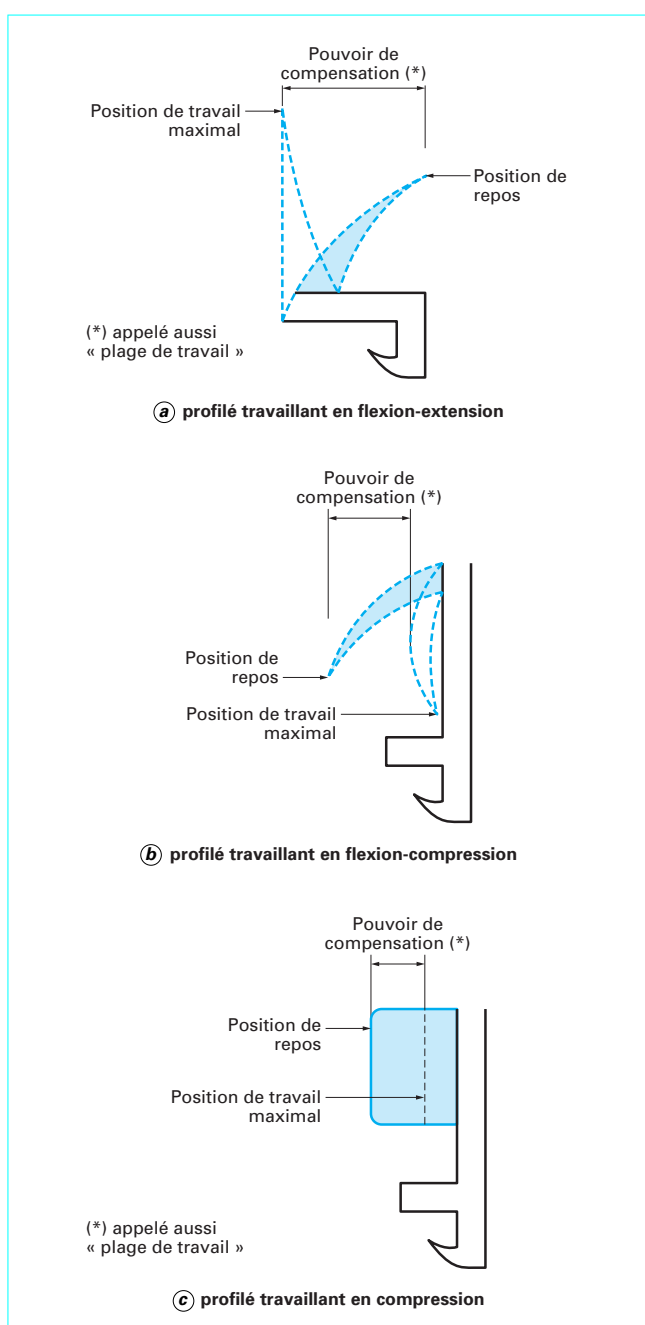


Figure 1 – Pouvoir de compensation de types de profilés courants

1.3 Exigences de base pour un profilé d'étanchéité

Ce dernier doit assurer un contact permanent avec les profilés bois de tout le linéaire de la liaison. Cette exigence débouche sur trois caractéristiques de base :

- pouvoir de compensation ou plage de travail (figure 1) ;
- réaction linéique ;
- stabilité linéaire.

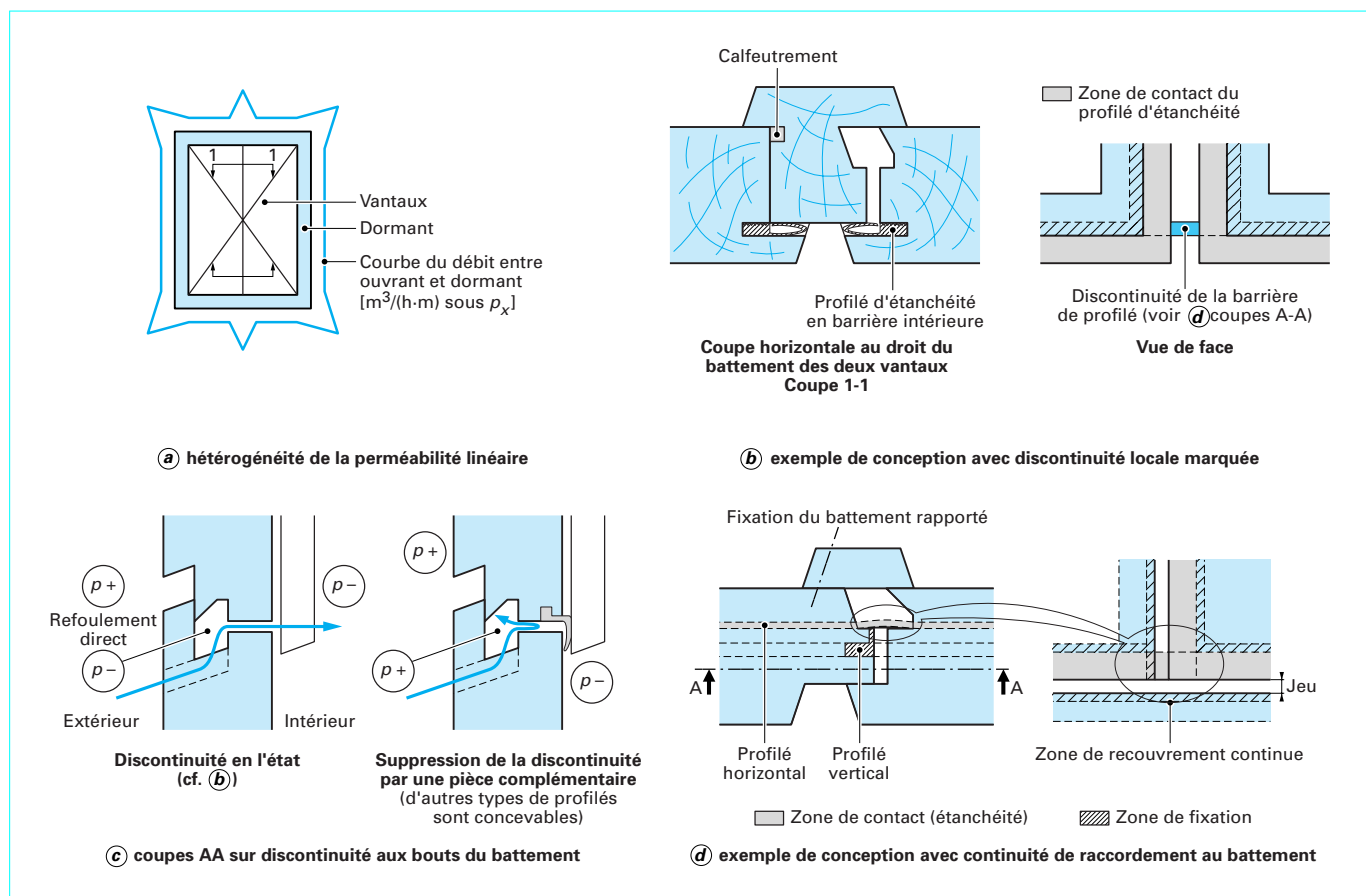


Figure 2 – Continuité de la barrière

Le **pouvoir de compensation** (en mm) a pour vocation à compenser :

- le jeu entre pièces ;
- le déplacement relatif des pièces de la liaison sous l'action du vent (selon la rigidité du lien par les quincailleries ou selon la rigidité respective des profilés en bois de la liaison) ;
- le retrait et le déplacement liés à une éventuelle déformation des pièces de bois de la liaison dans leur longueur (charge hygrothermique).

La valeur recommandée typique est de 3 mm (minimum 2,5 mm pour la marque NF *Nouvelle fenêtre bois*, mais, sauf quincaillerie de verrouillage adaptée, cette valeur est un peu faible et risque alors de conduire à une variation de perméabilité à l'air dépassant les limites permises lors d'un contrôle suivant un essai mécanique). Idéalement, cette valeur doit être conservée aussi longtemps que possible dans le temps (*c'est la vocation de l'évaluation de la reprise élastique après épreuves de vieillissement*).

La **réaction linéique** (en N/m) permet d'assurer un contact avec une force telle que le passage d'air entre profilé d'étanchéité et pièce de bois soit le plus réduit possible. Cette réaction, en relation avec la longueur de profilés dans les liaisons ouvrant-dormant, doit être compatible avec les efforts admissibles de manœuvre des vantaux.

La **stabilité linéaire** vise à ce que tout le linéaire de liaison reste calfeutré dans le temps (pas de discontinuité dans le périmètre de profilé suite à un raccourcissement lié, par exemple, à une pose sous contrainte).

Nota : ces aspects sont développés dans l'article [C 3 613] (paragraphe *Profilés d'étanchéité*).

1.4 Continuité de la barrière

Si elle est importante pour le niveau de perméabilité, elle est surtout **déterminante pour l'étanchéité à l'eau**. En effet, même très limitée, une discontinuité peut ne pas modifier un classement en perméabilité à l'air mais mettre en cause la performance en étanchéité à l'eau par infiltration de refoulement au droit de cette discontinuité notamment en partie basse (§ 2.3).

Dans la pratique, la perméabilité à l'air n'est pas constante sur tout le périmètre des vantaux, la figure 2a illustre le phénomène sur une fenêtre à deux vantaux : les points posant problème sont les angles (problèmes de recouvrement pour les profilés à comprimer) et surtout le battement. Les figures 2b et c traitent le cas de la discontinuité du battement central pour les profilés disposés en barrière intérieure.

La figure 2d montre comment un profilé en barrière intermédiaire et présentant une partie active décalée par rapport à sa fixation peut assurer la continuité de la barrière à l'air en barrière intermédiaire.

2. Étanchéité à l'eau

Au contraire de la barrière à l'air, qui ne fait que limiter le passage d'air au travers de la liaison ouvrant-dormant, la barrière à l'eau doit être étanche jusqu'à une pression donnée (appelée p_{\max} dans la norme d'essai NF EN 1027).

L'obtention de l'étanchéité à l'eau de la liaison ouvrant-dormant suppose la mise en œuvre des trois éléments suivants :

- barrière à l'eau dans le plan extérieur du vantail ;
- espace intermédiaire pour canaliser et évacuer l'eau s'infiltrant dans les profils ;
- barrière contrôlant la perméabilité à l'air à l'arrière de cet espace intermédiaire.

2.1 Dispositifs d'arrêt d'eau extérieur

■ Traverse basse du vantail (ou du châssis fixe)

Elle comporte, de l'extérieur vers l'intérieur, un larmier et une rainure. Selon que la traverse basse d'ouvrant est associée ou non à un recouvrement par la pièce d'appui ou le seuil, les dimensions de ce dispositif varient (figure 3).

- Cas de recouvrement par la pièce d'appui ou le seuil :

- si le dormant recouvre la traverse basse du vantail (sur au moins 5 mm) et si le jeu de recouvrement est inférieur à 1,5 mm (y compris sous la pression du vent), une rainure de 10 mm arrête l'eau (figure 3a) ;

- si le jeu de recouvrement dépasse 1,5 mm, le recouvrement par le dormant ne joue plus aucun rôle d'arrêt d'eau. La rainure doit alors être redimensionnée ainsi (figure 3b) :

- larmier de 1,5 mm ou moins : rainure de 15 mm de large,
- larmier de plus de 1,5 mm : rainure de 20 mm.

- À défaut de recouvrement par la pièce d'appui ou le seuil (figure 3c), un profil rejet d'eau doit être rapporté sur la face extérieure de la traverse basse d'ouvrant (ce qui ne peut être fait au droit des recouvrements du dormant sur les montants d'ouvrants et laisse donc un point faible au droit de zones).

■ Autres côtés

Un recouvrement d'au moins 5 mm avec un jeu inférieur à 1,5 mm avec la face extérieure du vantail assure la protection (figure 4a).

Si la méthode d'arrosage A (cf. [C 3 610] § 1.2.2) est prévue (fenêtre sans protection par le linteau), il est recommandé de prévoir un listel de traverse dormante haute avec un larmier (figure 4b).

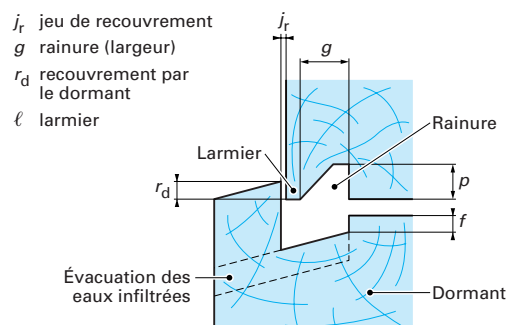
2.2 Espace intermédiaire

■ Partie basse

On a les dispositifs suivants :

- Pour le **vantail** ou le châssis fixe : la rainure.
- Pour le **dormant** : une rainure de récupération évacuée vers l'extérieur par des orifices de dimensions suffisantes (figure 5) :
 - soit des orifices de surface minimale réglementaire : 50 mm² par orifice et dont la plus petite dimension est de 5 mm au moins ;
 - soit des orifices plus grands permettant une évacuation plus efficace car le freinage induit par les phénomènes de capillarité est moindre. On peut ainsi recommander des orifices de 8 mm x 30 mm.

Le nombre minimal d'orifices est de 1 par bloc de montants d'ouvrants. Pour des vantaux pivotant autour d'un axe horizontal (ferrage sur rive basse ou haute ou ferrage entre rives), le nombre minimal d'orifices est de 2 jusqu'à un mètre et, au-delà, il faut prévoir un orifice supplémentaire par tranche de 0,5 m.



Valeur (en mm) :

$$j_r < 1,5^* \text{ (y compris sous pression du vent)}$$

$$g \geq 10$$

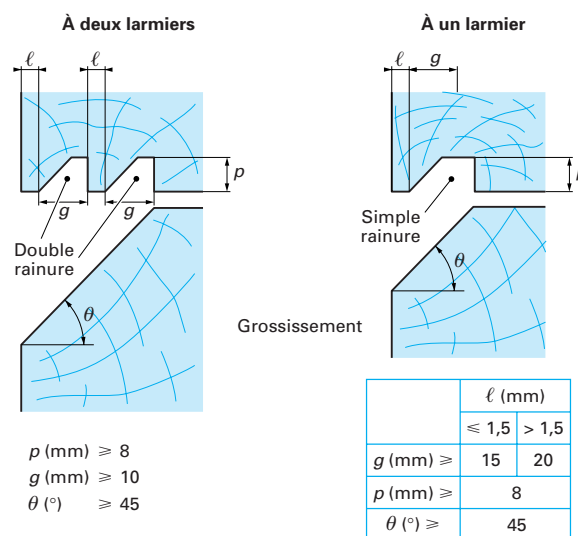
$$r_d \geq 5$$

$$p \geq 8$$

$$f \geq 5$$

(*) valeur nominale ≈ 0 à 0,5

(a) système avec listel



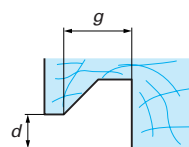
$$p \text{ (mm)} \geq 8$$

$$g \text{ (mm)} \geq 10$$

$$\theta \text{ (}^\circ\text{)} \geq 45$$

	ℓ (mm)	
	$\leq 1,5$	$> 1,5$
g (mm) \geq	15	20
p (mm) \geq	8	
θ (°) \geq	45	

(b) systèmes sans listel



Sans recouvrement et larmier décalé

$$d < \frac{1,5 g^2}{100} \text{ (d, g en mm)}$$

(c) système sans listel avec larmier décalé

Figure 3 – Arrêt d'eau en traverse basse (coupes verticales)

La rainure doit avoir des dimensions minimales :

- largeur correspondant au cumul de la largeur du larmier et de la rainure associée ;
- profondeur d'au moins 5 mm (pour les fenêtres bois, le profilé d'étanchéité de la liaison ouvrant-dormant ne peut procurer cette garde à eau).

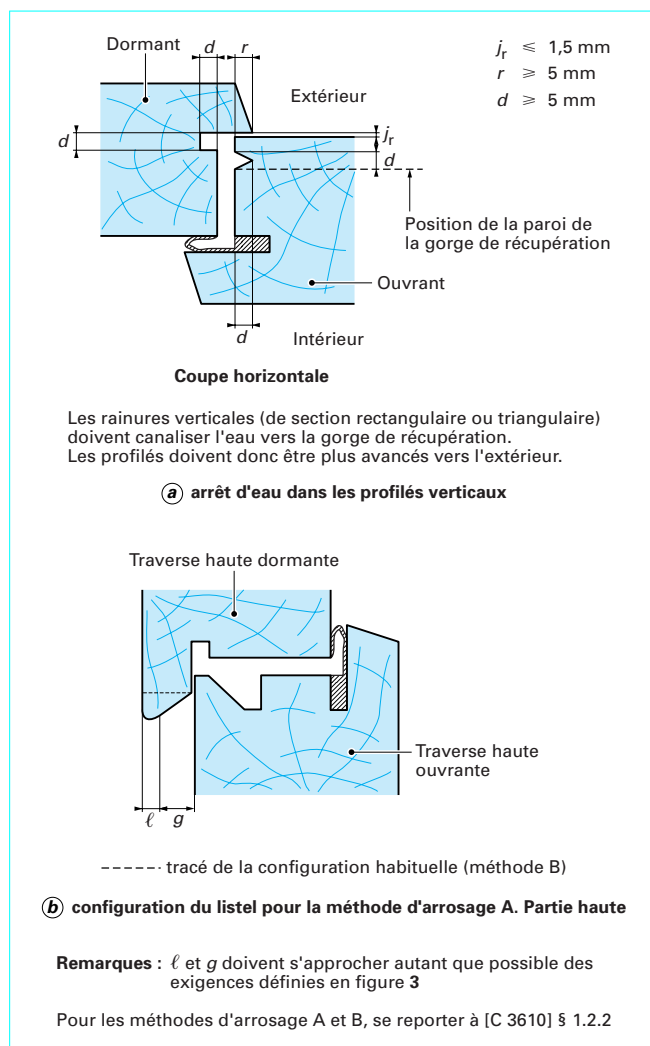


Figure 4 – Drainage vertical des profils bois

Montants

Les éléments suivants sont à prévoir (voir figure 4) :

- Côté **dormant**, une rainure de largeur identique à celle de la pièce d'appui ou du seuil (sinon aussi proche que possible) et ayant une profondeur de 5 mm au moins. Une section de gorge de forme trapézoïdale ou rectangulaire (plutôt qu'arrondie) est favorable.
- Côté **vantail** (ou châssis fixe), une rainure similaire à celle de la traverse basse est recommandée. Sinon, il faut prévoir au moins une rainure de 5 mm × 5 mm (rectangulaire ou triangulaire) disposée au droit de la rainure du dormant.

2.3 Barrière de contrôle de la perméabilité à l'air

Dans les fenêtres actuelles, il s'agit d'un profilé d'étanchéité à propriétés élastiques. Dans les fenêtres traditionnelles, il s'agissait de la zone où devait s'établir le contact bois sur bois entre le vantail (ou un châssis fixe) et le dormant.

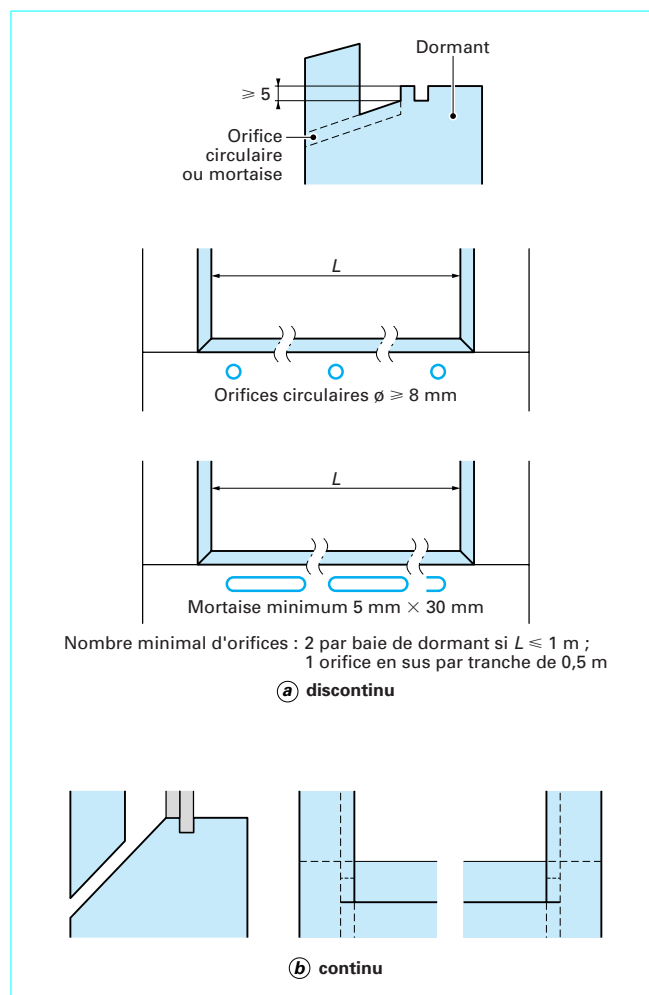


Figure 5 – Récupération et drainage feuillure à verre

Les profils de cette barrière d'étanchéité peuvent être montés soit sur le dormant soit sur l'ouvrant.

La barrière doit être continue, ce qui, compte tenu de l'usinage linéaire des profils (moulurage pour le bois ou extrusion pour les seuils en aluminium ou en PVC), implique que les profils d'étanchéité doivent être dans un même plan. En effet, s'il y a une discontinuité, le passage d'air est localement libre et se fait à la vitesse déterminée par la pression différentielle, entraînant ainsi des passages d'eau (refoulement).

Aux frottements près, la vitesse de fuite de l'air dans les discontinuités de la barrière à l'air est donnée par la formule suivante :

$$v \approx 4,60 (p)^{1/2}$$

avec p (Pa) différence de pression de part et d'autre du profilé d'étanchéité,
 v (km/h) vitesse de l'air.

La barrière doit être disposée dans l'espace déterminé par le nu intérieur du dormant et la rainure de drainage de la pièce d'appui ou du seuil (voir sur la figure 6 la position du joint).

Remarque : si elle est disposée dans la zone d'arrêt d'eau, voire en barrière extérieure, des pénétrations d'eau se produisent au

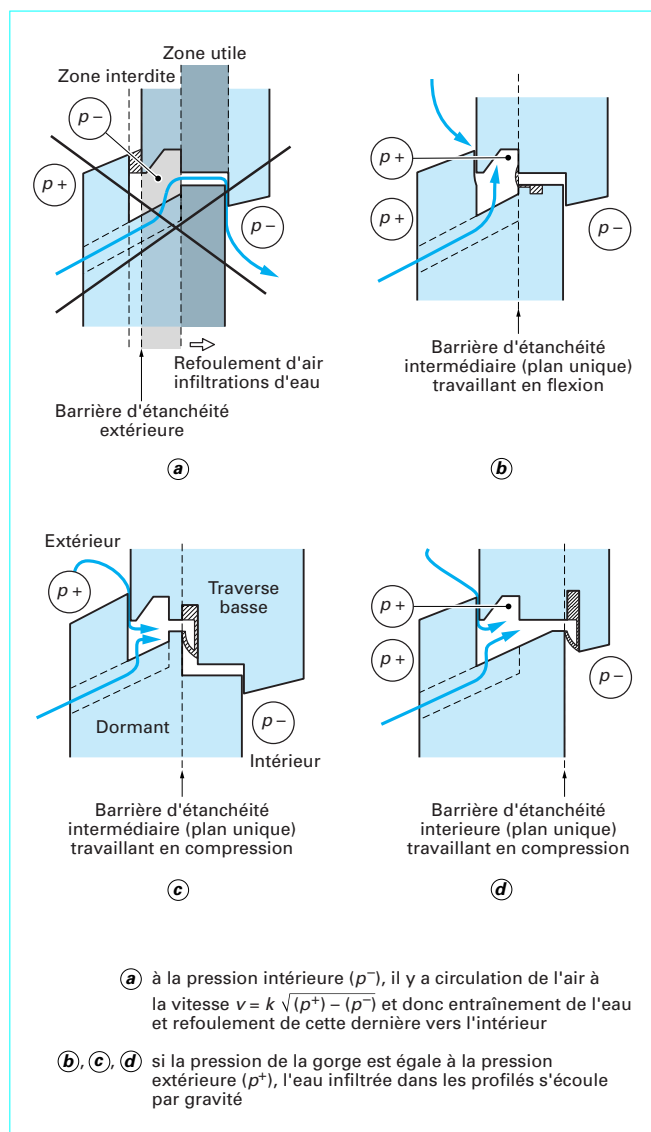


Figure 6 – Principe d'étanchéité des ouvrants à frappe (coupe verticale sur la partie inférieure)

droit du profilé d'étanchéité. Elles ne peuvent alors être évacuées. En effet, indépendamment de leur continuité, jamais parfaite, les profilés exercent une réaction linéique incapable de s'opposer à la pénétration de l'eau. En effet, le niveau requis pour faire obstacle au cheminement de l'eau se situe vers 200 à 300 N/m pour une surface bien lisse (de type vitrage) alors que la réaction linéique maximale admissible se situe vers 100 N/m pour une liaison ouvrant-dormant.

2.4 Cas particuliers

■ Présence d'un profilé d'étanchéité extérieur

En cas de fenêtre avec un profilé d'étanchéité extérieur et un profilé d'étanchéité intermédiaire ou intérieur, il est impératif que

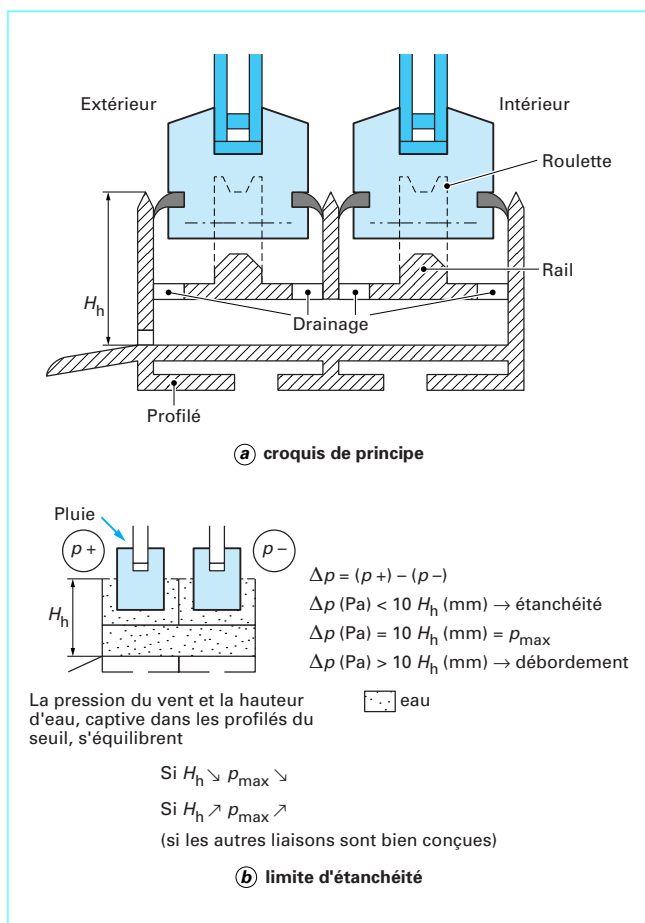


Figure 7 – Principe d'étanchéité des châssis coulissant horizontalement

la barrière formée par le profilé d'étanchéité extérieur soit discontinue afin d'assurer que la pression régnant dans les profilés, entre ce dernier et la barrière située vers l'intérieur des profilés de la menuiserie, soit la même qu'à l'extérieur. C'est la condition *sine qua non* pour l'écoulement de l'eau s'infiltrant entre les profilés, par gravité.

■ Châssis coulissant horizontalement (figure 7)

Compte tenu de la difficulté d'empêcher les infiltrations dans la gorge intérieure, celle-ci est évacuée, il s'ensuit que la limite d'étanchéité de ces menuiseries est le plus souvent déterminée par la profondeur de la gorge intérieure (on multiplie par 10 cette dernière, exprimée en mm, et on obtient la pression limite d'étanchéité exprimée en pascals).

■ Châssis à pivots

La position intermédiaire des pivots introduit une discontinuité des profilés et de la garniture d'étanchéité de la liaison ouvrant-dormant. Il s'ensuit des performances potentiellement limitées (performance escomptable : E*2 pour le châssis pivotant vertical et E*7 pour le châssis basculant).

Nota : pour la classification, se reporter au paragraphe 1.2.2 de l'article [C 3 610].

3. Résistance au vent

La performance comporte trois critères (cf. [C 3 610], § 1.3.2.1) :

- la rigidité sous une pression $+p_1$ et $-p_1$;
- la conservation des performances initiales après sollicitation sous une pression de déformation $+p_1$ et $-p_1$ et après sollicitation de 50 cycles à $-p_2$ et $+p_2$;
- la sécurité après sollicitation sous pression de rafale conventionnelle $+p_3$ et $-p_3$.

3.1 Rigidité

Il s'agit de respecter une flèche relative (néanmoins, pour des cahiers des charges particuliers, une limitation à la déformation absolue peut être imposée), c'est-à-dire soit 1/150 de la portée de la liaison (cas général), soit 1/200, soit 1/300 de la portée de la liaison (dormants participant à la sécurité contre la chute des personnes) (voir FDP 20-201).

La vérification de la conformité de la rigidité peut être faite par essais (NF EN 12211). On peut aussi prévoir la section des éléments constituant une liaison par le calcul. Le calcul de la section vise, *in fine*, à déterminer le **moment d'inertie** à prévoir pour les pièces.

3.1.1 Méthodes simplifiées (charges simples)

■ Cas général

On considère la liaison comme une poutre simple chargée soit de manière uniformément répartie [liaison simple sans nœuds (*)] soit de façon concentrée au milieu de la portée [cas légèrement défavorable mais permettant une approche simplifiée en cas de liaison à nœud(s)]. Les aires de charge affectées à la pièce à calculer se déterminent selon la figure 8a (intersection de droites parallèles aux barres à calculer avec les bissectrices des angles des nœuds concernés).

(*) **Nœud** : assemblage à 90° (en général) avec la liaison à calculer.

On fait appel à la formule suivante :

$$I = r \ell L^3 \frac{p_1}{f E}$$

- avec I moment d'inertie de l'aire de la section de la pièce ou de l'ensemble de profilés constituant la liaison sous charge (ou moment quadratique axial selon la terminologie de l'Afnor),
- r coefficient de charge valant :
5/384 pour une charge répartie,
1/48 pour une charge concentrée à mi-portée,
(voir plus loin),
- ℓ (m) largeur de l'aire sous pression chargeant la pièce à calculer,
- L (m) portée de la pièce à calculer,
- f (m) flèche absolue ; mais le plus souvent c'est le rapport L/f (sans dimension), l'inverse de la flèche relative, qui est imposé, valant en France soit 150 (cas courant), soit 300 (pour les menuiseries participant à la sécurité contre la chute des personnes),
- p_1 (Pa) pression de vent pour la pression conventionnelle de déformation, donnée par le FDP 20-201 (cf. [C 3 610], tableau 9),
- E (Pa) module d'élasticité du matériau constituant la pièce à calculer (*).

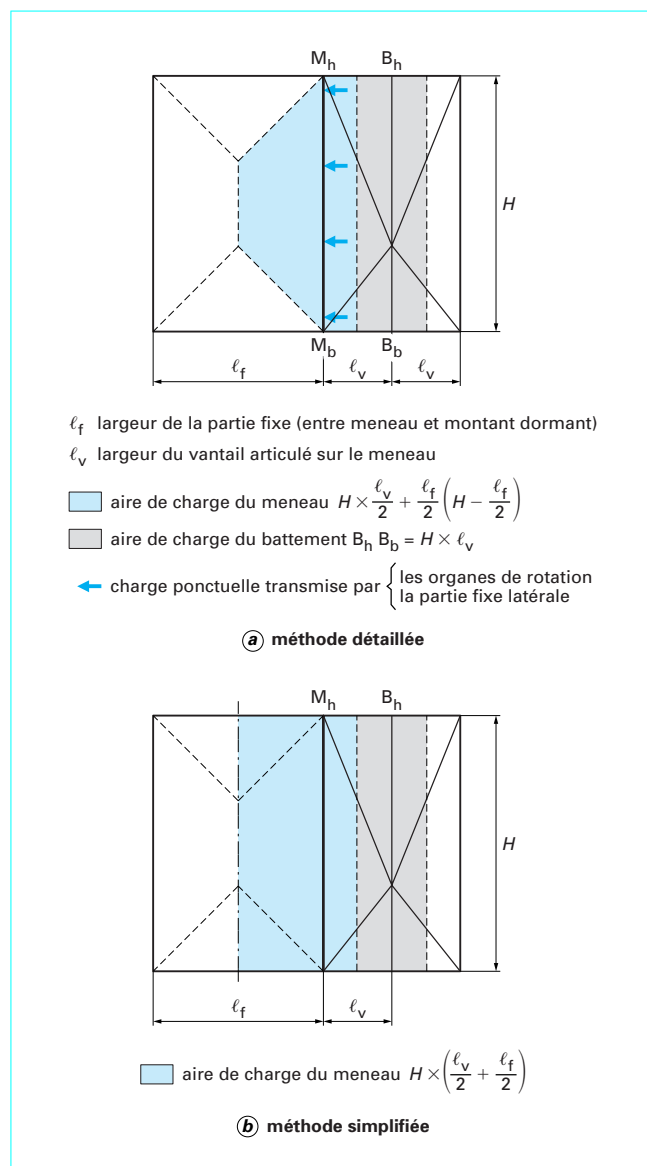


Figure 8 – Définition des aires de charge des liaisons de menuiserie. Cas d'un meneau et d'un battement

(*) Notons, à titre d'information, le module de matériaux susceptibles d'être utilisés dans la confection de raidisseur, en cas de liaison de grande portée :

- aluminium : 70 GPa ;
- acier : 210 GPa ;
- bois : 7,9 à 18,6 GPa (cf. tableau 2).

Pour une **première approximation**, éventuellement **légèrement sous-évaluée**, on prend l'hypothèse de la charge répartie uniformément :

$$r = 5/384$$

Pour une **approximation surévaluée**, on prend l'hypothèse de la charge totale concentrée au milieu :

$$r = 1/48$$

Pour une évaluation plus fine s'approchant mieux de la vérité, on décompose la pièce chargée à calculer en tronçons et on calcule la charge de chacun de ces tronçons et la flèche partielle induite par la charge ponctuelle résultant de la charge répartie de ce tronçon. On calcule également la flèche partielle induite par chaque barre assemblée sur la pièce à calculer. Nous ne développerons toutefois pas cette méthode ici.

Donnons un **exemple** de la méthode simplifiée à partir de la figure **8b**.

La pièce la plus sollicitée est le meneau.

La partie bleue correspond à la zone sous pression chargeant le meneau, les parties blanches ont leur charge de vent reprise par le cadre du dormant.

Avec les hypothèses suivantes :

$p = 500 \text{ Pa}$; $L = H = 2 \text{ m}$; $\ell = 1/2 \times (\ell_f + \ell_v) = 3,5 \text{ m}$; $L/f = 200$; $E = 1,1 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$,

on obtient :

— dans l'hypothèse d'une charge uniformément répartie ($r = 5/384$) :

$$I = 1\,020 \text{ cm}^4$$

— si on considère que toute la charge de l'aire est concentrée au milieu de la portée de l'élément à calculer ($r = 1/48$) :

$$I = 1\,630 \text{ cm}^4$$

(on majore ainsi de 60 % le moment d'inertie à prévoir).

On cherche ensuite la paire de profilés constituant le battement dont la somme des moments d'inertie atteint ou dépasse la valeur calculée choisie.

■ Cas des grands ensembles

Dans le cas de grands ensembles menuisés (portée > 2,50 m) ou dans des expositions particulièrement difficiles (zones à cyclones des territoires d'outre-mer), on peut être amené à calculer la section des pièces non en rigidité mais en contrainte sous la pression de rafale. Il faut alors que la contrainte calculée ne dépasse pas la contrainte admissible définie par les règles de construction.

On utilise alors la formule suivante :

$$C = E \frac{t}{r} \frac{v}{L} \left(\frac{f}{L} \right)_{p_1, p_2}$$

avec C (Pa) contrainte exprimée dans la même unité que le module d'élasticité E ,

t facteur de charge valant 1/8 pour une charge répartie et 1/4 pour une charge concentrée au milieu,

r coefficient de charge défini précédemment,

v (m) distance de la fibre neutre par rapport à la face de référence pour le calcul du moment d'inertie de la section ; en première approximation on peut prendre la demi-hauteur de la section du profilé,

L (m) portée de la pièce à calculer,

f/L flèche relative à la pression p_1 .

Exemple : $v = 50 \text{ mm}$; $L = 3\,500 \text{ mm}$; $E = 11\,000 \text{ MPa}$; $f/L = 1/100$ (pour une pression de rafale de 1 000 Pa par exemple).

Pour une charge concentrée au milieu ($r = 1/48$ et $t = 1/4$), la contrainte est : $C = 18,9 \text{ MPa}$. Si la pièce est en bois de qualité menuiserie, cette contrainte est trop élevée. Il faut donc réduire f/L en augmentant le moment d'inertie de la section : pour une contrainte admissible C de 14 MPa, il faut que la flèche relative ne dépasse pas 1/135 à la pression de 1 000 Pa (1/100 divisé par 18,9/14).

■ À titre d'information, les valeurs moyennes de modules d'élasticité et de contraintes en flexion, de quelques essences utilisables dans la fabrication de fenêtres sont données dans le tableau 2.

Tableau 2 – Modules d'élasticité et de contrainte de quelques essences (valeurs moyennes)

Essence	Module d'élasticité (GPa ou kN/mm ²)	Contrainte à la rupture (MPa ou N/mm ²)
Châtaignier	8,50	71
Chêne	12,5	97
Curupixa	13,9	121
Doussié	13,7	173
Framiré	9,10	99
Iroko	11,2	105
Kapur	16,0	120
Kempas	18,6	126
Keruing	15,0	105
Makoré	11,2	137
Méranti (dark red)	13,9	92
Moabi	17,0	199
Niangon	11,5	144
Sipo	10,7	127
Douglas (pin d'Orégon)	12,1	85
Mélèze	12,5	93
Pin maritime	8,80	80
Pin sylvestre	11,9	90
Western Red Cedar (Cèdre rouge)	7,90	51

Remarques

Le calcul des flèches se faisant sur la base de valeurs moyennes, les valeurs de **module** indiquées dans le tableau 2 peuvent s'utiliser en l'état.

Pour les **contraintes**, le calcul se faisant avec l'optique sécurité (non ruine de l'ouvrage), les valeurs de contrainte du tableau 2 sont à corriger par deux facteurs relatifs à :

— la dispersion de la contrainte dans l'essence (fonction de divers facteurs tels que choix d'aspect, masse volumique, provenance, ...) ;

— la sécurité (coefficients forfaitaires).

La combinaison des ces deux facteurs conduit à diviser par un facteur compris entre 4 et 6 les résultats de la contrainte moyenne.

3.1.2 Charges complexes

■ Méthode simple de calcul du moment fléchissant et de la flèche

La méthode consiste à considérer des charges ponctuelles le long de la liaison à calculer :

— soit des charges réelles appliquées au droit des nœuds ;

— soit des charges ponctuelles virtuelles correspondant à des tronçons de charges réparties qu'on ramène à une charge ponctuelle équivalente.

Pour obtenir ces dernières, on fractionne le polygone de charge continue de la liaison en au moins une dizaine de tronçons sur la portée.

Tableau 3 – Méthode de calcul pratique du moment fléchissant et de la flèche dans le cas de charges complexes

Tronçon i	S_i	$F_i = S_i p_1$	b_i	$4 b_i^2$	$H_i = 3L^2 - 4 b_i^2$	$M_i = F_i b_i$	$M_i H_i$
1							
2							
.....
$i - 1$							
i							
$i + 1$							
.....
$n - 1$							
n							
$\sum_{i=1}^n$						$M_f = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{2}$	$f = \frac{\sum_{i=1}^n M_i H_i}{48EI}$
S_i (m ²) : aire des tronçons p_1 (Pa) : pression de déformation b_i (m) : distance de la charge ponctuelle au bout le plus proche L (m) : portée de la liaison				f (m) : flèche au milieu de la portée E (Pa) : module d'élasticité I (m ⁴) : moment d'inertie de la liaison à calculer			

Le **moment fléchissant** est alors donné par :

$$M_f = \frac{\sum_{i=1}^n F_i b_i}{2}$$

La **flèche** au milieu de la portée de la liaison est donnée par :

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n F_i b_i (3L^2 - 4b_i^2)}{48EI}$$

avec F_i (N) charge sur le tronçon i ,

b_i (m) distance du centre du tronçon (sur la liaison) à l'extrémité de la liaison la plus proche ($b_i \leq L/2$).

Tous les autres termes ont déjà été définis auparavant.

Pour faciliter le calcul, le tableau **3** peut être utilisé, que l'on remplit colonne après colonne et ligne après ligne, en effectuant les opérations indiquées.

La flèche f étant déterminée, on vérifie si la flèche relative requise est satisfaite.

En cas de besoin, on peut aussi calculer la contrainte de flexion avec la formule classique :

$$C = \frac{M_f}{I/v}$$

avec v (m) distance de la fibre neutre à la rive de la liaison.

■ Méthode simple de détermination des moments d'inertie des sections

Après décomposition de la section du profilé en rectangles élémentaires, le moment d'inertie de cette section est donné par la formule classique suivante :

$$I_S = \sum_{i=1}^n I_i + \sum_{i=1}^n S_i d_i^2$$

avec I_i (m⁴) moment d'inertie du rectangle i : $I_i = e_i^2 S_i / 12$,

S_i (m²) aire du rectangle i ,

d_i (m) distance du centre de gravité de la section de ce rectangle i au centre de gravité de la section.

Si pour deux rectangles élémentaires la présente formule ne présente pas de difficultés, lorsque la pièce devient complexe, les calculs deviennent lourds. Le tableau **4**, à remplir pas à pas en suivant les appellations des colonnes et les indications d'opération, donne le résultat de manière aisée et peut être transféré aussi simplement sur un tableur.

Remarque : le fonctionnement est similaire à celui prévu dans le tableau **3** pour le calcul des moments fléchissants et des flèches des liaisons menuisées à charges complexes.

3.2 Conservation des performances

Elle ne peut être assurée que si :

- la rigidité de la menuiserie est suffisante (voir § 3.1) ;
- le pouvoir de compensation des profilés d'étanchéité de la liaison ouvrant-dormant est bonne (au plus 3 mm) et si leur reprise élastique est bonne ;
- les quincailleries sont bien fixées (pas de glissement) et suffisamment rigides (torsion ou autres déformations locales).

3.3 Sécurité

Les règles de rigidité font que la section des profilés n'est jamais en cause. Le problème réside plutôt dans la qualité de fixation des quincailleries liant le vantail au dormant.

Tableau 4 – Méthode de calcul pratique du moment d'inertie de la section sous pression

Rectangle i	e_i	ℓ_i	$S_i = e_i \ell_i$	$A_i = e_{i-1} + A_{i-1}$	$X_i = A_i + e_i/2$	$B_i = S_i X_i$	$d_i = G - X_i$	d_i^2	$K_i = S_i d_i^2$	$I_i = e_i^2 S_i/12$
1				$A_1 = 0$						
2										
.....
$i-1$										
i										
$i+1$										
.....
$n-1$										
n	e_n			A_n						
$\sum_{i=1}^n$			$\sum_{i=1}^n S_i$			$\sum_{i=1}^n B_i$			$K_c = \sum_{i=1}^n K_i$	$I_c = \sum_{i=1}^n I_i$
			$G = \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$						$I_S = K_c + I_c$	
									$\frac{I_S}{G} ; \frac{I_S}{v}$ (ou le plus petit)	
									$\frac{I_S}{e_n + A_n - G}$	

e_i et ℓ_i sont respectivement l'épaisseur et la largeur du rectangle i
 G est la position du centre de gravité par rapport au parement du rectangle élémentaire n° 1

Les fenêtres sollicitant le plus les quincailleries et donc leur support, sont celles à vantaux pivotant autour d'une de leurs rives (fenêtres à 2 vantaux à la française ou à l'anglaise) et avec ancrage haut et bas au battement. Pour ce type d'ouvrage, la charge à reprendre pour chaque point d'ancrage haut et bas au dormant est donnée par la relation suivante :

$$F = p_3 \cdot S_v/4$$

avec p_3 (Pa) pression de rafale,
 S_v (m²) aire des vantaux concernant la quincaillerie de verrouillage,
 F (N) charge.

Pour illustrer l'importance que cet effort peut atteindre, donnons un **exemple** concret :

- porte-fenêtre de 3 m² d'aire de vantaux (dimensions tableau : $\approx 2,25 \text{ m} \times 1,40 \text{ m}$) ;
- pression de 2 200 Pa :

$$F = 1\,650 \text{ N}$$

Il est évident qu'une telle charge concentrée est susceptible de poser un problème de reprise par le bois. Il faut que le mode de travail des fixations prenne en compte les spécificités de ce matériau (faire en sorte que la sollicitation par la quincaillerie soit celle où le bois présente la meilleure résistance) et de la géométrie de la section des profils (ne pas faire travailler la quincaillerie là où le profil est le plus faible). Ainsi, le bois présente-t-il des propriétés quantifiables en ce qui concerne la tenue des vis travaillant à l'arrachement. Par contre, si les vis sont sollicitées en faisant fendre le

bois, la performance est aléatoire et dépend très fortement de la masse volumique de ce dernier (ou d'éventuelles singularités locales).

■ Fixation des gâches par vis en parement

La tenue optimale des gâches est assurée lorsqu'elles sont vissées en parement (axe des vis parallèle à la direction du vent, voir figure 9a). Dans ce cas, la résistance de la gâche peut se calculer avec la formule suivante :

$$F_{\text{gâche}} = \pi \phi N L C$$

avec $F_{\text{gâche}}$ (N) résistance de la gâche,
 ϕ (mm) diamètre de vis,
 N nombre de vis (en général 2 par gâche),
 L (mm) longueur de filetage,
 C (N/mm²) constante dépendant du bois et du type de filetage des vis (*).

(*) C'est le rapport de la force à l'aire de cisaillement local perpendiculaire aux fibres, et a donc même dimension qu'une contrainte (ici N/mm²).

La valeur du coefficient C est comprise entre 0,6 N/mm² (bois tendre de masse volumique de moins de 500 kg/m³) et 1,3 N/mm² (bois comme le chêne, sachant que des bois exotiques comme le moabi se situent à un niveau encore plus élevé). Il s'agit de valeurs obtenues avec des vis à bois traditionnelles et intégrant un coefficient de sécurité. Avec les filetages modernes obtenus par roulage (VBA ou similaire), cette contrainte est sûrement notablement améliorée.

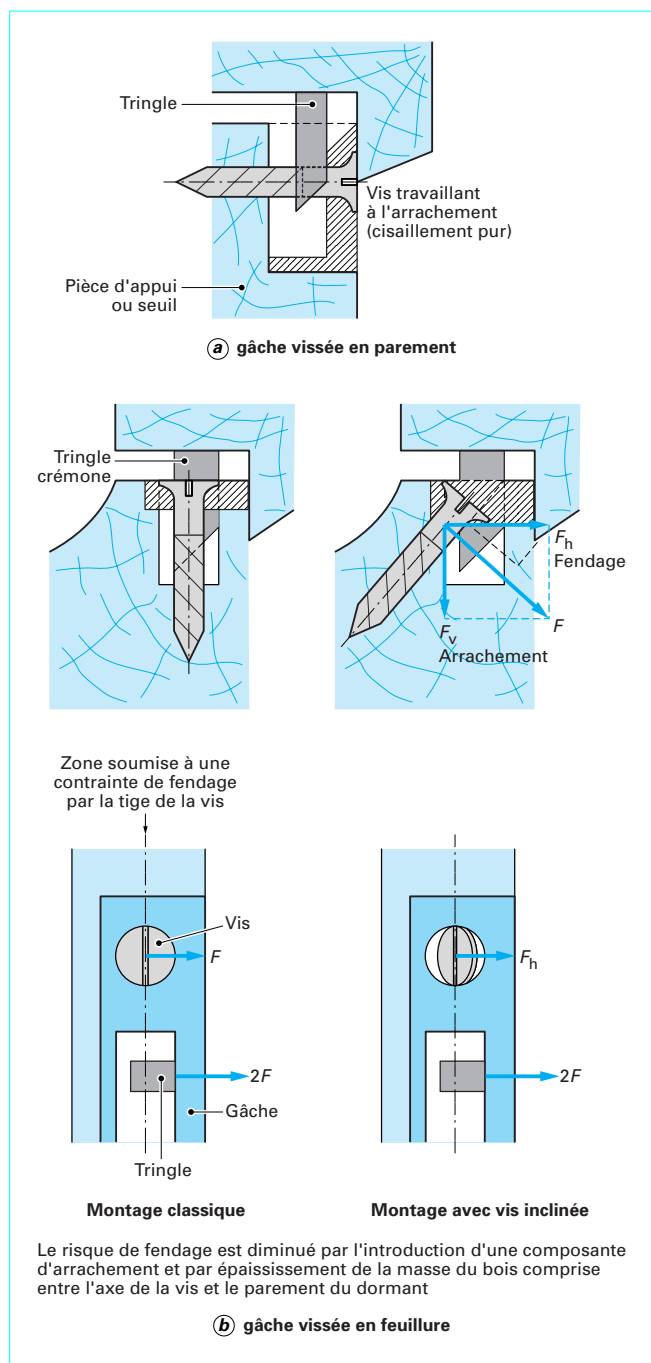


Figure 9 – Fixation des gâches hautes et basses

Avec l'exemple ci-dessus, il faut ainsi prévoir 2 vis de 4 x 60 mm pour assurer la reprise de l'effort de 1 725 N, dans un bois comme le chêne.

Remarque

Lors d'un essai avec ce type de fixation, s'il y a arrachement de vis, les dégâts causés sont minimes et réparables (soit vis plus

grande en longueur et en diamètre soit réparation par tourillon collé dans l'orifice de vis).

De ce point de vue, les fabrications modernes qui ont abandonné ce type de fixation, sont, sur le plan de la conception, en régression technique par rapport aux fabrications anciennes avec crémones, tringles et gâches vissées en applique sur le parement de la fenêtre. Ceci ne veut pas dire que les fenêtres modernes avec fixation en feuillure soient insuffisantes sur le plan technique mais, vis-à-vis de l'essai de rafale, la marge de sécurité peut être amoindrie, notamment avec les essences de faible masse volumique (l'amélioration de la performance d'arrachement des vis modernes n'est alors d'aucune utilité).

■ Fixation des gâches par vis en feuillure

Dans ce cas, l'axe de la vis est situé dans le plan de la menuiserie. L'orientation de la charge du vent conduit donc à solliciter le bois perpendiculairement à la direction de ses fibres qui sont alors soumises à une sollicitation de type fendage. Quelques chiffres sont donnés dans le tableau 5 relativement à cette propriété.

Tableau 5 – Résultats d'essais de fendage de bois de quelques essences

Bois	Valeur (1) (N/mm)	Bois	Valeur (1) (N/mm)
Pin sylvestre et Douglas	10	Chêne	30
Pin maritime	16	Iroko	15
Châtaignier	13	Doussié	19

(1) Ces valeurs correspondent à la force (N) nécessaire pour fendre une pièce de bois sur une longueur (mm) donnée, la force étant perpendiculaire au fil du bois.

Ces valeurs ne sont pas utilisables pour effectuer un calcul à partir de la charge à reprendre car, sous l'effet de la charge, la rupture se propage. Elles ne sont données que pour situer quelques essences les unes par rapport aux autres.

Toutefois, lorsque les vis s'éloignent du parement, l'épaisseur de bois comprise entre vis et parement se comporte comme un élément soumis à une sollicitation de flexion si le bois est bien droit de fil (sinon il y a fendage).

Donc dans une option de gâches vissées en feuillure, il faut éloigner l'axe des vis au maximum du parement.

Par ailleurs, l'inclinaison de l'axe des vis par rapport au plan de la fenêtre, introduit une composante d'arrachement qui recule le seuil de rupture du bois par les vis.

La figure 9b illustre ce propos.

4. Résistance mécanique

Il s'agit de la résistance aux sollicitations spécifiques au mode d'ouverture. L'étude détaillée de ce point serait donc longue et pourrait justifier un article à elle seule. Nous ne citerons donc qu'un seul exemple, celui des **ouvrants à l'anglaise ou à la française pour le test de charge verticale**. Sur ce point précis, on va évoquer deux aspects : l'évaluation de la chute de nez en cas de calage défectueux et celle des efforts que doit alors reprendre la cale d'assise en tête de vantail.

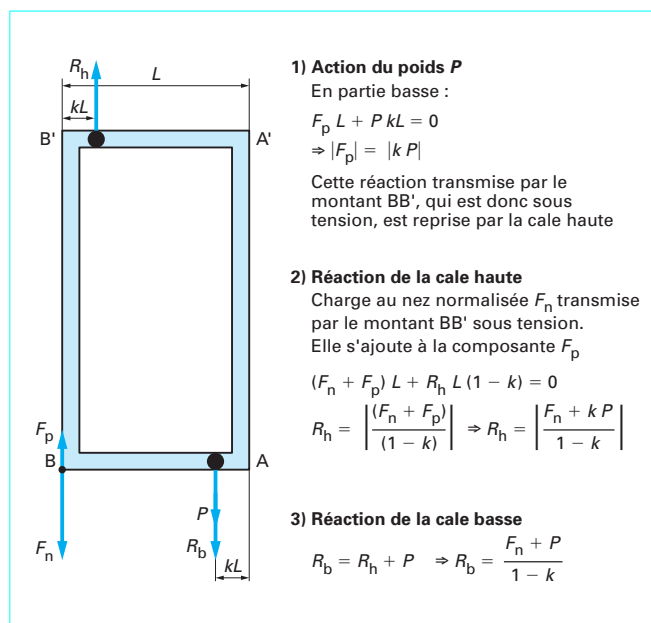


Figure 10 – Évaluation de la chute de nez

La charge ultime, appliquée dans le cadre de la norme NF P 20-302 est de 500 N.

■ Évaluation de la chute de nez

La charge ultime met en évidence la qualité de calage d'assise du verre. Si le calage est fait selon les règles de l'art, la chute de nez est faible (de l'ordre de 1 mm) ; si le calage est défectueux, une chute de nez se manifeste. Sa limite est donnée par la déformation qu'atteint le châssis quand sa petite diagonale devient égale à celle du verre pris en feuillure (rainure).

Dans cette situation, si le jeu initial est également réparti sur les 4 côtés du châssis, la chute de nez c_n , est liée aux cotes du vitrage selon (figure 10) :

$$c_n = 2 J [1 + (L/H)]$$

avec c_n (mm) estimation de la chute de nez,
 J (mm) jeu périphérique moyen,
 L (m) largeur du verre,
 H (m) hauteur du verre.

Pour un châssis s'approchant du format carré, la chute de nez correspond à deux fois le jeu. Pour les châssis étroits, elle est moindre que la somme des jeux hauts et bas ; pour les châssis plus larges que hauts, la chute de nez est alors supérieure à la somme des jeux hauts et bas.

Ce test de charge au nez est donc révélateur de la qualité du montage et, s'il est satisfaisant, donne donc des garanties sur le bon comportement en œuvre du produit (pas de chute de nez en service).

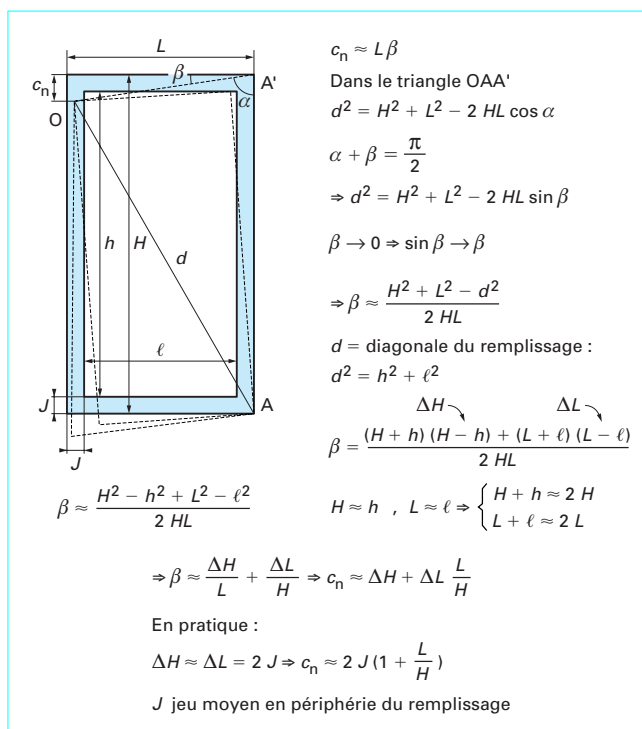


Figure 11 – Réaction des cales d'assise

■ Évaluation des charges reprises par les cales d'assise

Pour les ouvrants pivotant autour d'une rive verticale, deux cales sont nettement plus chargées que les autres : la cale d'assise basse, qui reprend le poids du remplissage de façon permanente, et la cale d'assise haute qui se trouve fortement sollicitée lors de l'essai de charge au nez. S'il s'agit de cales d'assise passives classiques, il n'y a pas de problème particulier.

Par contre, en cas de fenêtres à assemblages mécaniques vitrées en rainure, le calage s'ajuste par une cale d'assise haute réglable. Le mécanisme de réglage induit une fragilité que n'a pas une cale passive. Il convient donc d'évaluer les efforts que cette cale doit reprendre. Selon la figure 11, la charge à reprendre par cette cale vaut, en valeur absolue :

$$R_h = (F_n + kP)/(1 - k)$$

avec R_h (N) réaction de la cale d'assise haute,
 F_n (N) charge normalisée appliquée au nez du vantail,
 k rapport de la distance des cales d'assise (par rapport au montant le plus proche) sur la largeur du verre,
 P (N) poids du remplissage (*).

(*) La valeur approchée du poids d'un remplissage en verre vaut :

$$P = 25 HL \sum e_v$$

avec H, L (m) respectivement hauteur et largeur du vitrage,
 $\sum e_v$ (mm) épaisseur cumulée des feuilles de verres composant le vitrage.