

# Fenêtres et portes extérieures bois

## Stabilité des portes et portes-fenêtres

par **Marcel DENANCÉ**

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

|   |             |
|---|-------------|
| <b>1. Analyse du phénomène</b> .....  | C 3 616 - 2 |
| 1.1 Phénomène de dilatation .....   | — 2         |
| 1.2 Phénomène de rétractibilité.....  | — 2         |
| 1.2.1 Valeurs de coefficient de rétractibilité sur le bois<br>et matériaux dérivés..... | — 2         |
| 1.2.2 Explication des déformations sous l'action des phénomènes<br>de retrait .....     | — 3         |
| 1.2.3 Critique des méthodes d'essais.....   | — 5         |
| <b>2. Technique de stabilisation des vantaux</b> .....                                  | — 5         |
| 2.1 Choix du matériau des faces .....   | — 5         |
| 2.2 Évaluation de la rigidité du vantail.....   | — 6         |
| 2.3 Contrôle de la déformation par la quincaillerie de verrouillage.....                | — 6         |
| 2.4 Contrôle de la planéité par « raidisseur » .....                                    | — 7         |
| 2.4.1 Raidisseurs à inertie .....   | — 7         |
| 2.4.2 Raidisseurs à réaction mécanique .....  | — 8         |
| 2.5 Contrôle de la planéité par tôles symétriques collées.....                          | — 8         |

**P**ar stabilité, on entend la faculté, pour le vantail, de conserver sa planéité générale originelle et ce, malgré l'exposition entre deux climats le plus souvent différents. L'expérience montre que les dysfonctionnements liés aux déformations sont d'autant plus marqués que les dimensions du vantail dans son plan sont grandes ; sont donc concernées les portes extérieures et les portes-fenêtres.

La stabilité des portes conditionne plusieurs performances de base des portes :

- **acoustique** (un bon indice d'affaiblissement est incompatible avec une forte perméabilité à l'air) ;
- **thermique** : une forte perméabilité à l'air induit un renouvellement d'air parasite excessif et alourdit donc le bilan thermique ;
- **manceuvrabilité** : les déformations qui sont associées à un mauvais contrôle de la stabilité peuvent déboucher sur une impossibilité de verrouillage de la porte ;
- **étanchéité à l'eau** : pour les portes extérieures, le mauvais contrôle de la perméabilité à l'air rend impossible l'obtention d'une étanchéité à l'eau de niveau E \* 1 ; le déplacement des dispositifs d'arrêt d'eau peut mettre hors circuit les dispositifs de récupération d'eau, créant alors des infiltrations d'eau même en l'absence de tout vent.

La rubrique « Fenêtres et portes extérieures » se compose des articles suivants :

- Fonctions de base et terminologie [C 3 610] ;
- Conceptions de la liaison ouvrant-dormant [C 3 611] ;
- Techniques d'assemblage [C 3 612] ;
- Remplissages. Profilés d'étanchéité [C 3 613] ;
- Mise en œuvre [C 3 614] ;
- Analyse thermique. Choix du bois [C 3 615] ;
- Stabilité des portes et portes-fenêtres [C 3 616].

# 1. Analyse du phénomène

Deux phénomènes sont à l'origine de l'instabilité des portes (figure 1) :

- la **dilatation** qui concerne le bois mais surtout les autres matériaux ;
- la **rétractibilité longitudinale** du bois et de ses produits dérivés.

Dans les deux cas, on a un allongement relatif  $dL$  d'une face par rapport à l'autre et donc une courbure dont la **flèche**  $f$  (en mm) est donnée par la relation suivante :

$$f = \frac{L dL}{8e}$$

avec  $L$  (mm) longueur sur laquelle se manifeste la variation de longueur (hauteur vantail),  
 $dL$  (mm) variation de longueur entre les deux faces,  
 $e$  (mm) épaisseur de l'élément.

## 1.1 Phénomène de dilatation

Comme tous les matériaux, le bois est sensible, sous l'action de la chaleur, à la dilatation. Son coefficient de dilatation vaut environ le tiers de celui de l'acier et le sixième de celui de l'aluminium soit :

$$\delta_b = 4 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$$

La variation de longueur  $dL_T$  correspondante est donnée par :

$$dL_T = \delta_b L dT$$

avec  $L$  (mm) longueur,  
 $dT(^{\circ}\text{C})$  variation de température.

**Exemple :**  $L = 2\,000$  mm ;  $dT = 60^{\circ}\text{C} \Rightarrow dL = 0,48$  mm

C'est donc une valeur faible.

Toutefois, il faut tenir compte du fait que le bois est un matériau isolant ; il s'ensuit que, si une seule face est exposée au rayonnement (cas des portes extérieures), seule cette dernière va s'allonger, l'autre restant stable. Il y a donc un effet de bilame qui va donner une courbure **convexe** sur la face exposée au rayonnement.

La flèche  $f_T$  vaut donc, à partir des relations exprimées ci-dessus :

$$f_T = L^2 \delta_b dT / 8e$$

Avec l'**exemple** ci-dessus et un vantail de 40 mm d'épaisseur, on aura donc une courbure ayant une flèche de :

$$f_T = 3 \text{ mm}$$

La valeur est faible mais on notera qu'elle varie avec le carré de la portée.

Toutefois, pour le bois ou ses matériaux dérivés, ce phénomène de dilatation se trouve rapidement compensé par le phénomène de rétractibilité de la face exposée à la chaleur et, au bout d'un certain temps, le sens de courbure s'inverse. Toutefois, si on procède à un enregistrement en continu de la déformation sous gradient thermique, le phénomène est clairement mis en évidence.

## 1.2 Phénomène de rétractibilité

Le bois et ses matériaux dérivés étant hygroscopiques, le phénomène de rétractibilité se manifeste sous l'effet de la variation de l'humidité relative de l'air. Ainsi, à chaque valeur d'humidité relative de l'air correspond une teneur en eau dans le bois ou ses dérivés

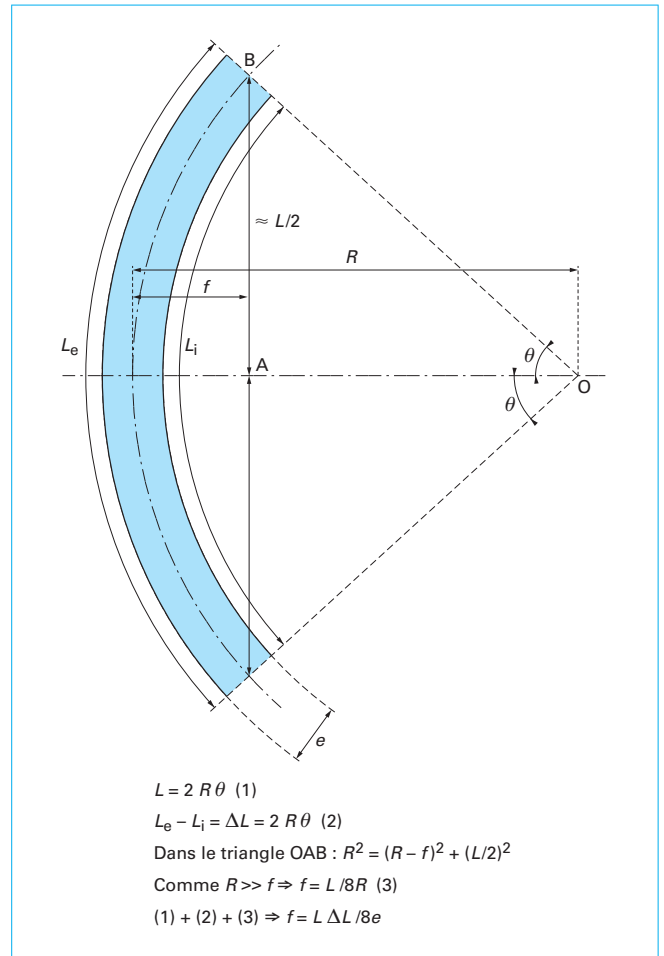


Figure 1 – Déformation d'une porte

Tableau 1 – Taux d'équilibre hygroscopique moyens des bois à 20 °C (1)

| HR.....(%) | 10  | 20  | 30  | 40  | 50  | 60 | 65 | 70   | 80   | 85 | 90 | 95 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|------|------|----|----|----|
| Taux ..(%) | 2,5 | 4,5 | 5,8 | 7,8 | 9,5 | 11 | 12 | 13,3 | 16,6 | 19 | 21 | 26 |

(1) Ces valeurs sont acceptables entre 0 et 30 °C.  
 Les courbes d'équilibre hygroscopique peuvent se trouver en annexe du DTU 36.1.

(calculée sur sa masse anhydre). Le tableau 1 donne les taux d'équilibre hygroscopique du bois massif en fonction de l'humidité relative de l'air et pour une plage de température autour de 20 °C. Selon cette teneur en eau dans le bois, les dimensions des pièces changent.

### 1.2.1 Valeurs du coefficient de rétractibilité sur le bois et matériaux dérivés

Le phénomène est bien connu dans le sens travers du fil du bois massif (on admet un coefficient de rétractibilité  $r_t$  de 3/1000 par variation de 1 % du taux d'humidité du bois). Ce phénomène

conduit en pratique à des ouvertures de joints d'assemblage, ou en cas de déséquilibre d'humidité entre les faces, au tuilage. Mais la rétractibilité qui gouverne la planéité générale des vantaux est celle qui se manifeste dans le sens longitudinal des portes.

### ■ Bois massif

Pour les portes menuisées, la stabilité dépend donc de la **rétractibilité longitudinale** du bois massif. Dans la conception et la réalisation des menuiseries, elle est ignorée.

Toutefois, elle existe et on admet, **si le bois est de droit fil**, que :

$$r_{\ell} = 10^{-4} \text{ par variation de 1 \% du taux d'humidité}$$

**Si le bois n'est pas de droit fil**, une composante de retrait transversal intervient. Si la pente de fil est constante sur la longueur de la pièce, le coefficient de rétractibilité longitudinale est donné, pour une variation de 1 % du taux d'humidité, et en supposant que le coefficient de rétractibilité transversale est de 3/1000, par :

$$r_{\ell} = (1 + a/2) \cdot 10^{-4}$$

avec  $a$  (degré d'angle) pente de fil.

**Exemple :**  $a = 6^{\circ} \Rightarrow r_{\ell} = 4 \cdot 10^{-4}$

Soit 4 fois plus que le bois massif bien de fil.

### ■ Matériaux dérivés du bois massif

Ils ont remplacé le bois massif au moins sur les faces (parfois pour toutes les autres parties, c'est-à-dire l'âme et même le cadre).

Les matériaux utilisés sont, pour l'essentiel, les panneaux contreplaqués et les panneaux de fibres.

#### ● Contreplaqué

Pour ce type de panneau, le retrait dans le plan est fonction de sa composition et de la nature des placages mis en œuvre.

Le **coefficient de rétractibilité** résultant est compris entre celui du bois massif de fil et celui du bois massif de fil travers.

• **Pour le sens du fil** du placage de face, il est donné par la relation suivante :

$$r_{rL} = \frac{\sum_{i=1}^n e_{ti} r_{ti} E_{ti} + \sum_{i=1}^n e_{\ell i} r_{\ell i} E_{\ell i}}{\sum_{i=1}^n e_{ti} E_{ti} + \sum_{i=1}^n e_{\ell i} E_{\ell i}}$$

avec  $e$  (mm) épaisseur du placage,  
 $r$  (% ou ‰) coefficient de rétractibilité,  
 $E$  (Pa) module d'élasticité de traction,  
 $r_{rL}$  (% ou ‰) coefficient de rétractibilité résultant dans le plan du panneau, dans le sens du fil

#### Indices

$n$  nombre de plis du contreplaqué dans chacune des deux directions  $\ell$  et  $t$  du plan  
 $i$  rang du placage  
 $t$  propriété dans le sens travers du fil de la face  
 $\ell$  propriété dans le sens du fil de la face du placage.

• **Pour le sens travers du fil**, on utilise la même formule mais les placages qui étaient dans le sens travers sont alors dans le sens longitudinal et *vice versa*.

**Exemple :** contreplaqué trois plis (courant pour les portes planes) : deux placages de face de 0,7 mm et pli central de 1,8 mm, tous dans la même essence :

$$r_t = 0,3 \quad r_{\ell} = 10^{-4} ; E_{\ell} = 10^{10} \text{ Pa} ; E_t = 0,05 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$$

On obtient les valeurs suivantes pour les coefficients de rétractibilité :

**Sens long :**

$$r_{rL} = 2,75 \cdot 10^{-4}$$

Le coefficient de rétractibilité est donc presque triplé par rapport à celui du bois massif.

**Sens travers :**

$$r_{rt} = 2,09 \cdot 10^{-4}$$

Le coefficient de rétractibilité est donc doublé ici.

#### ● Autres panneaux (OSB excepté)

**Nota :** OSB *Oriented Strand Boards* ou panneaux à lamelles orientées.

Pour des portes extérieures, l'usage d'autres panneaux qu'en bois massif ou contreplaqué n'est pas autorisé. En effet, ils peuvent être utilisés seulement, et au mieux, pour une classe de service 2 (selon la norme NF EN 335) c'est-à-dire en extérieur abrité. En pratique donc, seules des portes extérieures abritées pour lesquelles, selon le FD P 20-201, l'exigence d'étanchéité à l'eau est E \* 0 (portes avec facteur de protection au moins égal à 0,6 pour une porte au rez-de-chaussée) peuvent être concernées.

Si un panneau de classe de service 2 peut être utilisé, le coefficient de rétractibilité dans le plan ne se calcule pas mais se déduit expérimentalement par exemple selon la méthode définie dans la norme NF EN 318.

En pratique, on peut tabler sur une valeur moyenne de 0,3 % pour une variation d'humidité relative de l'air de 30 à 85 % (qui induit, sur le bois massif, une variation d'humidité de 10 %). Si on rapporte cette valeur de retrait sur l'amplitude de 10 % observée sur le bois massif, on arrive donc à 0,03 % soit 10 fois moins que le bois massif en fil travers mais 3 fois plus que ce dernier dans le sens du fil.

En supposant une variation du taux d'humidité égale à celui du bois massif, on retient donc, en moyenne, pour le sens le plus défavorable :

$$r_{\ell p} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ par pourcentage d'humidité}$$

**Remarque :** l'amplitude de la variation d'humidité des panneaux entre les climats de 30 et 85 % d'humidité relative n'est pas de 10 % mais de moins de 7 %. Le fait de rapporter le retrait observé sur la même amplitude d'humidité que le bois massif permet de comparer directement les performances des deux matériaux.

Les panneaux de fibres et de particules présentent, dans le plan, une assez bonne isotropie (écart de performance) le plus souvent n'excédant pas 10 % entre les deux directions du plan. Il n'en est pas de même pour l'OSB où on recherche précisément l'anisotropie (dans ce cas, les propriétés, y compris le retrait, sont souvent dans un rapport de 1 à 2 entre les deux directions), mais ce type de panneau ne s'utilise pas dans la fabrication des portes.

**Remarque :** il n'en est pas de même des panneaux dits Wafer Boards qui sont aussi des panneaux à lamelles mais non orientées et leurs propriétés physiques et mécaniques, dans le plan, sont celles de panneaux quasiment isotropes comme les panneaux de particules ou de fibres.

## 1.2.2 Explication des déformations sous l'action des phénomènes de retrait

Il est connu qu'en période hivernale, les portes d'entrée, qu'elles soient palières ou extérieures, se déforment, la face intérieure chauffée étant concave.

Dans la pratique, et pour les portes extérieures, le phénomène est nettement plus marqué pour les portes de technique plane que pour les portes menuisées.

On peut ainsi observer, sur place, des déformations dépassant parfois largement 10 mm.

En période estivale, ces déformations tendent à disparaître.

**Remarque :** ne sont traitées ici que les déformations de cintrage (courbure circulaire) ; elles n'ont rien à voir avec les déformations de voilement qui sont, elles, imputables à la torsion du fil du bois et se manifestent dès que le bois sèche, même de manière équilibrée sur ses deux faces.

### ■ Approche sommaire

Le raisonnement est le suivant :

- la face extérieure est exposée à un climat à plus forte humidité relative (particulièrement en hiver), la face intérieure est soumise à un climat à humidité relative plus basse ;
- il y a équilibre du bois de chaque face avec l'ambiance qu'elle limite ; on aurait ainsi le schéma suivant :
  - face extérieure en équilibre avec le climat extérieur humide,
  - face intérieure en équilibre avec le climat intérieur sec.

Si, par **exemple**, l'humidité relative de l'air intérieur est à 30 % et celle de l'air extérieur est à 85 %, on admet, dans cette première approche, que le bois de la face extérieure se stabilise à 19 % (cf. table des courbes de l'équilibre hygroscopique du bois) et celui de la face intérieure à environ 6 %.

On en déduit un écart de 13 % entre l'humidité des deux faces soit, par exemple, sur 2 m, une variation relative entre les deux faces de :

$$dL_h = 13 \times 2\,000 \times 10^{-4} \Rightarrow dL_h = 2,6 \text{ mm}$$

**Nota :** le coefficient de rétractibilité est, ici, celui d'une porte en bois massif.

Si l'épaisseur est de 40 mm, il s'ensuit une courbure concave sur la face intérieure, telle que la flèche  $f_h$  vaut :

$$f_h = 2\,000 \times 2,6 / (8 \times 40) \Rightarrow f_h = 16,3 \text{ mm}$$

**Remarque :** si on intègre les paramètres dans la formule précédente on obtient la flèche  $f_h$  :

$$f_h = L^2 r_e dh / 8e$$

avec  $dh$  (%) écart d'humidité entre les deux faces, les autres paramètres ont déjà été explicités.

### ■ Analyse des phénomènes en jeu

Dans la réalité, les déformations, sur une porte en bois massif de droit fil, n'atteignent jamais ce niveau. La raison est à rechercher dans la transmission de chaleur.

En effet, la transmission de la chaleur sur l'interface se fait avec un rendement d'autant plus mauvais que l'air est calme. Dans les calculs, cet état de fait se traduit par le facteur de résistance thermique superficielle.

Dans les règles Th K 77, cette résistance thermique apparaît sous les expressions :

- $1/h_i$  pour la face intérieure valant  $0,13 \text{ m}^2/(\text{K} \cdot \text{W})$  ;
- $1/h_e$  pour la face extérieure valant  $0,04 \text{ m}^2/(\text{K} \cdot \text{W})$ .

**Nota :** ces valeurs s'appliquent à des parois verticales comme les portes.

Or, ces résistances thermiques de surface perturbent le phénomène tel qu'il est décrit dans l'approche sommaire. En effet, du fait de l'existence d'une résistance thermique de surface, la température de surface des parois n'est pas celle de l'ambiance qu'elle isole.

En effet, la loi de conservation du flux de chaleur permet d'écrire la double formule suivante :

$$U(T_i - T_e) = h_e(T_{se} - T_e) = h_i(T_i - T_{si})$$

avec  $[UW/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$  coefficient de transmission de chaleur de la porte (y compris ses résistances superficielles),

$T_i, T_e$  ( $^\circ\text{C}$ ) respectivement les températures intérieure et extérieure,

$T_{si}, T_{se}$  ( $^\circ\text{C}$ ) respectivement les températures de surface intérieure et extérieure.

De cette relation, on tire :

$$T_{se} = T_e + (U/h_e)(T_i - T_e)$$

$$T_{si} = T_i - (U/h_i)(T_i - T_e)$$

On en tire la **conclusion** essentielle suivante : l'écart entre la température d'une surface (intérieure ou extérieure) et la température de l'ambiance correspondante est d'autant plus faible que :

- l'écart de température entre intérieur et extérieur est faible ;
- le coefficient  $U$  est faible (ou que la porte est isolante).

Ainsi, quand  $U$  tend vers zéro, les températures de surface tendent vers la température des ambiances qu'elles isolent. On s'approche alors du comportement décrit dans l'approche sommaire ci-dessus.

À l'inverse, quand l'écart de température s'accroît et si le coefficient  $U$  augmente, les températures de surface s'éloignent de celles de l'ambiance que la porte sépare.

### Exemples :

Nous supposons que l'état de l'air est le suivant :

- température :  $T_i = 20\,^\circ\text{C}$  ;  $T_e = -10\,^\circ\text{C}$  ;
- humidité relative : 90 % à l'extérieur ; 30 % à l'intérieur.

#### ■ Cas n° 1 : porte peu isolante ( $L = 2\,000 \text{ mm}$ )

La porte ( $e = 36 \text{ mm}$ ), en bois très dense (type Moabi) dont le coefficient de conductibilité thermique est de  $0,23 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ , a un coefficient de transmission :

$$U \approx 3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\Rightarrow T_{se} = -10 + [3 \times 0,04] [20 - (-10)] = -10 + 3,6 = -6,4\,^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow T_{si} = 20 - [3 \times 0,13] [20 - (-10)] = 20 - 11,7 = 8,3\,^\circ\text{C}$$

L'analyse du comportement (voir diagramme de l'air humide et courbes d'équilibre hygroscopique des bois) est la suivante :

- **Face extérieure :** l'élévation de  $3,6\,^\circ\text{C}$  de la température entre l'extérieur et la face correspondante de la porte conduit, sur la face même, à un abaissement de l'humidité relative de 90 à 65 %. À cette humidité relative, le bois aura un équilibre hygroscopique à 12-13 %.
- **Face intérieure :** la chute de température de  $9,9\,^\circ\text{C}$  entre la face de la porte et l'ambiance intérieure, conduit, sur la face même, à une augmentation de l'humidité relative de 30 à 65 %. À cette humidité relative, le bois aura un équilibre hygroscopique à 12 %.
- **Entre les deux faces,** il y a donc un écart pratiquement nul entre les taux d'humidité des bois. Il s'ensuit que la variation de longueur tendra vers zéro.

#### ■ Cas n° 2 : vantail très isolant ( $L = 2\,000 \text{ mm}$ )

La porte, d'épaisseur  $e = 60 \text{ mm}$ , a un coefficient de transmission :

$$U = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\Rightarrow T_{se} = -10 + [0,5 \times 0,04] [20 - (-10)] = -10 + 0,6 = -9,4\,^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow T_{si} = 20 - [0,5 \times 0,13] [20 - (-10)] = 20 - 1,95 = 18,0\,^\circ\text{C}$$

L'analyse du comportement (voir diagramme de l'air humide et courbes d'équilibre hygroscopique des bois) est la suivante :

- **Face extérieure :** l'élévation de seulement  $0,6\,^\circ\text{C}$  de la température entre l'extérieur et la face correspondante de la porte conduit, sur la face même, à une baisse de l'humidité relative de 90 à 85 %. À cette humidité relative, le bois aura un équilibre hygroscopique à environ 19,5 %.
- **Face intérieure :** la chute de température de  $1,95\,^\circ\text{C}$  entre la face de la porte et l'ambiance intérieure, conduit, sur la face même, à une augmentation de l'humidité relative de 30 à 35 % environ.
- **Entre les deux faces,** le bois aura un équilibre hygroscopique à environ 7 %.

Il s'ensuit que la variation de longueur qui en résulte n'induit qu'une flèche de 11 mm environ.

**Remarque :** ce calcul suppose que les faces de la porte sont en bois massif. En réalité, des portes avec un tel pouvoir isolant seront fabriquées selon une technique de porte plane et les faces feront donc appel à des panneaux dérivés du bois. Autrement dit, la flèche calculée ci-dessus pourra être largement dépassée dans la réalité (en relation avec le rapport des coefficients de rétractibilité des panneaux et du bois massif dans le sens long).

Tableau 2 – Écarts  $dh$  des taux d'humidité entre faces

| $U$<br>[W/(m <sup>2</sup> · °C)] (1) | Paire de climats de part et d'autre de la porte |                              |                             |                             |                                  |
|--------------------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
|                                      | 23 °C - 30 %<br>18 °C - 50 %                    | 23 °C - 30 %<br>13 °C - 65 % | 23 °C - 30 %<br>3 °C - 85 % | 23 °C - 30 %<br>– 15 °C (2) | 23 °C - 30 %<br>23 °C - 85 % (3) |
| 3,5                                  | 1,7   | 2,7                          | 1,1                         | – 6,8                       | 12,4                             |
| 3                                    | 1,9   | 3,5                          | 2,1                         | – 2,8                       | 12,4                             |
| 2,5                                  | 2,2   | 3,7                          | 3,2                         | – 1,5                       | 12,4                             |
| 2                                    | 2,4   | 4,2                          | 4,3                         | 0,7                         | 12,4                             |
| 1,5                                  | 2,6   | 4,7                          | 5,4                         | 3,9                         | 12,4                             |
| 1,2                                  | 2,9   | 5                            | 6,3                         | 6,3                         | 12,4                             |
| 1                                    | 2,95  | 5,2                          | 6,9                         | 7,7                         | 12,4                             |
| 0,8                                  | 3   | 5,4                          | 7,5                         | 10                          | 12,4                             |
| 0,6                                  | 3,05  | 5,6                          | 8,1                         | 12,2                        | 12,4                             |
| 0,4                                  | 3,1   | 5,8                          | 8,7                         | 17,3                        | 12,4                             |
| 0                                    | 3,4   | 6,1                          | 11,1                        | 24                          | 12,4                             |

(1) La ligne  $U = 0$  indique la limite asymptotique de l'écart  $dh$  pour la paire de climats ; cette valeur ne peut, bien entendu, être atteinte dans la réalité.

(2) Une valeur négative pour  $dh$  signifie que la face intérieure est convexe sur la face du climat à 23 °C – 30 % et non concave comme c'est le cas si  $dh$  est positif.

(3) Paire de climats isothermes utilisé par le CTBA ; sauf portes très isolantes avec climat à – 15 °C, il donne un plus grand  $dh$  et donc une plus grande déformation.

On conclut donc que **plus une porte en bois est isolante, plus elle a besoin d'être stabilisée**.

### 1.2.3 Critique des méthodes d'essais

À la lumière de l'analyse faite ci-dessus et en guise de conclusion, on peut évaluer l'efficacité des méthodes normalisées d'exposition entre deux climats quant à l'amplitude des déformations qu'elles sont susceptibles d'engendrer.

Les méthodes actuelles de référence pour ce type d'essais climatiques sont la norme NF B 20-514 ou la future norme européenne NF EN 1121-2, cette dernière étant enrichie de deux climats supplémentaires.

À ces climats, nous avons appliqué l'analyse faite dans les deux exemples ci-dessus afin de déterminer, pour chaque paire de climats, l'écart  $dh$  entre les taux d'équilibre hygroscopiques entre les deux faces des vantaux, en fonction du coefficient de transmission thermique  $U$  de ces derniers (tableau 2). En connaissant la hauteur de la porte, son épaisseur et ses matériaux (en particulier ceux des faces), on peut déterminer la flèche prévisible  $f_h$  en utilisant la formule déjà citée :

$$f_h = L^2 r_\ell dh / 8e$$

## 2. Technique de stabilisation des vantaux

Compte tenu de la faible amplitude de la déformation liée à la dilatation et de son « absorption » par les phénomènes de retrait dans le sens de la hauteur de la porte, il n'est pas nécessaire de rechercher de solution. On ne s'intéressera donc qu'à la stabilisation liée à la rétractibilité.

Dans la mesure où les faces sont constituées de bois ou de matériaux dérivés, le phénomène se manifestera toujours.

Les moyens d'action permettent :

- soit d'annuler la flèche du vantail ;

– soit de la limiter dans un rapport donné compatible avec le contrôle de la perméabilité à l'air de la liaison vantail-dormant.

Les moyens d'action portent sur :

- le choix du matériau des faces ;
- l'utilisation des quincailleries de verrouillage ;
- la mise en œuvre de « raidisseurs » ;
- la mise en œuvre de tôles collées dans la composition du vantail.

### 2.1 Choix du matériau des faces

L'évocation qui a été faite sur le rôle du coefficient de rétractibilité longitudinale du matériau des faces donne des éléments de solution. Cette solution n'est évoquée que pour mémoire.

Entre deux matériaux de face, le choix, si l'on prend en considération l'aspect stabilité, portera sur le matériau présentant le plus faible coefficient de rétractibilité dans le sens de la hauteur du vantail.

Lorsque le retrait longitudinal est maîtrisable (contreplaqué), on préférera les solutions conduisant au plus faible retrait (épaisseur plus grande des placages de face, choix d'une essence à fort module d'élasticité pour les placages du pli de face et à faible module, comme le peuplier, pour les placages du pli médian).

Par ailleurs, tout traitement de surface empêchant les migrations d'humidité de chaque face du vantail est favorable de ce point de vue ; ainsi les finitions filmogènes sont plus efficaces que les lasures.

Des solutions moins traditionnelles, à base de matériaux de synthèse, peuvent être recherchées, par exemple l'application d'un film polyester armé de fibres de verre.

#### Remarques :

- Si ce vantail est destiné à une façade, on fera néanmoins attention aux **problèmes de rétention d'eau** qu'entraînerait une telle solution : ils pourraient mettre en cause la durabilité du vantail. Il faudrait aussi prendre en compte le vieillissement de ce revêtement, en particulier vis-à-vis du rayonnement solaire.
- Strictement parlant, il ne s'agit plus d'une porte à face en matériau bois ou dérivé.

À l'exception du choix des matériaux des faces et de la technique des tôles collées, l'efficacité de toutes les autres solutions dépend directement de la connaissance de la rigidité du vantail.



## 2.2 Évaluation de la rigidité du vantail

Dans la pratique, pour les portes pivotant autour d'une rive, la liaison de cette dernière au dormant, puis de ce dernier au mur, fait que cette rive ne présente pas de déformation.

**Nota :** sa propension à la déformation est bien entendu la même que celle de la rive de battement, ce qui veut dire que les organes de rotation sont sous contrainte.

Si l'on veut stabiliser le vantail, il faudra agir au moins du côté du battement. Selon que le vantail est dans son dormant ou libre, on peut procéder de deux manières.

### ■ Vantail dans son dormant

La rive de battement étant maintenue en son milieu avec un régleur et un dynamomètre (ou une poulie, un cordon, un plateau et un jeu de masses), on procède à la mesure d'au moins un déplacement  $f$  pour une charge donnée  $P$ , appliquée normalement au plan du vantail dans un coin.

### ■ Vantail libre

Le vantail étant posé à plat sur un appui à chacun de ses quatre coins, on applique une charge 2 fois  $P$  au centre de la rive de battement et on enregistre simultanément le déplacement  $f$  que cette charge engendre.

**Remarque :** avec les deux méthodes, il faut que la charge soit suffisante pour que le déplacement soit enregistré avec suffisamment de précision. Une valeur de 10 mm est un minimum.

### ■ Exploitation des résultats

On calcule le rapport  $R_v$  de la réaction  $P$  d'une extrémité sur le déplacement  $f$  de la charge appliquée à mi-portée :

$$R_v = P/f$$

$P$  est exprimé en newtons et  $f$  en mètres. La rigidité  $R_v$  du vantail s'exprime donc en N/m.

#### Exemple :

$$P = 100 \text{ N} \quad f = 10 \text{ mm} \Rightarrow R_v = 200/(20 \cdot 10^{-3}) = 10^4 \text{ N/m}$$

**Commentaire :** la rigidité des portes à base de bois du marché (hors portes de conception particulière) se situe entre  $1 \cdot 10^4$  N/m (portes menuisées de 36 mm) et  $6 \cdot 10^4$  N/m (portes planes d'épaisseur 40 mm avec âme en panneau de particules rigides ou réseau de lattes de bois massif et faces en contreplaqué).

## 2.3 Contrôle de la déformation par la quincaillerie de verrouillage

Le marché de la quincaillerie propose des crémones avec mécanisme d'enclenchement automatique ou manuel (par levage de la poignée), dans les gâches du dormant, de rouleaux (ou d'inserts fonctionnellement équivalents).

Ce type de quincaillerie soulève deux types de problèmes : la capacité à compenser les déformations du vantail et l'effort de manœuvre sur la poignée. La **capacité de compensation** se manifeste à deux niveaux : l'amplitude de la déformation et le niveau d'effort au droit des ancrages.

#### ● Amplitude de la déformation :

Au-dessus d'une certaine valeur qui est fonction de la position des dispositifs d'ancrage par rapport à la poignée, les ancrages ne seront plus en mesure d'accrocher la gâche correspondante.

Soit :

- $f$  (mm) la déformation du vantail à ses extrémités,
- $H$  (m) sa hauteur,
- $d$  (m) la distance de l'ancrage par rapport au boîtier de crémonne,
- $c$  (mm) la capacité de compensation des ancrages.

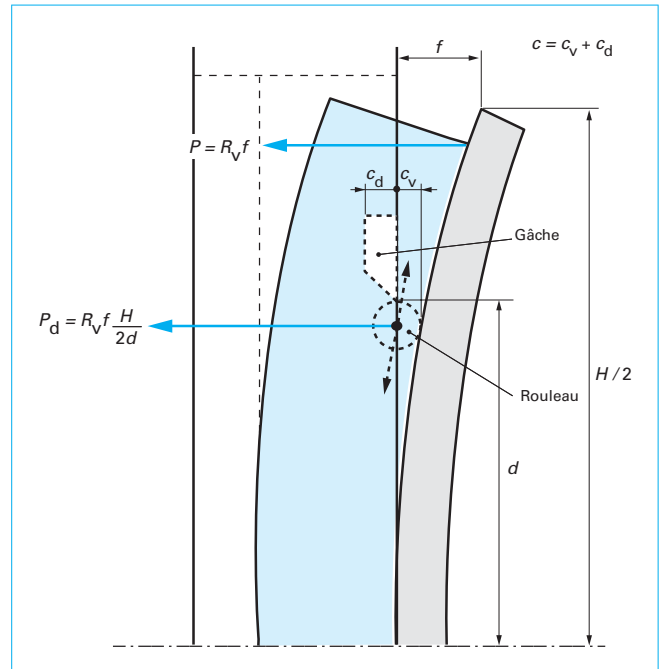


Figure 2 – Niveau d'effort au droit de l'ancrage

Pour que l'ancrage soit possible, la déformation du vantail devra être telle que :

$$f \leq \frac{H}{2d} c$$

Au-dessus de cette valeur, l'ancrage ne sera pas possible.

**Nota :** la courbure du vantail est ici assimilée à la corde qu'elle sous-tend.

#### ● Niveau d'effort au droit de l'ancrage (voir figure 2)

À un niveau donné (fonction de la démultiplication du mécanisme du boîtier de crémonne et de la conception de la liaison gâche-ancrage de la crémonne), la force nécessaire pour « replaquer » le vantail dans la feuillure du dormant excédera l'effort admissible sur la poignée (que ce soit pour la relever en cas de commande manuel du verrouillage, ou pour armer le déclenchement automatique des ancrages). En tout état de cause, il faudra que le couple exercé sur la poignée reste en deçà des 10 N · m.

C'est ici qu'intervient la rigidité du vantail. En effet, l'effort  $P_d$  pour « replaquer » le vantail dans la feuillure du dormant est donné par la formule suivante :

$$P_d = R_v f \frac{H}{2d}$$

L'effort de « replaquer » est donc directement proportionnel à la rigidité du vantail et se répercute aussi directement sur l'effort à la poignée.

Le système fonctionnera donc d'autant mieux que le vantail sera souple. Ainsi, il sera efficace pour une porte menuisée traditionnelle (35 à 40 mm d'épaisseur) mais, sauf sophistication de la commande du mécanisme, sera inefficace pour un vantail avec une rigidité de  $6 \cdot 10^4$  N/m.

**Nota :** ce type de quincaillerie, en sus du cintrage traité ici, peut aussi compenser la torsion du vantail (dans la mesure de son pouvoir de compensation).

## 2.4 Contrôle de la planéité par « raidisseur »

On distingue deux systèmes :

- les raidisseurs travaillant du fait du moment d'inertie de leur section ;
- les raidisseurs à réaction mécanique.

**Nota** : dans les deux cas, ils ne sont **efficaces que pour rattraper les phénomènes de cintrage hygrothermique**, ils ne sont donc aucunement en mesure de rattraper les vantaux voilés du fait de la fibre torse du bois.

### 2.4.1 Raidisseurs à inertie

Ils sont basés sur le principe suivant : la déformation que subit un vantail peut être reproduite mécaniquement :

- soit fidèlement par une **charge uniformément répartie** sur la surface du vantail (soit une charge vent si le vantail est vertical, soit par des masses si le vantail est disposé à plat) ;
- soit de manière approchée par une **charge ponctuelle** appliquée au milieu du battement, les extrémités de ce dernier reposant aussi sur des appuis ponctuels.

Dans les deux cas, la charge reproduit une déformation identique à celle que l'on peut observer sur place. On peut appeler charge hygrothermique celle qui reproduit cette déformation observée sur place. En pratique, on détermine les caractéristiques des raidisseurs à inertie en supposant l'hypothèse de charge ponctuelle.

Pour la détermination de la section du raidisseur, on peut procéder par calcul ou par expérimentation.

#### ■ Détermination expérimentale

##### ● Première phase :

- On place un vantail sur quatre appuis (aussi près que possible des points de fixation du raidisseur).
- On charge la partie centrale du battement et on note la flèche correspondante.

##### ● Deuxième phase :

- On place un raidisseur à chant sur deux appuis, au droit de l'endroit où l'on prévoit les fixations sur le vantail.
- On applique dans la partie centrale du raidisseur la même charge que sur le vantail et on note la flèche.

##### ● Troisième phase :

- Si la flèche observée sur le raidisseur est suffisamment faible, la section est acceptable.
- Si la flèche est trop importante, on augmente la hauteur de la section et on mesure la flèche sous la même charge.
- On répète l'opération jusqu'à obtenir une flèche acceptable.

**Critère d'acceptabilité de la flèche** : il y a deux types de raidisseur à inertie, ceux qui sont réglables et ceux qui ne le sont pas.

Pour le raidisseur réglable (une fixation centrale et une vis réglable à chaque bout s'il est monté sur la face intérieure, une vis centrale réglable et une fixation à chaque extrémité s'il est monté sur la face extérieure), compte tenu de la durée de la charge (plusieurs mois dans l'année), il faudrait que la flèche ne dépasse pas le 1/300 de la portée, soit environ 6 mm (un profilé pouvant cacher le jeu entre raidisseur et face de la porte), cela afin de limiter le fluage.

**Nota** : ce type de raidisseur peut permettre d'obtenir un **vantail parfaitement plan**.

Pour le raidisseur non réglable, la flèche acceptable sera inférieure au pouvoir de compensation de la garniture d'étanchéité de la liaison ouvrant-dormant, soit en pratique 2 mm au plus.

**Nota** : ce type de raidisseur doit être monté à **sec** (non collé).

#### ■ Détermination de la section par calcul

Cette partie comporte néanmoins une partie expérimentale qui consiste à déterminer la rigidité  $R_v$  du vantail (voir ci-dessus).

La **rigidité  $R_r$  du raidisseur** (en N/m) est donnée par la formule suivante :

$$R_r = \frac{24 E_r I_r}{H^3}$$

avec  $E_r$  (Pa) module d'élasticité du matériau dont est constitué le raidisseur,

$I_r$  (m<sup>4</sup>) moment d'inertie de la section,

$H$  (m) hauteur du vantail.

Si le raidisseur a une section rectangulaire pleine (bois) le terme  $I_r$  est donné par :

$$I_r = bh^3/12$$

d'où pour le raidisseur, avec la relation ci-dessus :

$$R_r = 2 E_r b \left( \frac{h}{H} \right)^3$$

avec  $b$  (m) largeur de l'assise du raidisseur sur le vantail,

$h$  (m) (ou mm si  $H$  en mm) hauteur de sa section.

Pour des profilés du commerce, on se reportera à la documentation technique du fournisseur qui donne le moment d'inertie  $I_r$  ainsi d'ailleurs que le module d'élasticité  $E_r$ .

La relation qui lie la rigidité du raidisseur  $R_r$  à celle du vantail  $R_v$  est fonction du type de raidisseur.

##### ● Raidisseur réglable :

$$R_r = R_v \left( \frac{f_h}{f_r} \right)$$

avec  $f_h$  déformation hygrothermique mesurée ou attendue sur le chantier,

$f_r$  flèche résiduelle admissible sur le raidisseur (1/300 suggéré).

##### ● Raidisseur non réglable :

$$R_r = R_v \left( \frac{f_h}{f_r} - 1 \right)$$

Les divers facteurs ont été définis ci-dessus ; toutefois,  $f_r$  devra être inférieure à la flèche admissible sur site ou au pouvoir de compensation du profilé d'étanchéité de la liaison ouvrant-dormant (cf. critère d'acceptabilité de la flèche du raidisseur déterminé expérimentalement).

**Remarque** : la section des raidisseurs non réglables est importante s'ils sont réalisés en bois (hauteur de section de plus de 100 mm, s'il s'agit de stabiliser des portes planes).

#### ■ Cas particulier des raidisseurs internes des portes planes

Cette solution ne peut se mettre en œuvre que lors de la fabrication (alors que le raidisseur en applique peut être mis en œuvre aussi bien à neuf qu'en réparation).

Compte tenu des limitations de la hauteur de section (égale à l'épaisseur de l'âme), le matériau constitutif ne peut être qu'à haut module d'élasticité (acier).

On a également intérêt à réduire autant que faire ce peut la rigidité propre du vantail (sans son raidisseur). Le choix d'un panneau et d'une âme avec des modules d'élasticité aussi bas que possible est à recommander.

**Remarque** : ceci n'est pas sans poser de problèmes avec les panneaux sous marque de qualité dans la mesure où les règles de qualité visent à accroître la performance de ce type de propriété. L'optimisation passerait donc plutôt par l'emploi de **panneaux spéciaux**.

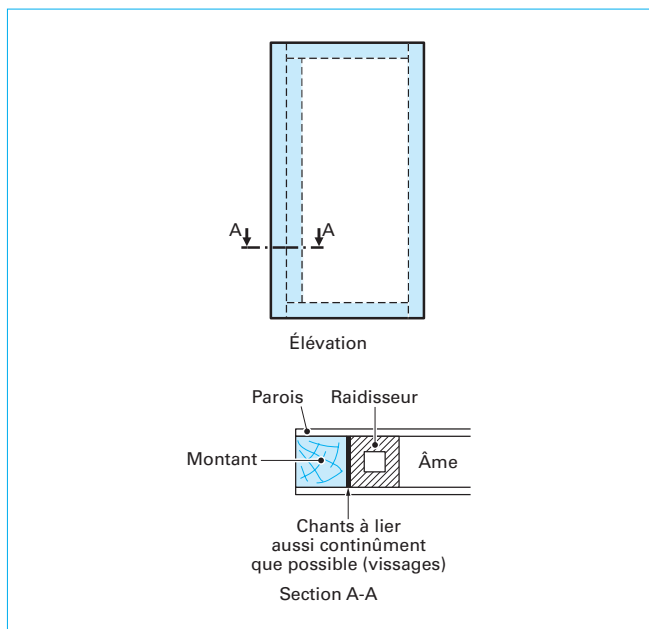


Figure 3 – Raidisseur interne d'une porte plane

On peut aussi envisager de remplacer le cadre du vantail, généralement en bois massif, par des montants à base de panneaux (MDF en pratique). En effet, le module d'élasticité de ce matériau représente moins du tiers de celui du bois massif. Il faut noter que, si le cadre des vantaux est en MDF, il convient de ménager un **jeu supplémentaire** dans la liaison traverse haute-dormant (pour compenser une variation dimensionnelle plus importante que celle du bois massif) en cas de reprise d'humidité.

Enfin, il faudrait également prévoir une liaison mécanique aussi continue que possible entre les chants en vis-à-vis du raidisseur métallique et du montant. Sinon, il y a poinçonnement des extrémités du raidisseur sur les parois minces (voir figure 3).

**Remarque :** pour les portes planes, on peut, au lieu de faire appel à la mesure expérimentale de la rigidité du vantail non équipé de son raidisseur, évaluer la rigidité du demi-vantail par calcul.

La rigidité du raidisseur est alors donnée par la relation suivante :

$$E_r I_r = E_v I_v \left( \frac{f_h}{f_r} - 1 \right)$$

avec  $f$  (mm) flèche,  
 $E$  (Pa) module d'élasticité,  
 $I$  (m<sup>4</sup>) moment d'inertie des sections

Indices :

$r$  raidisseur  
 $v$  vantail  
 $h$  flèche du vantail sans raidisseur.

## 2.4.2 Raidisseurs à réaction mécanique

### ■ Principe de fonctionnement de ces raidisseurs

Ils sont basés sur le phénomène suivant : la charge hygrothermique citée pour les raidisseurs à inertie induit les contraintes classiques de compression (face concave) et de traction (face convexe).

Le principe de fonctionnement de ces raidisseurs est de mettre en œuvre un dispositif s'opposant à la résultante de ces contraintes au droit du battement.

Selon que le dispositif est mis en œuvre sur la face convexe ou concave, on a respectivement un raidisseur travaillant en tension ou en compression.

**Nota :** dans la pratique, il n'existe que des raidisseurs travaillant en compression alors que ceux travaillant en tension seraient plus faciles à réaliser.

En pratique, ce type de raidisseur est constitué de deux tringles disposées le long du battement, d'un ancrage à chaque extrémité de tringle et d'un dispositif de réglage entre les deux tringles, dans la partie centrale.

Le dispositif de réglage a pour effet de créer un déplacement et donc un effort qui s'oppose à la résultante des efforts liés à la charge hygrothermique et tend donc à redresser le vantail.

### ■ Évaluation des contraintes à reprendre

À chaque extrémité du vantail, le raidisseur reprend l'effort  $P_r$  suivant :

$$P_r = R_v f_h \frac{H}{2d}$$

avec  $d$  distance entre l'axe médian du vantail et la ligne d'action du raidisseur.

### ■ Commentaire

Ce type de raidisseur, dans les réalisations qu'il connaît, induit des efforts considérables au niveau des ancrages.

En voici un **exemple** (système avec tringles en applique sur la face) :

$$R_v = 40 \cdot 10^4 \text{ N/m} \quad H = 2,04 \text{ m} \quad f_h = 20 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad d = 20 \cdot 10^{-3} \text{ m} \\ \Rightarrow P_r = 2,04 \cdot 10^4 \text{ N}$$

soit deux tonnes ; il faut donc que les ancrages dans le bois et des dispositions antifiambement des tringles soit étudiés spécifiquement, si le dispositif travaille en compression.

**Remarque :** même avec un vantail souple ( $R_v = 10 \cdot 10^4 \text{ N/m}$ ), l'effort à reprendre est quand même de 5 000 N.

Si tel n'est pas le cas, la compensation de la déformation sera partielle (au prorata de la contrainte locale admissible au droit des ancrages).

Là aussi le système fonctionne d'autant mieux que le vantail est souple.

Sur la conception du système, on a intérêt à accroître le déport entre l'axe du vantail et la ligne d'action du raidisseur (ce qui conduit à préconiser des systèmes travaillant en tension sur la face convexe).

## 2.5 Contrôle de la planéité par tôles symétriques collées

### ■ Mode d'action

Il est le suivant :

- mise en œuvre d'une paire de plaques de tôles (matériaux en feuille avec, par rapport au bois ou dérivé, un fort module d'élasticité) qui enserrant une âme, l'ensemble constituant donc une poutre rigide et stable car la paire de tôles constitue un pare-vapeur absolu ;
- collage sur cette poutre des faces de la porte (ou des montants), de placages ou de panneaux décoratifs présentant la plus faible rigidité. Cet habillage constitue l'élément déformant de la porte, la poutre centrale en constituant le raidisseur ;
- la rigidité relative de ces deux ensembles détermine la flèche résiduelle.



La technique s'emploie pour les vantaux de portes planes mais elle peut tout autant s'envisager sur le montant de battement des portes menuisées.

### ■ Portes planes

Le rapport de réduction de flèche ( $f_h/f_r$ ) est relié aux paramètres de constitution du vantail par la formule approchée suivante :

$$\frac{f_h}{f_r} = 1 + \frac{E_t}{E_p} \frac{e_t}{e_p} \frac{C_a}{C_b}$$

avec  $f_h, f_r$  flèches (déjà définies),  
 $E_t, E_p$  modules d'élasticité respectivement d'une tôle et de la paroi collée sur la tôle,  
 $e_t, e_p$  épaisseurs respectivement d'une tôle et de la paroi collée sur la tôle,  
 $C_a, C_b$  coefficients de rigidité de collage compris entre 0 (lien mécanique) et 1 (collage rigide, c'est-à-dire fait avec une colle dont le module d'élasticité est au moins égal à celui du bois massif) ; les valeurs intermédiaires correspondent à des collages faits avec des mastics (module d'élasticité inférieur à celui du bois massif et même à ceux des panneaux dérivés).

$C_a$  et  $C_b$  désignent les coefficients respectivement entre la tôle et l'âme et entre la face et la tôle.

#### Exemple :

- faces en contreplaqué de 3,2 mm, de  $5 \cdot 10^9$  Pa de module d'élasticité ;
- âme de 30 mm de  $10^9$  Pa de module d'élasticité ;
- tôle en acier de  $210 \cdot 10^9$  Pa de module d'élasticité ou d'aluminium de  $70 \cdot 10^9$  Pa de module d'élasticité ;
- coefficient de rigidité des collages égal à 1 (collage rigide).

Le tableau 3 donne les valeurs du rapport  $f_h/f_r$  en fonction de l'épaisseur d'une feuille de tôle.

La considération de la formule donnant  $f_h/f_r$  montre le sens de l'action sur les paramètres pour améliorer l'efficacité :

- accroître l'épaisseur et le module d'élasticité de la tôle (l'acier apparaît ainsi nettement plus favorable que l'aluminium) et faire un collage rigide entre la tôle et l'âme (si le collage est très souple, l'efficacité tend vers zéro) ;
- réduire l'épaisseur et le module d'élasticité des panneaux collés en face sur chaque tôle et faire un collage aussi souple que possible entre le panneau de face et la tôle sous-jacente.

Si l'on prend en compte l'ensemble des problèmes de stabilité, il faut aussi tenir compte des phénomènes de dilatation (cf. plus haut, le coefficient de dilatation de l'acier étant trois fois plus élevé que celui du bois massif).

**Nota :** sur ce plan, l'acier est aussi plus intéressant que l'aluminium puisque son coefficient de dilatation est environ deux fois moindre.

**Tableau 3 – Valeurs du rapport  $f_h/f_r$  en fonction de l'épaisseur d'une feuille de tôle**

| $e_t$ (mm) | Acier | Aluminium |
|------------|-------|-----------|
| 0,25       | 3,9   | 2,1       |
| 0,5        | 6,4   | 3,0       |
| 1          | 11,4  | 4,6       |
| 1,5        | 16,1  | 6,2       |
| 2          | 20,6  | 7,7       |

### Remarque sur la détermination des coefficients de rigidité du collage

#### ● Principe

Si deux pièces sont liées par collage, le moment d'inertie de l'ensemble constitué par ces deux pièces est donné par la formule classique :

$$I = I_1 + I_2 + S_1 d_1^2 + S_2 d_2^2$$

avec  $I_1, I_2$  moment d'inertie de la section de chacune des deux pièces,

$S_1, S_2$  aire de la section de chacune des deux pièces,

$d_1, d_2$  distance du centre de gravité de chacune des sections au centre de gravité commun.

Si le lien entre les deux pièces est purement mécanique, le moment d'inertie de l'ensemble constitué par les deux pièces se réduit à :

$$I = I_1 + I_2$$

Si le lien se fait par un collage plus ou moins souple, le moment d'inertie résultant des deux pièces assemblées aura une valeur intermédiaire entre ces deux extrêmes soit :

$$I = I_1 + I_2 + C (S_1 d_1^2 + S_2 d_2^2)$$

En pratique,  $C = 1$  si le module d'Young est au moins égal à celui de l'élément encollé ayant le plus faible module d'élasticité ; il sera inférieur dès que le module d'Young de la colle sera plus faible que celui de l'élément ayant le plus faible de l'ensemble collé.

#### ● Détermination pratique

La flèche est fonction de l'inverse du moment d'inertie de la section ( $f_c/f_1 = I_1/I_c$ ), on déterminera donc le coefficient de rigidité du collage par une mesure de flèche.

On dispose d'au moins deux paires de pièces de bois identiques en section (rectangulaire de côtés  $b$  et  $e$  pour plus de facilité) et en module d'élasticité ; l'une des paires est collée avec une colle rigide (module d'Young supérieur à celui du bois des deux pièces), et l'autre avec une colle souple (mastic, par exemple).

Le moment d'inertie de la section  $I_c$  de chacune des paires est alors donné par :

$$I_c = \frac{be^3}{2} \times \left( C + \frac{1}{3} \right)$$

Soit :

—  $f_1$  la flèche (mesurée en flexion 3 ou 4 points) de l'ensemble collé rigidement ;

—  $f_c$  la flèche, sous la même charge, de l'ensemble collé soupagement.

Le coefficient de rigidité  $C_r$  du plan de collage est donné par la relation :

$$C_r = \frac{4 \frac{f_1}{f_c} - 1}{3}$$

**Nota :** ce coefficient n'est pas absolu mais dépend du module d'élasticité du matériau le plus souple dans l'ensemble encollé. Ainsi selon que l'un des éléments assemblés est un contreplaqué ou un bois massif, la valeur du coefficient de rigidité pourra être différente.

### ■ Portes menuisées

Même si, dans la pratique, elle n'est pas utilisée, on pourrait mettre en œuvre la technique précédente au moins sur le montant de battement du vantail.

Le rapport de réduction de flèche est donné par la formule qui suit :

$$\frac{f_h}{f_r} = 1 + 12 \times \frac{b e_t E_t e_a^2}{R_v H^3}$$

|      |             |  |
|------|-------------|--|
| avec | $b$ (m)     | largeur du montant,  |
|      | $e_t$ (m)   | épaisseur de la tôle,  |
|      | $E_t$ (Pa)  | module d'élasticité de la tôle,                              |
|      | $e_a$ (m)   | épaisseur de la partie prise en sandwich par les deux tôles, |
|      | $R_v$ (N/m) | rigidité du vantail,   |
|      | $H$ (m)     | hauteur du vantail.  |

**Exemple :**  $b = 130 \cdot 10^{-3}$  m  
 $e_t = 1 \cdot 10^{-3}$  m  
 $E_t = 210 \cdot 10^9$  Pa  
 $e_a = 30 \cdot 10^{-3}$  m  $\Rightarrow f_h/f_r = 4,2$   
 $R_v = 10^4$  N/m  
 $H = 2,10$  m

### ■ Conclusions

La technique des tôles collées symétriques conduit aux conclusions suivantes :

- nécessité de maîtriser le collage bois-métal et sa pérennité (non-oxydabilité des tôles) ;
- problèmes de compatibilité avec les usinages postérieurs au collage (surtout sur chantier) ;
- technique la plus performante qui permet d'obtenir des flèches résiduelles très faibles ;
- la tôle d'acier peut jouer un rôle dans la fonction anti-effraction ainsi que dans l'isolation acoustique ;
- selon le matériau choisi, il faudra tenir compte de la dilatation (on préférera donc les matériaux ayant le plus faible coefficient de dilatation, sachant que l'habillage constitue un certain écran thermique qui réduit donc la température de la tôle) ;
- par tôle, il faut entendre matériau en feuille, il peut donc s'agir d'un matériau de synthèse ou composite (\*), ses propriétés essentielles étant d'avoir un module d'élasticité multiple de celui du matériau de parement et d'être... non hygroscopique !

(\*) On peut penser notamment à un composite à fibres de carbone.