

Fenêtres et portes extérieures bois

Analyse thermique. Choix du bois

par **Marcel DENANCÉ**

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

1. Rôle thermique de la fenêtre	C 3 615 - 2
1.1 Confort d'été	— 2
1.2 Confort d'hiver	— 2
1.2.1 Évolution technico-réglementaire	— 2
1.2.2 Déperdition	— 2
1.2.3 Apport solaire	— 3
1.2.4 Bilan	— 3
1.2.5 Conclusions	— 3
1.3 Idées d'évolution de la conception générale de la fenêtre	— 4
1.3.1 Rôle respectif du châssis et du vitrage dans la déperdition thermique	— 4
1.3.2 Proposition technique	— 5
1.4 Résistance au chocs thermiques	— 6
2. Critères de choix du bois d'une fenêtre	— 8
2.1 Bois massif	— 8
2.2 La durabilité en menuiserie extérieure	— 9
2.3 Bois collé	— 9
2.4 Panneaux dérivés du bois utilisés en remplissage	— 10

La fonction clos de la fenêtre couvre deux aspect :

- le contrôle de la perméabilité à l'air ;
- la résistance thermique.

Cette dernière est la résultante, au prorata de leurs aires respectives, de celle du vitrage et de celle du châssis (et donc de celle du bois).

L'élément nouveau de ces dernières années est le développement des verres à couches faiblement émissives et à remplissage par gaz rares qui leur procurent une meilleure résistance thermique que celle du châssis bois. Une telle constatation peut conduire à une remise en cause de la conception générale de la fenêtre.

La fonction clos de la fenêtre participe à celle du bâtiment. Elle doit donc être assurée durablement. La durée de vie en service s'obtient grâce au choix de :

- techniques d'assemblages judicieuses (voir [C 3 612]) ;
- bois à durabilité naturelle ou conférée adaptée aux besoins.

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

- Fonctions de base et terminologie [C 3 610] ;
- Conception de la liaison ouvrant-dormant [C 3 611] ;
- Techniques d'assemblage [C 3 612] ;
- Remplissages. Profils 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. Rôle thermique de la fenêtre

Le rôle thermique de la fenêtre étant important et complexe (voire avec des exigences contradictoires), un développement spécifique est proposé. Il traite du confort d'été, du confort d'hiver et des chocs thermiques.

1.1 Confort d'été

Le vitrage étant transparent, il laisse passer une énergie au *pro-rata* de son facteur solaire. Si, sur le parcours des rayons solaires, un écran n'est pas mis en œuvre avant d'atteindre le « clos », cette énergie peut faire monter la température à un niveau inconfortable (d'autant plus que l'isolation thermique des parois opaques est soignée) ; il faut donc, sur les façades exposées au soleil (notamment de sud-est à sud-ouest), prévoir un écran solaire entre l'extérieur et l'intérieur des locaux.

Définition : le facteur solaire est le rapport entre le flux d'énergie entrant dans le local et le flux d'énergie incidente. Le flux d'énergie entrant dans le local comporte un flux direct et un flux secondaire de réémission. Son évaluation se fait selon la norme EN 410.

Nota : voir Règles ThS des règles ThBAT liées à l'application de la réglementation thermique RT 2000.

Habitat individuel

La solution classique et la plus efficace consiste à mettre en œuvre des fermetures extérieures.

La ventilation de la lame d'air, comprise entre la fermeture et la fenêtre fermée, permet d'évacuer une bonne partie du flux de chaleur traversant le tablier.

Par ailleurs, le choix de la couleur influe notablement sur le flux traversant la fermeture : il est proportionnel à la température de surface ; or celle-ci peut varier de 40 °C pour un blanc brillant à 80 °C pour une finition noire mate.

Enfin, la résistance thermique de la fermeture joue également. Si elle s'accroît (en épaississant le tablier ou en mettant en œuvre un matériau plus isolant), le flux traversant diminue proportionnellement.

Tertiaire

Dans les locaux destinés à cet usage, les fermetures extérieures sont le plus souvent absentes. On recommande alors de mettre en œuvre des vitrages avec un facteur solaire de 15 à 20 % (alors qu'il est de 75 % environ pour une double vitrage classique). Toutefois, la technique du brise-soleil, réglable ou non, constitue une voie pertinente.

Des stores intérieurs complètent la fonction écran mais il faut les choisir de couleur claire et réfléchissants. Leur efficacité est moindre que celle des fermetures extérieures ou des brise-soleil car ils réémettent en infrarouge une partie de l'énergie qu'ils ont reçue au travers du verre (partie plus ou moins importante selon la couleur et le pouvoir réfléchissant).

Habitat collectif

Dans l'habitat ancien, les fermetures sont présentes et on est dans la situation de l'habitat individuel.

Dans l'habitat moderne, dans le meilleur des cas (appartements dits de « standing »), des fermetures sous la forme de volets roulants sont présents.

Toutefois, dans l'habitat social, les fermetures sont le plus souvent absentes, l'occultation solaire ne peut alors se faire que par l'intermédiaire des voilages et rideaux, donc avec une efficacité moindre. Cependant, la nouvelle réglementation thermique (RT 2000) devrait inverser le cours des choses.

1.2 Confort d'hiver

Le matériau verre n'est pas un bon isolant ; le rôle thermique d'un vitrage lui est procuré par :

- l'interposition de gaz sec entre les feuilles de verre (ce qui suppose un montage étanche de chacune des lames de gaz) ; cette méthode conduit aux vitrages isolants avec une ou deux lames de gaz (rare) ; le gaz dominant largement est l'air, l'argon commence à faire une apparition pour les produits les plus performants ;
- la mise en œuvre de couches faiblement émissives qui réfléchissent le rayonnement infrarouge.

Cette dernière technique se généralise.

Pour l'avenir, peut-être à dix ans, d'autres techniques sont envisagées pour un autre saut technologique, notamment les vitrages avec silice expansée à la place de la lame de gaz.

1.2.1 Évolution technico-réglementaire

La nouvelle réglementation thermique, applicable depuis le 1^{er} juin 2003 n'est pas étrangère à cet essor des vitrages à couches faiblement émissives. En effet, elle impose que le coefficient de transmission thermique de la fenêtre U_w ne doit pas être supérieur à 2,9 W/(m² · K). Cette valeur correspond au coefficient de déperdition thermique U_g d'un vitrage de 4/12/4 mm à glaces claires et lame d'air.

Quant à la baie, son coefficient de déperdition ne doit pas dépasser 2 W/(m² · K). Pour atteindre ce niveau de performance, il faut :

- soit mettre en œuvre une bonne fermeture avec un vitrage à couche faiblement émissive ;
- soit mettre en œuvre un vitrage à couche faiblement émissive de nouvelle génération et, selon la résistance thermique du châssis, à lame de gaz autre que l'air.

Remarque : cette nouvelle réglementation thermique prend en compte la normalisation européenne et modifie la terminologie habituelle. Ainsi, le coefficient de transmission thermique K est-il remplacé par le coefficient U (d'où la nouvelle appellation Th-U pour les anciennes règles Th-K).

Ces couches faiblement émissives, à base de métaux le plus souvent, sont mises en œuvre par projection cathodique sous vide sur la glace à l'issue du processus de fabrication.

Par ailleurs, pour réduire la convection de la lame d'air, ce dernier peut se trouver remplacé par un gaz rare, le plus souvent l'argon.

On arrive ainsi à des vitrages qui, en partie courante, ont un coefficient U_g de 1,1 W/(m² · K) [contre 2,8 W/(m² · K) pour le même vitrage à glace claire et lame d'air].

Cette évolution technico-réglementaire conduit à s'interroger sur la communication actuelle, encore reprise par la nouvelle réglementation. En effet, toute la communication technique sur la thermique des fenêtres se fait sur la seule déperdition matérialisée par le coefficient de transmission U_w (anciennement K_{nu}). Dans ces conditions, la paroi vitrée est très fortement désavantagée par rapport à la paroi opaque (qui de plus est moins coûteuse à réaliser). À l'aide de calculs issus des règles Th, on peut établir un bilan plus objectif tenant compte des apports solaires permis par les parties vitrées.

À titre d'exemple, le bilan (§ 1.2.2 à 1.2.5) sera opéré sur une saison d'hiver et sur une fenêtre de 1 m² représentative d'une position moyenne dans un pavillon.

1.2.2 Déperdition

La **déperdition, durant la période de chauffage** (en kWh), est donnée par la formule suivante :

$$W = AU_w \cdot DH$$

avec U_w [W/(m² · K)] coefficient de déperdition de la fenêtre,
 DH milliers de degrés-heures du site,
 A (m²) aire de la fenêtre.

- Pour l'aire, on prend $A = 1 \text{ m}^2$.
- U_w peut prendre les trois valeurs suivantes issues des règles Th-U (menuiserie en bois feuillu avec vitrage clair et avec vitrage gaz à couches faiblement émissives) :

$$U_w = 2,9 ; 1,9 \text{ et } 1,6 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

- la valeur de 2,9 correspond à une fenêtre en bois feuillu de 45 mm [soit avec un coefficient de déperdition thermique $U_f = 2,4 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$] avec verre clair de 4/12/4 ;
- celle de 1,9 correspond à la même fenêtre avec un verre ayant un coefficient de transmission thermique U_g de $1,2 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;
- celle de 1,6 correspond à cette dernière fenêtre équipée d'une fermeture en bois résineux (type volet battant de faible perméabilité (jeu sur une rive et bas et haut cumulés de moins de 8 mm)).

- Pour les degrés-heures, les valeurs forfaitaires des trois zones sont les suivantes (en milliers de degrés-heures) :

H1 (sensiblement la moitié nord de la France continentale) :

$$DH = 63$$

H2 la côte atlantique et le sud hors zone méditerranéenne) :

$$DH = 52$$

H3 (la zone de climat méditerranéen) : $DH = 37$

1.2.3 Apport solaire

L'apport solaire, durant la période de chauffage (en kWh), est donné par la formule suivante (règles Th-BV) :

$$A_s = AEF_{ts} F_{e1} F_{e2} C_1$$

avec	$A \text{ (m}^2\text{)}$	aire de la fenêtre,
	$E \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	ensoleillement vertical sud pendant la période de chauffage,
	F_{ts}	facteur de transmission solaire de la paroi (ou S des règles Th-S),
	F_{e1}	facteur d'ensoleillement lié aux obstacles, propre au bâtiment en question [compris entre 1 (pas d'obstacle) et 0,1],
	F_{e2}	facteur d'ensoleillement lié à l'environnement du bâtiment en question (écrans divers faisant varier le coefficient de 0,9 à 0,1),
	C_1	facteur d'orientation et d'inclinaison d'une paroi du bâtiment (égal à 1 pour une paroi verticale orientée au sud, mais pouvant descendre à 0,2 pour une paroi verticale plein nord ; il est supérieur à 1 pour les parties inclinées).

Ces quatre facteurs sont sans dimension.

Pour l'exemple, nous avons pris les valeurs suivantes. Elles peuvent refléter le cas d'un pavillon courant.

- $A = 1 \text{ m}^2$
- Ensoleillement selon des zones climatiques (en kWh/m²) :
 - H1 : $E = 410$
 - H2 : $E = 440$
 - H3 : $E = 460$
- $F_{ts} = 0,40$ pour les vitrages non traités et 0,36 pour le vitrage peu émissif face 3 et gaz, teinte moyenne.

Remarque : le repérage des faces des verres isolants se fait selon la convention suivante :

- face 1 : face extérieure du verre extérieur ;
- face 2 : face intérieure du verre extérieur ;
- face 3 : face extérieure du verre intérieur ;
- face 4 : face intérieure du verre intérieur.

La disposition de la couche émissive en face 3 est plus favorable pour le facteur solaire (la valeur de 0,36 de l'exemple ci-dessus deviendrait 0,30 en face 2) ; cette valeur doit donc être recommandée pour la thermique d'hiver.

La référence à la teinte moyenne correspond à un coefficient $\alpha = 0,6$ (coefficient d'absorption d'une paroi opaque).

Tableau 1 – Valeurs des facteurs $W - A_s$, A_s/W , U_{eq}

U_w [W/(m ² · K)]	Paramètre	Zone climatique		
		H1	H2	H3
2,9	$W - A_s \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	120	83	36,5
	$A_s / W \text{ (%)}$	34,6	44,9	66
	$U_{eq} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$	1,90	1,60	0,99
1,9	$W - A_s \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	62,9	37,8	6,5
	$A_s / W \text{ (%)}$	47,5	61,7	90,7
	$U_{eq} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$	1,00	0,73	0,18
1,6	$W - A_s \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	44,0	22,2	- 4,6 (1)
	$A_s / W \text{ (%)}$	56,4	73,3	1,08 (1)
	$U_{eq} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$	0,70	0,43	- 0,12 (1)

(1) Le bilan thermique est positif, la baie est au final un capteur solaire.

- $F_{e1} = 1$ (bâtiment sans obstacle propre)
- $F_{e2} = 0,55$ (environnement avec obstacles moyens)
- $C_1 = 0,7$ (fenêtres sur toutes les façades sauf la nord, avec une répartition uniforme).

1.2.4 Bilan

On calcule pour les trois types de fenêtres (correspondant aux trois valeurs de U_w) et pour les trois zones climatiques, le bilan par l'intermédiaire des trois facteurs :

- la **différence entre déperdition et apport solaire** $W - A_s$;
- le **rapport** A_s/W ;
- un **coefficient de transmission thermique équivalent** U_{eq} que l'on détermine ainsi :

$$U_{eq} = U_w \left[1 - \frac{A_s}{W} \right]$$

Nota : on transforme ainsi la déperdition résultante en coefficient de déperdition sur la même base de degrés-heures (DH).

Les valeurs de ces trois facteurs sont consignées dans le tableau 1.

1.2.5 Conclusions

Sachant que l'exemple correspond à l'ensemble des fenêtres, ramené au m², d'un pavillon moyen, on peut tirer des conclusions assez générales :

- L'apport solaire, par rapport à la déperdition, est au moins égal à près de 35 % de cette dernière avec un vitrage classique. Si l'on met en œuvre un vitrage de dernière génération (avec $U_g = 1,2 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$), cet apport passe à plus de 56 % dans la même zone climatique H1.
- La mise en œuvre des nouveaux vitrages à couches faiblement émissives et remplissage gaz argon divise par 2 l'énergie qu'il faut apporter (de 120 à 63 kWh/m² sur la saison de chauffe en zone climatique H1), les résultats sont encore meilleurs pour les zones H2 et H3.
- La présentation des performances thermiques des fenêtres sous le seul angle de la déperdition est très pénalisant. La seule présentation objective est celle d'un **coefficient de transmission thermique équivalent** U_{eq} dont la définition a été proposée ci-dessus. La présentation actuelle dessert franchement la fenêtre par rapport aux parties opaques.

Nota : l'inconvénient du facteur U_{eq} est qu'il doit être fondé sur des hypothèses sur la construction destinée à recevoir la fenêtre ; or ces hypothèses sont nombreuses.

• En combinant nouveaux verres et bonne fermeture, le coefficient de déperdition équivalent U_{eq} n'est pas très éloigné de celui d'une paroi opaque. Si le maître d'œuvre travaille l'orientation de ses façades par rapport au sud, s'il pondère la distribution et la surface de ses ouvertures par rapport au soleil, ce bilan peut encore être notablement amélioré.

• Enfin, la mise en œuvre de couches faiblement émissives sur l'une des faces du vitrage, couplée au remplissage à l'argon, donne des vitrages dont le coefficient de déperdition thermique, en partie courante, descend jusqu'à $1,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; or le coefficient de transmission équivalent du bois feuillu de 45 mm est de $2,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ soit exactement deux fois plus. Pour notre matériau, il s'agit d'une véritable révolution technique qui, en toute logique, devrait conduire à remettre en cause la conception générale de la fenêtre.

1.3 Idées d'évolution de la conception générale de la fenêtre

1.3.1 Rôle respectif du châssis et du vitrage dans la déperdition thermique

■ État des lieux des performances du châssis en bois et du vitrage

La déperdition thermique d'une fenêtre est la résultante de la déperdition du châssis et du vitrage.

La déperdition au droit du châssis est la résultante de l'épaisseur du châssis et de la nature du bois qui détermine le coefficient de transmission thermique du matériau.

Le tableau 2 donne les valeurs de coefficient de transmission U_f [en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] des châssis en bois en fonction de leur épaisseur et de la conductivité thermique λ du matériau.

Ainsi, pour une épaisseur de 56 mm, il n'est pas possible de descendre, avec du bois, en dessous de $1,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Ainsi pour les vitrages isolants classiques non traités (en vue de performances thermiques), le coefficient de transmission U_g est-il compris, pour les lames d'air comprises entre 6 et 15 mm et au-delà, entre 3,3 et $2,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Des bois, même denses, étaient plus isolants (par exemple $2,38 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ pour un châssis en bois de 45 mm).

■ Analyse quantitative

Jusqu'ici, le bois était toujours plus isolant que le vitrage. Dans ces conditions, un rapport aire de châssis sur aire de fenêtre hors tout élevé était favorable sur le plan thermique. En effet, le **coefficient de déperdition thermique** de la fenêtre U_w est donné par la formule suivante :

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + \ell_g \psi_g}{A_w}$$

avec	A_g	aire de vitrage,
	U_g	coefficient de transmission thermique du vitrage en partie courante,
	A_f	aire de châssis,
	U_f	coefficient de transmission thermique du châssis,
	ℓ_g (m)	périmètre de vitrage,
	ψ_g	coefficient de déperdition linéique du bord du vitrage ; il vaut, pour un intercalaire métallique, $0,08 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ si verre émissif, $0,05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ si verre clair,
	A_w	aire de la fenêtre.

Les aires A sont en m^2 et les coefficients U en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Si le bois est plus isolant que le vitrage, on a intérêt à accroître la proportion de l'aire de châssis sur l'aire totale de la menuiserie. Si le verre est plus isolant que le bois, il faut au contraire réduire la part de bois dans l'aire totale de la menuiserie.

Tableau 2 – Valeurs du coefficient de transmission U_f [en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] des châssis en bois en fonction de leur épaisseur et de la conductivité thermique du bois

λ (1).....[W/(m · K)]	0,13	0,15	0,18	0,23	0,29
Masse volumique					
• Feuillus.....(kg/m ³)	< 500	500 à 650	650 à 865	865 à 1 000	> 1 000
• Résineux(kg/m ³)	< 500	500 à 600	600 à 700	> 700	
e (mm)					
30	2,50	2,70	2,97	3,33	3,66
35	2,28	2,48	2,74	3,10	3,44
40	2,09	2,29	2,55	2,91	3,25
45	1,94	2,13	2,38	2,73	3,08
50	1,80	1,99	2,23	2,58	2,92
55	1,69	1,86	2,10	2,44	2,78
60	1,58	1,75	1,99	2,32	2,65
65	1,49	1,66	1,88	2,21	2,54
70	1,41	1,57	1,79	2,11	2,43

(1) Le coefficient λ dépend essentiellement de la masse volumique du bois. La valeur de 0,13 correspond aux bois résineux type épicéa.

Tableau 3 – Dimensions typiques de fenêtres et coefficient de transmission thermique correspondant

Hauteur tableau (cm)	115	125	135	135	145
Largeur tableau (cm)	100	120	120	140	140
A_f/A_w (%)	44,4	29,0	28,1	26,2	25,4
ℓ_g/A_w (m^{-1})	4,27	3,81	3,76	3,44	3,40
U_w [$W/(m^2 \cdot K)$]	2,1	1,9	1,8	1,8	1,8
Largeur blocs traverses : 100 mm Largeurs blocs montants de rives : 100 mm Largeur bloc montant central : 150 mm			$U_f = 2,78 W/(m^2 \cdot K)$: bois de conductivité thermique $\lambda = 0,18 W/(m \cdot K)$ et 45 mm d'épaisseur $U_g = 1,2 W/(m^2 \cdot K)$ $\psi = 0,08 W/(m \cdot K)$		

La première conclusion qu'impose une meilleure performance thermique du vitrage par rapport au bois est donc qu'il faut augmenter la part relative de ce dernier dans l'aire totale de la menuiserie. Dans une fenêtre à la française, la part de vitrage est de l'ordre de 60 % de l'aire hors tout de la menuiserie. Réduire la part de menuiserie revient donc à réduire la largeur des montants et des traverses ouvrantes et dormantes. Il est clair que cette réduction de la proportion de bois a une limite : les réservations nécessaires pour loger les composants de la menuiserie, notamment quincaillerie et vitrage ou autres remplissages. D'autre part, dans un système industriel, les sections bois étant constantes, la réduction des dimensions dans le plan des fenêtres implique l'augmentation de la part relative du bois.

Typiquement, pour des fenêtres à deux vantaux, on arrive aux dimensions du tableau 3.

Ainsi, entre une menuiserie de cotes tableau de 115×100 et une autre de 145×140 , le rapport de l'aire de bois à l'aire totale de la menuiserie varie-t-il de 44 % à 25 % et le coefficient de déperdition thermique passe-t-il de 2,0 à $1,8 W/(m^2 \cdot K)$.

Remarque : la déperdition du vitrage est le **cumul de la déperdition en partie courante** et de la **déperdition en périphérie**, au droit de l'intercalaire. Or ce terme, lorsque les intercalaires sont en métal, joue un rôle d'autant plus important que l'aire du vitrage est faible. On peut en effet écrire que le **coefficient de transmission résultant** du vitrage est donné par :

$$U_{gr} = U_g + 2\psi [(1/H) + (1/L)]$$

avec U_g [$W/(m^2 \cdot K)$] coefficient de transmission du vitrage en partie courante,

ψ [$W/(m \cdot K)$] coefficient de déperdition linéique,

H et L (m) dimensions du vitrage dans le plan.

On se rend compte que si H et L tendent vers 0, le rôle de la déperdition linéique s'accroît.

Exemple : avec :

$$U_g = 1,2 W/(m^2 \cdot K) ; \psi = 0,08 W/(m \cdot K)$$

$$H = 1,4 \text{ puis } 0,4 \text{ m} ; L = 1,40 \text{ m puis } 0,40 \text{ m},$$

on obtient respectivement :

$$U_{gr} = 1,43 \text{ et } 2,00 W/(m^2 \cdot K).$$

Ainsi, même dans un rapport périmètre sur aire favorable, la déperdition liée à l'intercalaire représente plus de 15 % de la déperdition en partie courante.

Il est évident que le prochain progrès technique des vitrages isolants est à accomplir sur ce point. On peut donc programmer une disparition progressive des intercalaires métalliques au profit d'intercalaires avec une base de matière organique permettant une réduction notable de la déperdition périphérique.

Tableau 4 – Coefficient de déperdition linéique ψ [$mW/(m \cdot K)$] pour divers coefficients de déperdition thermique U_g du verre en partie courante

U_g [$W/(m^2 \cdot K)$]	1,6	1,4	1,1	0,7
Aluminium	63	67	73	74
Swiss Spacer	40	42	47	49

Ainsi, avec le produit Swiss Spacer de Saint-Gobain Glass, on a les valeurs de déperdition linéique ψ [$mW/(m \cdot K)$] données dans le tableau 4 (source Mémento 2000 de cette société).

Nota : la « vieille » solution « Biver » de la société Saint-Gobain dans laquelle l'intercalaire était à base de mastic répondait déjà à ce souci.

1.3.2 Proposition technique

Le vitrage devenant plus performant que le châssis, on en arrive à proposer de ne plus mettre le vitrage en feuillure (ou système équivalent) mais à le mettre en œuvre **en applique** sur les vantaux.

Le principe d'une telle conception est illustré sur la figure 1 pour les façades panneaux et sur la figure 2 pour les fenêtres.

Nota : il s'agit d'un système à lien mécanique ; une conception avec liaison du vitrage par collage est également concevable (tout en n'oubliant pas la fonction arrêt d'eau).

On peut évaluer le bonus thermique qu'apporte cette solution.

1.3.2.1 Bonus thermique

La déperdition thermique se calcule avec les équations suivantes :

• Le **coefficient de transmission thermique de la fenêtre**, U_w , est donné par :

$$U_w = (A_f U_f + A_\ell U_\ell) / A_w$$

avec A_f aire du dormant dans le plan,

U_f coefficient de transmission thermique du dormant,

A_ℓ aire du vantail dans le plan,

U_ℓ coefficient de transmission thermique du vantail,

A_w aire de la fenêtre hors tout

Les aires A sont en m^2 et les coefficients U en $W/(m^2 \cdot K)$.

• Le **coefficient de transmission thermique du vantail**, U_ℓ , est donné par :

$$U_\ell = (A_{f\ell} U_{f\ell} + A_g U_g + \ell_g \psi) / A_\ell$$

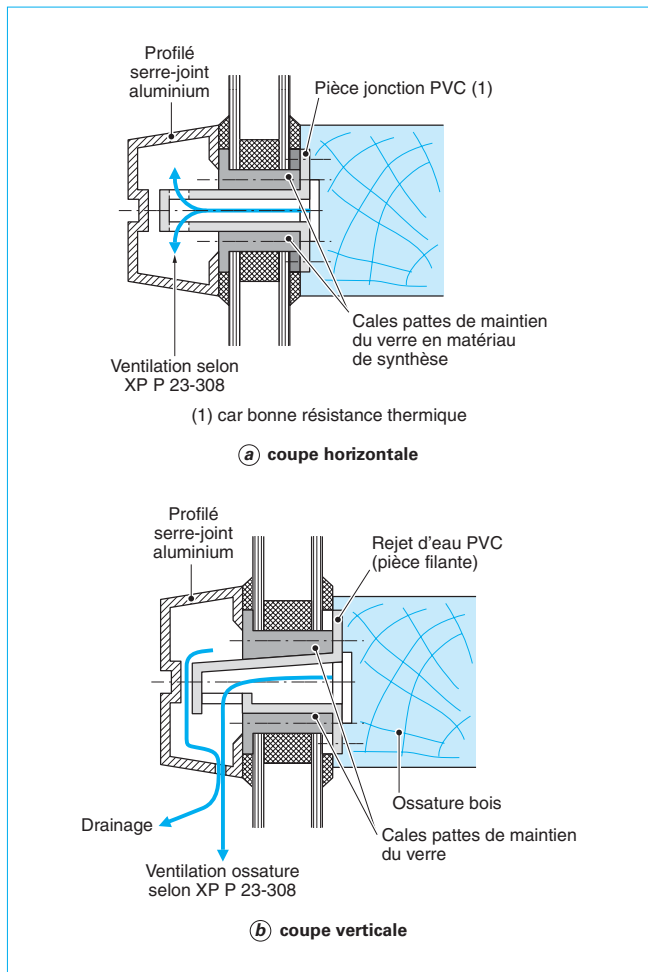


Figure 1 – Façade panneau bois-verre : principe de la liaison vitrage-ossature

avec A_{fe} aire du cadre du vantail,
 U_{fe} coefficient de transmission thermique du châssis du vantail recouvert par le verre,
 A_g aire du clair de vitrage,
 U_g coefficient de transmission thermique du vitrage,
 ℓ_g périmètre du vitrage,
 ψ coefficient de transmission thermique linéique du vitrage,
 A_ℓ aire du vantail.

Les aires A sont en m^2 et les coefficients U en $W/(m^2 \cdot K)$.

Dans cette formule, U_{fe} est donné par :

$$(1/U_{fe}) = (1/U_g) + (e_{fe}/\lambda_{fe}) - 0,17$$

avec U_g [$W/(m^2 \cdot K)$] coefficient de transmission thermique du verre,
 e_{fe} (m) épaisseur du bois du cadre du vantail,
 λ_{fe} [$W/(m \cdot K)$] coefficient de transmission thermique du bois du vantail.

Avec une telle conception, l'amélioration de la résistance thermique du vitrage apporte une amélioration proportionnelle de la résistance thermique de la fenêtre. Cette amélioration est d'autant plus marquée que le différentiel des coefficients de transmission thermique verre-châssis est élevé.

Pour un châssis de vantail de 45 mm en bois feuillu ($\lambda = 0,18 W/(m^2 \cdot K)$) et pour un vitrage de $1,2 W/(m^2 \cdot K)$ de coefficient de transmission thermique, le gain, sur une fenêtre de $1,45 m \times 1,40 m$ (cotes tableau), est de $0,46 W/(m^2 \cdot K)$ par rapport à une fenêtre de conception traditionnelle (correspondant au tableau ci-avant).

1.3.2.2 Remarques

● Comme le verre recouvre le vantail et que la largeur des pièces du châssis est plus grande que la hauteur de l'intercalaire du vitrage, le châssis est donc partiellement visible au travers du vitrage. On a deux options pour masquer la vue du châssis :

- appliquer une finition opaque en bordure du verre intérieur ;
- élargir le recouvrement du dormant sur la face extérieure du vantail ; on obtient ainsi un ouvrant caché (c'est cette option qui a été retenue pour les croquis joints).

Cette option de dormant caché conduit à un recouvrement de grande largeur incompatible avec la stabilité du bois. On est donc amené à réaliser ce recouvrement de dormant avec un matériau extrudable, par exemple de l'aluminium. On réalise ainsi une fenêtre mixte « sans entretien ».

● La pose en applique du vitrage requiert l'usage d'un cadre de liaison à assemblages étanches pour lequel nous recommanderions un matériau avec un faible coefficient de transmission thermique. En l'état actuel de l'offre, le PVC serait le plus recommandé [$\lambda = 0,17 W/(m \cdot K)$] comparable à celui des bois feuillus].

Un système remplaçant ce cadre par quatre cales de supports disposées aux quatre angles est également envisageable. La fonction arrêt d'eau conduirait à prévoir un débord périphérique du verre par rapport à la feuillure du vantail.

● Cette pose en applique du vitrage permet une adaptation de la menuiserie à la diversité des épaisseurs du verre avec un surcoût marginal : les dimensions du châssis bois restent inchangées, seule la largeur du profilé de liaison du vitrage doit augmenter sa largeur, et la forme du profilé dormant recouvrant doit être adaptée.

Avec un vitrage posé en feuillure (ou en rainure), l'accroissement de l'épaisseur du verre entraîne nécessairement celle des châssis récepteurs en bois (sauf à prévoir des châssis bois avec une épaisseur correspondant au vitrage le plus épais, fût-il minoritaire).

● Enfin, cette conception met le vantail en abri complet vis-à-vis des intempéries (et même des condensations liées au pont thermique que constitue l'intercalaire du vitrage isolant). On arrive à une fenêtre dont la classe de risque fongique se situerait au niveau 2.

1.4 Résistance aux chocs thermiques

Sous l'effet de chocs thermiques liés à une installation différentielle, les vitrages peuvent se rompre. Cette source potentielle de désordre est à mettre au compte des propriétés physico-mécaniques du vitrage.

■ Propriétés physico-mécaniques du verre

Si le verre est un matériau rigide (module d'élasticité E de $72\,000 N/mm^2$), il est très fragile (contrainte de rupture en flexion σ de $40 N/mm^2$). Par ailleurs, la qualité de l'usinage des bords a une influence notable sur la résistance limite : un bord brut de coupe présente de multiples microamorfes de rupture.

D'autre part ce matériau, comme tous les autres, varie dimensionnellement avec la température. Son coefficient de dilatation δ est de $9 \cdot 10^{-6}$.

Comme, énergétiquement parlant, il n'est pas parfaitement transparent (facteur solaire toujours inférieur à 100 %), il capte une partie de l'énergie incidente d'autant plus importante que son facteur

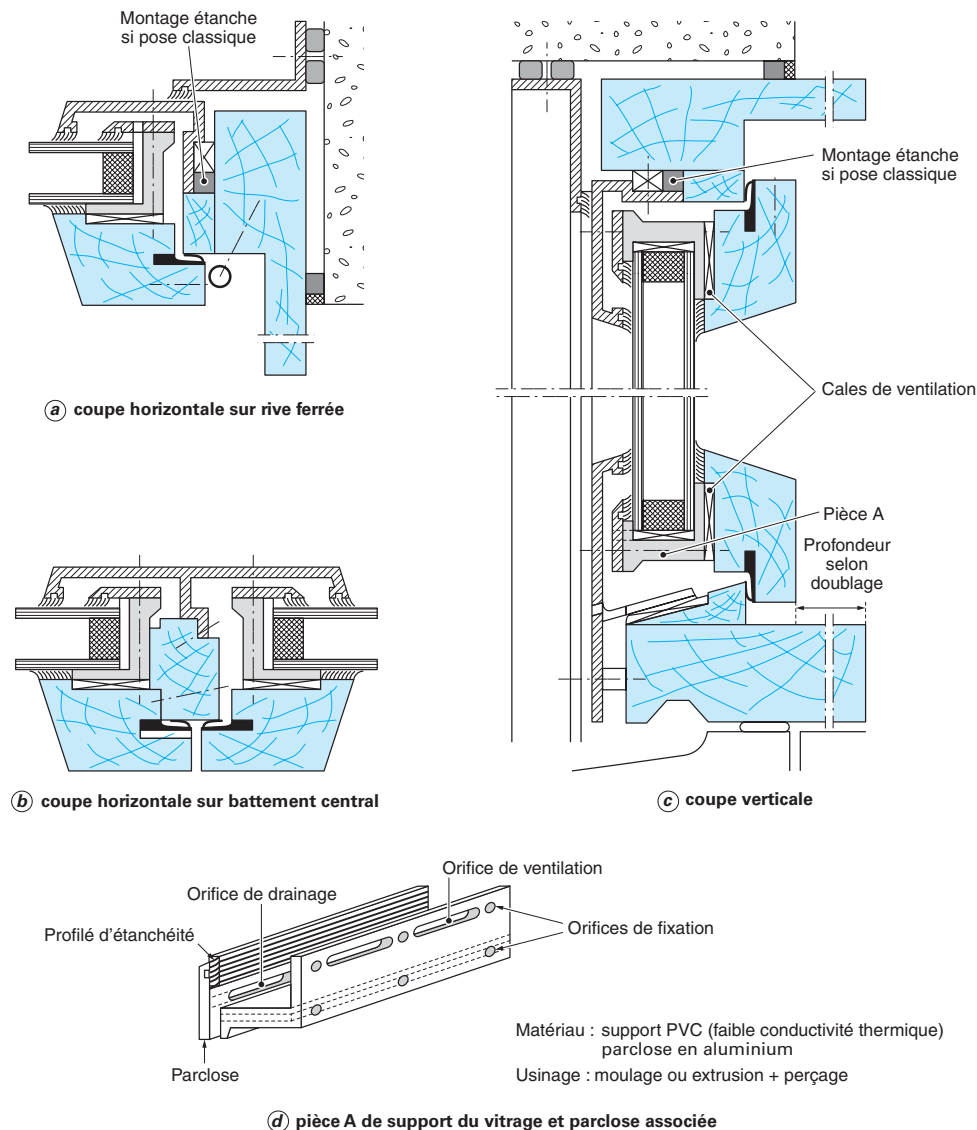


Figure 2 – Principe de fenêtre à vitrage en applique

solaire est faible et cette chaleur absorbée accroît la température du vitrage, au moins localement.

■ Explication de la rupture

Si, pour des verres clairs (facteur solaire d'environ 90 %), la projection d'ombre sur le vitrage n'induit pas de désordre, pour des verres avec facteur solaire faible, la présence d'ombres portées sur le vitrage peut être fatale à ce dernier.

Pour ces verres à facteur solaire faible, le processus pouvant conduire à la rupture est le suivant :

- la présence d'une zone d'ombre implique l'établissement d'une température plus faible dans cette zone ;
- au contraire, dans la zone insolaire, l'absorption du rayonnement conduit à une température plus élevée du verre ;

— comme le verre n'est pas stable dimensionnellement, il se manifeste une différence de dilatation entre zone d'ombre et zone éclairée ;

— cette dilatation différente induit une contrainte au voisinage de l'interface entre les deux zones.

La valeur de la contrainte exercée dans le vitrage (en N/mm²) est donnée par :

$$C = E \delta \Delta T$$

avec E (N/mm²) module d'élasticité du verre,

δ (1/K) coefficient de dilatation du verre,

ΔT (K) différence de température.

Lorsque C atteint la contrainte de rupture, le verre se brise.

Exemple : avec les valeurs données ci-dessus, on peut déterminer l'écart de température conduisant à la rupture :

$$\Delta T = \sigma / (E \delta) = 61,7^\circ \text{C}$$

Comme E et σ sont des valeurs moyennes et comme la qualité de découpe des bords joue un rôle important dans le déclenchement de la casse, on peut rencontrer des cas de rupture avec une différence de température nettement plus faible (en pratique, à partir de 30°C).

■ Remède

La solution passe, lorsque leur facteur solaire est élevé, par la mise en œuvre de **verre trempé**. En effet, cette technique permet pratiquement de tripler la contrainte de rupture du verre (qui passe de 40 à 120 N/mm²), ce qui permet d'augmenter dans le même rapport la plage des écarts de température pouvant se rencontrer sur une même feuille de verre.

Le **rodage des bords**, en supprimant les microamorfes de rupture, permet également de reculer le seuil de rupture, mais l'amélioration est moins aisément quantifiable.

2. Critères de choix du bois d'une fenêtre

La fabrication fait intervenir du bois massif ou collé et éventuellement des produits dérivés du bois (panneaux).

2.1 Bois massif

■ Choix d'aspect

Le fabricant définit les classes d'aspect utilisées lors de la fabrication telles que précisées dans les normes actuelles :

- NF EN 1611-1 : Classement d'aspect des bois résineux (*sciages*) : épicéa, sapin, pin et douglas d'Europe (classes 0, 1, 2, 3 et 4 pour 2 ou 4 faces ou rives) ;
- NF EN 975-1 : Classement d'aspect des bois feuillus (*sciages*) : chêne, hêtre (classes A, 1 (a et b pour les avivés), 2 et 3 ;
- NF EN 942 (norme dont la révision est prévue) : Classification générale de la qualité du bois (*dans les menuiseries*).

Il peut tenir compte de la présence systématique d'une face cachée sur les profilés en bois : partie du dormant cachée dans le gros œuvre ou son doublage isolant ou, pour les fenêtres mixtes, face bois de liaison mixte.

Nœuds, gerces et orifices d'insectes ne doivent compromettre ni l'étanchéité ni la durabilité de l'ouvrage.

Enfin :

- pour les pièces travaillant au vent (vantaux et meneaux ou traverses intermédiaires pour les dormants), le diamètre de nœuds ne doit pas dépasser 25 % de la face ou de la rive sur laquelle ils apparaissent ;
- pour les pièces ne travaillant pas (parties du dormant fixées dans le gros œuvre), cette proportion ne doit pas dépasser 1/3 de la face ou de la rive où affleure le nœud.

■ Caractéristiques technologiques

● Résineux

Leurs cernes doivent être étroits et réguliers, sinon ils doivent être lamellés.

Si, à l'exposition au soleil, ils sont susceptibles d'exsuder de la résine, il faut les sécher à haute température (80°C et plus), afin de faire exsuder un maximum de résine lors de cette opération.

● Feuillus

Si le bois a une structure hétérogène (bois d'été bien différencié du bois de printemps comme c'est le cas par exemple du chêne), il faut que les cernes soient étroits et réguliers. Sinon, le bois risque de présenter des retraits importants et irréguliers induisant des déformations inacceptables en service.

Il est recommandé que le retrait volumétrique total ne dépasse pas 15 %.

Remarque : le **retrait volumétrique total** est la réduction de volume que subit une pièce de bois passant de l'état de saturation (soit 25 à 30 %) à l'état anhydre ; pour le chêne, cette valeur est de 15 % (mais seulement 8 % pour le doussé et 9 % pour le teck).

La lamellation peut améliorer le comportement mais un fort retrait volumétrique total induit, en cas d'hétérogénéité d'humidité entre lamelles, des contraintes plus élevées dans les plans de collage. Cette caractéristique conduit donc à préférer des colles à performances mécaniques élevées.

■ Caractéristiques physiques

● Humidité

Le taux d'humidité du bois ne doit pas dépasser 18 % en atelier. De plus, en cas de collage, ce taux d'humidité, ainsi que la différence de taux d'humidité entre deux pièces adjacentes, doivent être compatibles avec les performances de la colle utilisée.

● Durabilité

Les conditions d'exposition d'une menuiserie extérieure conduisent à une classe de service 3.

Les spécifications de la norme NF P 23-305, relatives à la durabilité des bois, naturelle ou conférée, s'appliquent donc.

Pour une menuiserie de classe de service 3, la sélection des essences, selon les classifications de durabilité naturelle (vis-à-vis du risque fongique) et d'imprégnabilité définies dans les normes NF EN 350-1 et NF EN 350-2, se fait selon le tableau 5.

La liste des essences utilisables en menuiserie extérieure, en annexe de la norme NF P 23-305, complète celle déduite de la norme NF EN 350-2 et du tableau 5.

Si, en faisant appel aux méthodes décrites dans l'annexe A de la norme XP P 23-308 relative aux liaisons mixtes de menuiseries extérieures, on démontre que la salubrité de la liaison mixte entraîne une classe de risque fongique moindre (classe 3a voire classe 2) que celle induite par une classe de service 3b, il n'y a pas, vis-à-vis des critères d'imprégnabilité et de durabilité naturelle, de limite dans le choix des essences.

Tableau 5 – Guide pour la sélection d'essences

Imprégnabilité	Durabilité naturelle					
	1	2	3	3v ou 3-4	4	4-5 ou 5 ou aubier
1	0	0	0	F	F	F
2	0	0	0	F	F	F
2-3 ou 3	0	0	0	F	F	N
3-4 ou 4	0	0	0	F	N	N
0 : traitement fongicide sans objet si purge complète de l'aubier. F : traitement fongicide obligatoire. N : essence non utilisable pour fenêtres en classe de risque 3a.						

Pour des essences absentes de ces deux normes et dont l'utilisation serait envisagée pour la fabrication de menuiseries extérieures, les classifications de durabilité naturelle et d'imprégnabilité doivent se faire selon les méthodes citées dans les normes NF EN 350-1 et NF EN 350-2 ou des méthodes dérivées.

2.2 La durabilité en menuiserie extérieure

Une menuiserie est en classe de service 3 avec des humidifications dépassant 20 % (seuil de déclenchement de la pourriture) avec retour en dessous de cette valeur.

Le bois doit donc être durable soit naturellement (moyennant purge totale de l'aubier) soit par traitement. Le traitement doit concerner tout le volume humidifiable. En pratique, on arrive aux prescriptions suivantes :

■ Menuiserie à assemblages collés

- traitement avec un produit CTB-P+ ;
- sur 3 mm en bois de fil, présence de 50 % de la teneur létale (valeur critique) de ce produit ;
- sur 25 mm en bois de bout, présence significative de produit biocide.

■ Menuiserie finie avant assemblage (de type mécanique)

- traitement avec un produit CTB-P+ ;
- sur 3 mm en bois de fil, présence de 50 % de la teneur létale (valeur critique) de ce produit ;
- sur 10 mm en bois de bout, présence significative de produit biocide ;
- finition en bois de bout avec reprise d'eau de moins de 30 % par rapport à un témoin brut.

Remarques :

- Pour les bois facilement imprégnables (classe 1), 100 % de la valeur critique est requise en bois de fil.
- Il est concevable de mettre en œuvre des bois bénéficiant d'un traitement de classe 4 qui signifie une préservation de toute la masse de bois peu durable. Dans ce cas, l'usinage est compatible avec le maintien de bois préservé.

■ Procédés d'application

Si, pour la charpente (classe de risque 2), une application par aspersion, voire par brossage, suffit, en menuiserie extérieure à assemblages collés, le procédé d'application minimal est le trempage (3 minutes en général) sur pièces (avant le cadrage).

Remarque : l'exigence d'étanchéité des assemblages rend l'application du traitement sur ensembles cadrés incompatible avec la nécessité de pénétration de produits biocides dans les bois de bout des arasements masqués par les parties filantes de l'assemblage.

Alternativement au trempage, une application par double vide peut être faite dans une enceinte de type autoclave. Schématiquement, on procède de la façon suivante :

- les pièces étant en place, faire un vide partiel ;
- remplir la cuve de produit biocide ;
- vider la cuve après un certain temps de trempage ;
- faire un vide final servant à ressuyer les bois.

Pour les menuiseries à finition sur pièces, l'application peut être faite par trempage ou aspersion.

Remarque : la faiblesse de pénétration en bois de fil (3 mm) et en bois de bout (25 mm) est comparativement faible par rapport aux volumes de bois éliminés par l'usinage. Il est donc impératif que ce type de traitement se fasse après tout usinage (y compris perçage) et même après ponçage.

2.3 Bois collé

■ Exigences générales

Les exigences relatives aux choix d'aspect et d'essences, les caractéristiques technologiques et physiques sont les mêmes que celles du bois massif.

Les caractéristiques mécaniques doivent être compatibles avec la conception de l'ouvrage et les contraintes liées à l'exposition.

Le collage du matériau doit être adapté à la classe de service (cf. ENV 1995-1-1).

En classe de service 3, les colles employées doivent être de type D4 selon NF EN 204.

Tous les joints de collage susceptibles d'être humidifiés doivent être jointifs.

■ Qualification

Pour les menuiseries de classe extérieure, on qualifie les plans de collage entre lamelles et, s'il y en a, ceux des aboutages.

• Aboutages

a) Étanchéité : on isole les plis aboutés et on les réduit à une épaisseur de 25 mm au plus.

Sur cet échantillon de pièces, on monte, de manière étanche, des parois de façon à pouvoir faire, ultérieurement, un aquarium.

Cet échantillon est exposé pendant deux semaines dans un climat à 85 % d'humidité relative puis pendant deux autres semaines dans un climat à 30 % d'humidité relative (toujours à une température de 23 °C), on remplit les aquariums de 60 mm d'eau et on maintient cette mise en eau pendant une heure.

L'exigence est qu'il n'y ait pas d'infiltration au droit des entures de l'aboutage.

b) Résistance mécanique : on soumet un échantillon de pièces à un test de flexion 4 points selon NF EN 408.

La résistance à la flexion, à 12 % d'humidité, doit être d'au moins 17 MPa.

Remarque : cette valeur s'adresse à des bois résineux (ou des feuillus de masse volumique similaire). Pour des bois feuillus de masse volumique plus importante, la contrainte de rupture est plus élevée, il convient donc de relier cette valeur à celle du bois massif sans défaut.

• Lamellation (ou délamination)

La qualification comporte une épreuve et un contrôle.

a) Épreuve : il s'agit d'une immersion de 16 heures dans de l'eau à 20 °C suivie d'une séchage à 50 % pendant 24 heures dans une étuve ventilée.

b) Contrôle : on mesure, au droit des coupes de bout, le linéaire de joint ouvert et on le rapporte au linéaire total de joint au droit de ces coupes. On obtient ainsi le taux de délamination.

Alternativement, on peut aussi mesurer l'effort de cisaillement de compression appliqué de part et d'autre du joint et qui conduit à la rupture du plan de collage, on rapporte cet effort à l'aire cisailée. Dans ce cas, on mène aussi en parallèle le même essai de cisaillement sur le lot d'éprouvettes témoins appariées avec celles ayant subi l'épreuve. On calcule ensuite :

- le coefficient de variation de la contrainte de rupture initiale ;
- le rapport entre la moyenne de rupture du lot d'éprouvettes vieillies et celle du lot témoin.

c) Exigences : la délamination moyenne ne doit pas dépasser :

- 10 % pour des bois destinés à la classe de service 3 ;
- 20 % pour des bois destinés à la classe de service 2.

Remarque : ces valeurs correspondent à l'épicéa ou au pin sylvestre. En effet, la délamination dépend de la masse volumique du bois. Pour d'autres essences, la limite du taux moyen de délamination est donnée par la formule suivante :

$$D_m = K \left[33 \frac{m_v}{1000} - 7 \right]$$

avec m_v (kg/m³) masse volumique moyenne du bois collé,
 K coefficient selon la classe de service à laquelle est destiné le bois soit :
 $K = 1$ pour la classe de service 3,
 $K = 2$ pour la classe de service 2.

À défaut, le contrôle par cisaillement doit donner les résultats suivants :

- coefficient de variation de la contrainte de rupture initiale ne dépassant pas 20 % ;
- contrainte résiduelle moyenne d'au moins :
 - 70 % pour des bois destinés à une classe de service 3,
 - 35 % pour des bois destinés à une classe de service 2.

2.4 Panneaux dérivés du bois utilisés en remplissage

Ces panneaux et les éventuels matériaux isolants associés ainsi que leur liaison doivent être compatibles avec la classe de service 3.

Toutefois, si l'application de la procédure définie à l'annexe A de la norme XP P 23-308 démontre une salubrité suffisante de la mise en œuvre, en particulier au droit de leurs chants et des fixations qu'ils peuvent comporter, des panneaux destinés à une classe de service 2 peuvent être utilisés.

Pour les panneaux de contreplaqué, le fabricant définit les classes d'aspect utilisées lors de la fabrication telles que précisées dans les normes NF EN 635-2 et NF EN 635-3.

Rappel : pour des raisons esthétiques (risque de taches), il faut prévoir, en cas de finitions transparentes, des panneaux de contreplaqué à collage mélamine (tout en étant conforme aux spécifications des collages de type 3 prévus par la norme NF EN 314-1 et NF EN 314-2).