

DIMENSIONNEMENT AU FEU DES ASSEMBLAGES TRADITIONNELS BOIS CONFORMEMENT AUX EUROCODES



FINANCEMENT

CODIFAB

comité professionnel de développement
des industries françaises de l'ameublement et du bois

AUTEUR



Frédéric ROSSI

COMITE DE PILOTAGE

Nous remercions les membres du Comité de Pilotage qui ont su orienter au mieux la rédaction du présent guide pour qu'elle corresponde aux attentes réelles des concepteurs et réalisateurs de structures bois.

Rodolphe MAUFRONT
Gilles MARMORET
Guy-Noël POTRON
Thomas FERET

UMB FFB
CAPEB UNA CMA
CAPEB UNA CMA
FIBC

GROUPE CONSULTATIF D'EXPERTS

Nous remercions les experts de Groupe Consultatif pour leurs apports tant scientifiques et techniques que pratiques à ce guide, sans lesquels il ne serait certainement pas aussi complet et juste.

Laurent BLERON
Renaud BLONDEAU-PATISSIER
Julien BRASSY
Lionel CABATON
Benoit DE TERNAY
Gilles DE ZUTTER
Dhionis DHIMA
Loïc DUBUC
Stéphane HAMEURY
Laurent LE MAGOROU
Etienne LEROY
Sergio MEDEL
Rodolphe MORIZE
Damien QUIDET
Patrick RACHER
Cédric ROUX
Jacques Long TRINH
François VARACCA
Jean-Luc ZINS

ENSTIB
WOODEUM
FCBA
ARBONIS
CHARPENTES FRANCAISES
MITEK
CSTB
CUIILLER
CSTB
FCBA
ITECH
MDBAT
CHARPENTES FRANCAISES
ITECH
POLYTECH CLERMONT-FERRAND
POULINGUE
Consultant
SFS INTEC

PREAMBULE

Un des aspects essentiels à maîtriser pour concevoir une structure en bois est celui des assemblages. Qu'ils soient réalisés de manière traditionnelle en bois, ou par l'intermédiaire de connecteurs métalliques ou autres (tiges, plaques, assembleurs tridimensionnels, etc.), les assemblages sont stratégiques pour la performance fonctionnelle et économique des structures bois.

La performance des assemblages est d'autant plus importante dans les zones de fort vent, les zones sismiques, et dans les structures soumises à de fortes charges ou moments d'encastrement importants. La compétition de la structure bois, dont les assemblages sont relativement souples, avec d'autres structures telles les structures acier, béton ou la maçonnerie accentue encore l'importance des assemblages.

Les méthodes de justification des assemblages de structures bois introduites par l'Eurocode 5 permettent d'optimiser ces assemblages, en contrepartie d'un temps d'étude important. Pour les structures bois courantes le temps d'étude est difficilement valorisable et doit être limité.

Aussi l'Eurocode 5 ne traite que partiellement et indirectement des assemblages traditionnels bois-bois. Les bureaux d'études doivent aujourd'hui souvent adapter des méthodes de justification issues des règles CB, au cas par cas. En particulier il n'existe à ce jour aucune méthode consensuelle de justification des assemblages traditionnels bois-bois en situation d'incendie.

C'est dans ce cadre que le CODIFAB (Comité professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois), à la demande des organisations professionnelles UMB FFB (Union des Métiers du Bois), CAPEB UNA CMA (Union Nationale Charpente Menuiserie Agencement) et FIBC (Fédération de l'Industrie Bois Construction), a confié à C4Ci le soin de réaliser un guide pour le dimensionnement des assemblages traditionnels de structures bois en situation d'incendie.

Le présent guide a pour objectif double de :

- Fournir des méthodes de dimensionnement des assemblages traditionnels bois-bois en situation d'incendie conformes aux Eurocodes
- Simplifier ces méthodes de dimensionnement pour les cas des structures les plus courantes

Afin de déterminer les méthodes de dimensionnement des assemblages traditionnels bois-bois en situation d'incendie, les consultants de C4Ci ont effectué un travail d'identification des travaux de recherche et retours d'expérience en Europe et dans le Monde concernant les assemblages traditionnels en situation d'incendie. Ils les ont confronté aux méthodes existantes pour les assemblages par tiges métalliques présentes dans l'Eurocode 5, et ont ainsi élaboré et proposé de nouvelles méthodes. Ils les ont soumises à la validation d'un groupe d'experts techniques volontaire rassemblés au sein d'un groupe consultatif.

Étant donné les destinations courantes des assemblages traditionnels et le manque relatif de données d'expérience, les méthodes proposées se limitent dans cette version initiale du guide à une durée de résistance au feu de 30 minutes.

La simplification des méthodes de dimensionnement a été réalisée par un compromis entre temps d'étude et précision du calcul. Les méthodes simples sont proposées avec deux niveaux de simplification : le premier et le plus simple consiste en des règles de moyens sur les dimensions des assemblages, le second plus évolué propose des durées de résistance acquises en fonction des dimensions des assemblages et qui peuvent être prolongées par compléments d'épaisseur.

Les éléments présentés dans les pages qui suivent sont basés sur la réglementation et les normes en vigueur à la date de publication de ce guide. Les schémas et informations ont valeur d'exemple et n'exonèrent pas le lecteur de sa responsabilité et de l'exercice de ses devoirs professionnels.

GLOSSAIRE

ABRÉVIATIONS

CODIFAB	Comité professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois
CAPEB	Confédération des Artisans et Petites Entreprises du Bâtiment
UNA CMA	Union Nationale Charpente Menuiserie Agencement (fait partie de la CAPEB)
FFB	Fédération Française du Bâtiment
UMB	Union des Métiers du Bois (fait partie de la FFB)
FIBC	Fédération de l'Industrie Bois Construction
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
BLC	Bois Lamellé Collé
BMR	Bois Massif Reconstitué

UNITÉS

kg	Kilogramme
N	Newton
daN	Décanewton (1 daN = 10 N)
MPa	MégaPascal (1 MPa = 1 N/mm ²)
mm	Millimètre
cm	Centimètre
°	Degré
%	Pourcent

RÉFÉRENCES NORMATIVES

NF EN 1995-1-1	Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments (Novembre 2005)
NF EN 1995-1-1/A1	Amendement A1 à l'Eurocode 5 partie 1-1 (Octobre 2008)
NF EN 1995-1-1/A2	Amendement A2 à l'Eurocode 5 partie 1-1 (Juillet 2014)
NF EN 1995-1-1/NA	Annexe Nationale Française à l'Eurocode 5 partie 1-1 (Mai 2010)
NF EN 1995-1-2	Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-2 : généralités - Calcul des structures au feu (Septembre 2005)
NF EN 1995-1-2/NA	Annexe Nationale Française à l'Eurocode 5 partie 1-2 (Avril 2007)
NF EN 338	Bois de structure - Classes de résistance (Décembre 2009)
NF EN 14080	Structures en bois - Bois lamellé collé et bois massif reconstitué – Exigences (Août 2013)

SOMMAIRE

1. METHODES DE DIMENSIONNEMENT SIMPLES.....	6
1.1. EMBREVEMENT SIMPLE EN CHARPENTE.....	8
1.2. TENON-MORTAISE EN PLANCHER.....	11
1.3. QUEUE D'ARONDE EN PLANCHER.....	16
2. METHODES DE DIMENSIONNEMENT AVANCEES.....	21
2.1. EMBREVEMENT SIMPLE EN CHARPENTE.....	23
2.2. TENON-MORTAISE EN PLANCHER.....	26
2.3. QUEUE D'ARONDE EN PLANCHER.....	29
3. METHODOLOGIE DE PROJET.....	32
3.1. TRAVAIL BIBLIOGRAPHIQUE.....	34
3.2. DEVELOPPEMENT DES METHODES AVANCEES.....	42
3.3. DEVELOPPEMENT DES METHODES SIMPLES.....	47



MÉTHODES DE DIMENSIONNEMENT SIMPLES

INTRODUCTION

Les méthodes simples présentées dans la section ci-après ont pour objectif de permettre une vérification simple des assemblages traditionnels de structures bois en situation d'incendie, tout en assurant une conformité aux principes de l'Eurocode 5.

Ces méthodes simples sont présentées par technique d'assemblage (embrèvement en charpente, tenon-mortaise en plancher, et queue d'aronde en plancher). **Elles ne sont valides que dans les limites des domaines de validité qui sont définis pour chaque technique d'assemblage, et pour des structures bois couvertes (classes de service 1 et 2). La durée de résistance au feu maximale qui peut être justifiée à l'aide de ces méthodes est de 30 minutes.**

Pour chaque technique d'assemblage, un schéma général introduit les principales notations utilisées dans les méthodes.

Le paragraphe « **Domaine de validité** » donne les exigences (pour la plupart géométriques) à respecter afin de pouvoir utiliser les méthodes de justification présentées. En cas de non-respect du domaine de validité, consulter la section « **2. Méthode de dimensionnement avancées** » du présent document.

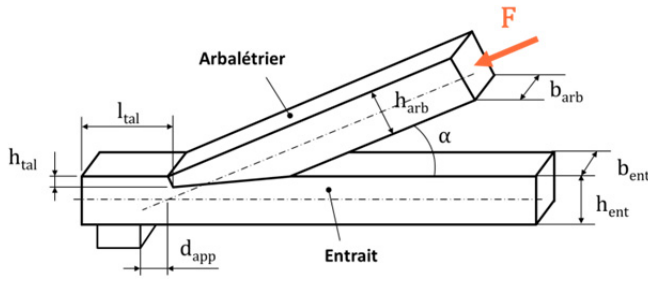
La première méthode « **Règles de moyens** » permet pour un assemblage déjà vérifié à froid de savoir très rapidement sur la base de ses dimensions s'il résiste à une situation d'incendie de 15 minutes ou de 30 minutes.

La seconde méthode « **Tableaux de durée acquise et compléments d'épaisseur** » permet pour un assemblage déjà vérifié à froid de déterminer dans un premier temps en fonction de ses dimensions sa durée intrinsèque de résistance au feu, à la minute près. Dans un second temps, si cette durée n'est pas suffisante au regard des contraintes réglementaires rencontrées, elle peut être prolongée par l'apport de compléments d'épaisseur.

Si vous souhaitez aller plus loin dans votre appropriation de la vérification des assemblages traditionnels de structures bois en situation d'incendie, prenez connaissance de la seconde section du document intitulée « **Méthodes avancées** » à partir de la page 21. Si vous souhaitez savoir comment ont été établies ces méthodes simples, prenez connaissance de la troisième section du document intitulée « **Méthodologie de projet** » à partir de la page 32.

1.1. EMBREVEMENT SIMPLE EN CHARPENTE

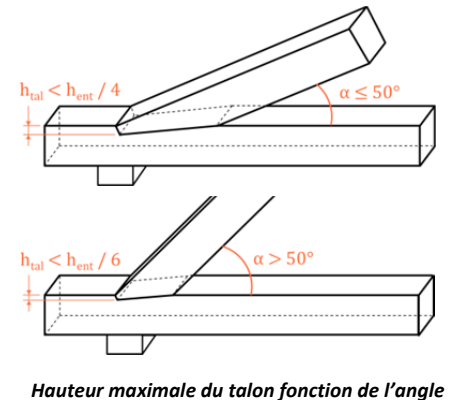
PRÉSENTATION DE L'ASSEMBLAGE



F	Effort le long de l'arbalétrier	[daN]
α	Angle entre l'arbalétrier et l'entrait	[°]
b_{ent}	Largeur de l'entrait	[mm]
h_{ent}	Hauteur de l'entrait	[mm]
b_{arb}	Largeur de l'arbalétrier	[mm]
h_{arb}	Hauteur de l'arbalétrier	[mm]
h_{tal}	Hauteur du talon	[mm]
l_{tal}	Longueur du talon	[mm]
d_{app}	Distance appui / nœud assemblage	[mm]

DOMAINE DE VALIDITÉ DES MÉTHODES SIMPLES

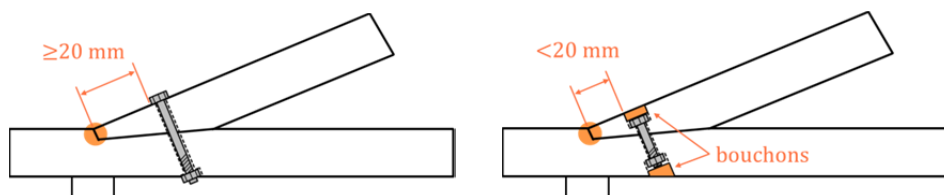
- TYPE D'EMBRÈVEMENT : embrèvement simple sans tenon-mortaise
- NATURE DES BOIS UTILISÉS : même essence pour tous les éléments
- SECTIONS DES ÉLÉMENTS
 - Largeur : de 80 mm à 180 mm pour l'arbalétrier
de 80 mm à 200 mm pour l'entrait
 - Hauteur : de 100 mm à 300 mm
 - b_{arb} : $\leq b_{ent}$
- GEOMETRIE D'ENTAILLE : entaille taillée à la bissectrice
- HAUTEUR DU TALON
 - Hauteur minimale : $h_{tal} \geq 35$ mm si feuillus, 40 mm si résineux ou hêtre
 - Si α inférieur à 50° : $h_{tal} \leq h_{ent} / 4$
 - Si α supérieur à 50° : $h_{tal} \leq h_{ent} / 6$
- LONGUEUR DU TALON : $180 \text{ mm} \leq l_{tal} \leq 8 \times h_{tal}$
- CONDITIONS D'APPUI : appui proche de l'aplomb du nœud de l'assemblage ($d_{app} \leq h_{ent}$)
- EXECUTION
 - Les zones sollicitées de l'assemblage doivent être exemptes de défauts rédhibitoires
 - Les bois doivent être mis en œuvre à une humidité proche de leur futur point d'équilibre (NF DTU 31.1)
 - Il ne doit y avoir aucun jeu au niveau du contact de l'about (NF DTU 31.1)
 - Le jeu au niveau du pas de l'embrèvement doit être limité à 2 mm



Hauteur maximale du talon fonction de l'angle

Des dispositions doivent être prises pour assurer le maintien du contact au niveau de l'about de l'embrèvement (par exemple charges permanentes, ou organes de maintien...).

- ORGANES DE MAINTIEN : de préférence non métalliques (chevilles en bois plus dur que ceux à assembler)
si organes de maintien métalliques :
 - se trouvent à au moins 20 mm des zones sollicitées (talon et about)
 - sinon sont protégés (chappelles et bouchons)
- DURÉE MAXIMALE : méthodes valables pour un temps de résistance au feu maximal de 30 minutes



Protection des organes métalliques situés à moins de 20 mm des zones sollicitées de l'assemblage



Les méthodes présentées dans les pages 9 et 10 ne sont valables que si le domaine de validité présenté ici est respecté

MÉTHODE 1 : RÈGLES DE MOYENS

Si vous avez déjà vérifié votre assemblage par embrèvement à froid, et que vous entrez dans le domaine de validité donné en page précédente, le respect des règles de moyens présentées ci-dessous est suffisant pour justifier de la résistance au feu pour 15 ou 30 minutes.

Tableau 1 – Règles de moyens à respecter en fonction de la durée de résistance à l'incendie visée pour un embrèvement

Essence	R15 (15 minutes)	R30 (30 minutes)
Résineux et hêtre	$b_{arb} + 2 h_{tal} \geq 180 \text{ mm}$	$b_{arb} = 180 \text{ mm}$ et $h_{tal} = 75 \text{ mm}$
Feuillus sauf hêtre	Le respect du domaine de validité page 8 suffit	$b_{arb} \geq 140 \text{ mm}$ et $b_{arb} + 4 h_{tal} \geq 400 \text{ mm}$

Application Numérique : pour un entrain en 150 x 200 et un arbalétrier en 100 x 200 en résineux, avec une hauteur de talon de 45 mm et un angle de 40° On a bien $h_{tal} \geq 40 \text{ mm}$ et $h_{tal} \leq h_{ent}/4 = 50 \text{ mm}$, on est donc bien dans le domaine de validité, et on peut utiliser les règles de moyens
 Pour une résistance de 15 minutes, on a : $b_{arb} + 2 h_{tal} = 100 + 2 \times 45 = 190 \geq 180 \text{ mm}$ donc l'assemblage résiste 15 minutes
 Pour une résistance de 30 minutes, on a : $b_{arb} \neq 180 \text{ mm}$ et $h_{tal} \neq 75 \text{ mm}$ donc l'assemblage ne résiste pas 30 minutes

MÉTHODE 2 : TABLEAUX DE DURÉES ACQUISES ET COMPLÉMENTS D'ÉPAISSEUR

Si vous avez déjà vérifié votre assemblage à froid, et que vous entrez dans le domaine de validité donné en page 8, vous pouvez utiliser les tableaux ci-après pour déterminer la durée de résistance au feu acquise par votre assemblage. Si cette durée ne suffit pas à atteindre la durée visée, apportez des compléments d'épaisseur comme indiqué en page 10.

1. Durée de résistance au feu acquise d'un embrèvement

Tableaux 2 – Durée de résistance acquise (en minutes) en fonction de T_{comp} taux de travail à froid en compression de l'about

Si vous ne connaissez pas le taux de travail à froid en compression de l'about, utilisez le tableau donné pour $T_{comp} = 100\%$

Si vos dimensions et taux de travail ne sont pas exactement ceux proposés par les tableaux, vous pouvez réaliser des interpolations

		RESINEUX et hêtre						FEUILLUS sauf hêtre									
		RESINEUX		b_{arb} (en mm)						FEUILLUS		b_{arb} (en mm)					
		$T_{comp} = 100\%$		80	100	120	140	160	180	$T_{comp} = 100\%$		80	100	120	140	160	180
$T_{comp} = 100\%$	h_{tal} (en mm)	35	-	-	-	-	-	-	-	35	15	16	18	18	19	19	
		40	13	15	16	17	18	19	40 <td>15</td> <td>17</td> <td>19</td> <td>20</td> <td>22</td> <td>23</td>	15	17	19	20	22	23		
		45	14	16	17	18	19	20	45 <td>16</td> <td>18</td> <td>20</td> <td>22</td> <td>24</td> <td>26</td>	16	18	20	22	24	26		
		50	15	17	18	19	21	22	50 <td>17</td> <td>19</td> <td>22</td> <td>24</td> <td>26</td> <td>28</td>	17	19	22	24	26	28		
		55	15	17	19	21	23	24	55 <td>17</td> <td>20</td> <td>24</td> <td>26</td> <td>29</td> <td>30</td>	17	20	24	26	29	30		
		60	15	18	20	23	24	26	60 <td>18</td> <td>21</td> <td>25</td> <td>28</td> <td>30</td> <td>30</td>	18	21	25	28	30	30		
		65	16	18	21	24	26	28	65 <td>18</td> <td>23</td> <td>27</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td>	18	23	27	30	30	30		
		70	16	19	22	25	27	29	70 <td>19</td> <td>23</td> <td>28</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td>	19	23	28	30	30	30		
	75	16	19	23	26	29	30	75 <td>19</td> <td>24</td> <td>29</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td>	19	24	29	30	30	30			
$T_{comp} = 80\%$	h_{tal} (en mm)	35	-	-	-	-	-	-	35 <td>18</td> <td>19</td> <td>22</td> <td>23</td> <td>25</td> <td>26</td>	18	19	22	23	25	26		
		40	16	18	19	21	22	23	40 <td>19</td> <td>22</td> <td>24</td> <td>26</td> <td>28</td> <td>29</td>	19	22	24	26	28	29		
		45	17	19	22	23	25	26	45 <td>20</td> <td>24</td> <td>27</td> <td>29</td> <td>30</td> <td>30</td>	20	24	27	29	30	30		
		50	18	20	23	25	27	29	50 <td>21</td> <td>25</td> <td>29</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td>	21	25	29	30	30	30		
		55	18	22	25	27	29	30	55 <td>22</td> <td>27</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td>	22	27	30	30	30	30		
		60	19	23	26	29	30	30	60 <td>23</td> <td>28</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td>	23	28	30	30	30	30		
		65	19	24	27	30	30	30	65 <td>24</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td>	24	30	30	30	30	30		
		70	19	24	29	30	30	30	70 <td>24</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td>	24	30	30	30	30	30		
	75	20	25	30	30	30	30	75 <td>25</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td>	25	30	30	30	30	30			

		RESINEUX et hêtre						FEUILLUS sauf hêtre								
$T_{comp} = 60\%$	RESINEUX	b_{arb} (en mm)						FEUILLUS	b_{arb} (en mm)							
	$T_{comp} = 60\%$	80	100	120	140	160	180		$T_{comp} = 60\%$	80	100	120	140	160	180	
$T_{comp} = 60\%$	h_{tal} (en mm)	35	-	-	-	-	-	-	h_{tal} (en mm)	35	22	26	28	30	30	30
		40	19	23	25	27	28	30		40	24	28	30	30	30	30
		45	20	24	28	30	30	30		45	26	30	30	30	30	30
		50	22	26	30	30	30	30		50	27	30	30	30	30	30
		55	23	28	30	30	30	30		55	28	30	30	30	30	30
		60	23	29	30	30	30	30		60	29	30	30	30	30	30
		65	24	30	30	30	30	30		65	30	30	30	30	30	30
		70	25	30	30	30	30	30		70	30	30	30	30	30	30
		75	25	30	30	30	30	30		75	30	30	30	30	30	30

		RESINEUX						FEUILLUS								
$T_{comp} = 40\%$	RESINEUX	b_{arb} (en mm)						FEUILLUS	b_{arb} (en mm)							
	$T_{comp} = 40\%$	80	100	120	140	160	180		$T_{comp} = 40\%$	80	100	120	140	160	180	
$T_{comp} = 40\%$	h_{tal} (en mm)	35	-	-	-	-	-	-	h_{tal} (en mm)	35	28	30	30	30	30	30
		40	25	29	30	30	30	30		40	30	30	30	30	30	30
		45	26	30	30	30	30	30		45	30	30	30	30	30	30
		50	27	30	30	30	30	30		50	30	30	30	30	30	30
		55	29	30	30	30	30	30		55	30	30	30	30	30	30
		60	29	30	30	30	30	30		60	30	30	30	30	30	30
		65	30	30	30	30	30	30		65	30	30	30	30	30	30
		70	30	30	30	30	30	30		70	30	30	30	30	30	30
		75	30	30	30	30	30	30		75	30	30	30	30	30	30

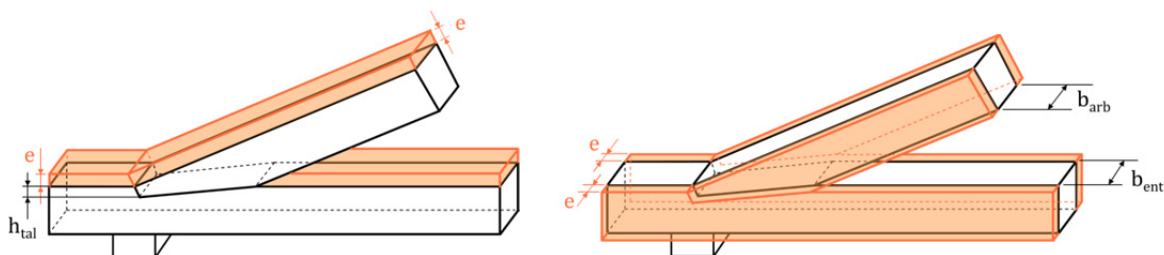
2. Éventuels compléments d'épaisseur à apporter

Pour obtenir une durée de résistance supplémentaire, il faut apporter une surépaisseur e déterminée ainsi :

- $e = 0,8$ mm par minute supplémentaire pour les résineux et le hêtre massifs
- $e = 0,7$ mm par minute supplémentaire pour les résineux et le hêtre lamellés
- $e = 0,55$ mm par minute supplémentaire pour les feuillus massifs et lamellés (sauf hêtre)

Cette surépaisseur doit être apportée ainsi :

- Augmenter h_{tal} en ajoutant la surépaisseur e sur la face supérieure de l'entrait et sur celle de l'arbalétrier
- Augmenter b_{arb} en élargissant l'arbalétrier de 2 fois e . Si b_{arb} devient supérieur à b_{ent} , il faut aligner la largeur de l'entrait sur celle de l'arbalétrier



Apport de surépaisseur : pour augmenter h_{tal} de e (à gauche) et pour augmenter b_{arb} de 2 fois e (à droite)

Application Numérique : dans le même cas que l'application numérique précédente, en résineux massif, et l'on vise une résistance de 30 minutes. L'assemblage a été dimensionné à froid via une méthode simplifiée, on ne connaît pas la valeur du taux de travail T_{comp} , on supposera donc 100%. Il s'agit de résineux avec $T_{comp} = 100\%$ on utilisera donc le tableau le plus en haut à gauche.

Pour $b_{arb} = 100$ mm et $h_{tal} = 45$ mm, le tableau donne une durée acquise de 16 minutes. Il manque donc 14 minutes pour atteindre R30.

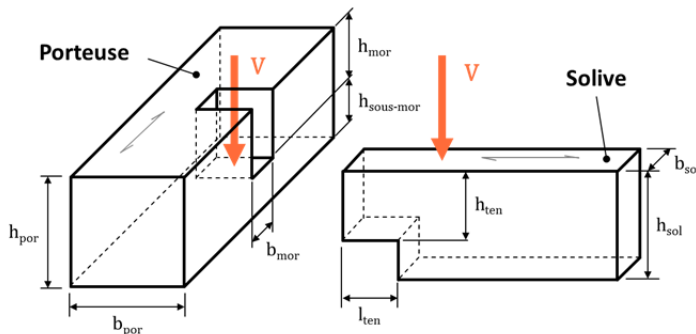
Il faudra ajouter une surépaisseur $e = 0,8 \times 14 = 11,2$ mm que l'on peut arrondir à 12 mm.

Bilan : Pour mémoire on avait prévu à froid un arbalétrier de section 100 x 200 et un entrait de section 150 x 200.

Ainsi pour obtenir R30 il faudra réaliser l'arbalétrier avec une section d'au moins $(100 + 2 \times 12) \times (200 + 1 \times 12)$ soit une section minimale de 124 x 212 et réaliser l'entrait avec une section d'au moins 150 x $(200 + 1 \times 12)$ soit une section minimale de 150 x 212.

1.2. TENON-MORTAISE EN PLANCHER

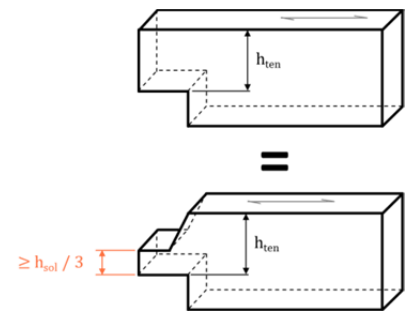
PRÉSENTATION DE L'ASSEMBLAGE



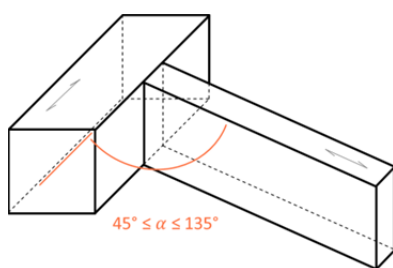
V	Effort tranchant dans l'assemblage	[daN]
h_{por}	Hauteur de la poutre porteuse	[mm]
b_{por}	Largeur de la poutre porteuse	[mm]
h_{sol}	Hauteur de la solive	[mm]
b_{sol}	Largeur de la solive	[mm]
h_{mor}	Hauteur de la mortaise	[mm]
$h_{sous-mor}$	Hauteur de bois sous la mortaise	[mm]
b_{mor}	Largeur de la mortaise	[mm]
h_{ten}	Hauteur du tenon	[mm]
l_{ten}	Longueur du tenon	[mm]

DOMAINE DE VALIDITÉ DE LA MÉTHODE SIMPLE

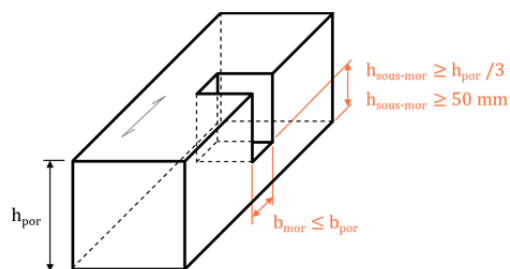
- TYPE DE TENON-MORTAISE tenon débouchant en partie supérieure ou avec mordâne
- NATURE DES BOIS UTILISES même essence pour tous les éléments
- SECTIONS DES ELEMENTS
 - Largeur de 80 mm à 180 mm
 - Hauteur de 100 mm à 300 mm
 - Solive aussi large ou moins large que la poutre porteuse
- GEOMETRIE DE L'ASSEMBLAGE
 - Angle porteur/supporté $45^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$
 - Largeur du tenon toute largeur ou avec épaulements ≤ 10 mm
 - Longueur du tenon $40 \text{ mm} \leq l_{ten} \leq 80 \text{ mm}$ et $l_{ten} \geq b_{por}/3$
 - Hauteur du tenon $h_{ten} \geq h_{sol}/2$
 - Hauteur sous mortaise $h_{sous-mor} \geq h_{por}/3$ et $h_{sous-mor} \geq 50$ mm
- EXECUTION
 - Les zones sollicitées de l'assemblage doivent être exemptes de défauts rédhibitoires
 - Mise en œuvre à une humidité proche du futur point d'équilibre (NF DTU 31.1)
 - Il ne doit y avoir aucun jeu au niveau de l'appui du tenon sur la mortaise (NF DTU 31.1)
 - Les autres jeux doivent être limités à 2 mm



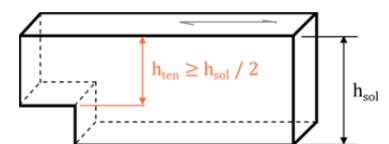
Le tenon débouchant en partie supérieure et le tenon avec mordâne se traitent de façon similaire si la partie centrale du tenon est suffisamment haute



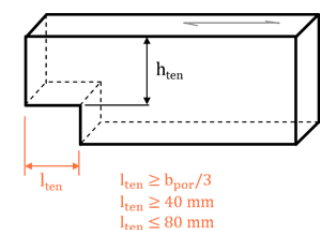
Limites de l'angle porteuse/solive



Exigences concernant la mortaise



Exigences concernant la hauteur du tenon



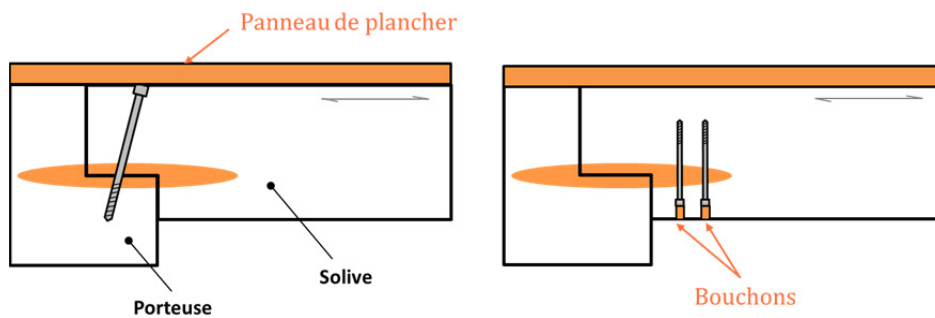
Exigences concernant la longueur du tenon



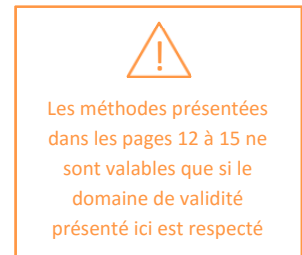
Les méthodes présentées dans les pages 12 à 15 ne sont valables que si le domaine de validité présenté ici est respecté

Des dispositions doivent être prises pour assurer le maintien du contact au niveau de l'appui du tenon sur la mortaise (par exemple charges permanentes, ou organes de maintien...).

- **ORGANES DE MAINTIEN** de préférence non métalliques (chevilles en bois plus dur que ceux à assembler)
si organes de maintien métalliques :
 - ne sont pas visibles donc pas accessibles aux flammes (par exemple vis lardées par le haut puis recouvertes par le panneau de plancher)
 - sinon sont protégés par chapelles et bouchons (par exemple vis pour frettage en traction transversale et sous face de la solive)
- **DUREE MAXIMALE** méthode valable pour un temps t_{req} de résistance au feu maximal de 30 minutes



Protection des organes métalliques visibles traversant les zones sollicitées de l'assemblage



MÉTHODE 1 : RÈGLES DE MOYENS

Si vous avez déjà vérifié votre assemblage par tenon-mortaise à froid, et que vous entrez dans le domaine de validité donné en pages 11 et 12, le respect des règles de moyens présentées ci-dessous est suffisant pour justifier de la résistance au feu pour 15 ou 30 minutes.

Tableau 3 – Règles de moyens à respecter en fonction de la durée de résistance à l'incendie visée pour un tenon-mortaise

Essence	R15 (15 minutes)	R30 (30 minutes)
Résineux et hêtre	$b_{por} + h_{sous-mor} \geq 140 \text{ mm}$	$b_{sol} \geq 105 \text{ mm}$ et $b_{por} \geq 120 \text{ mm}$ et $b_{por} + h_{sous-mor} \geq 265 \text{ mm}$
Feuillus sauf hêtre	Le respect du domaine de validité pages 11 et 12 suffit	$b_{sol} \geq 85 \text{ mm}$ et $b_{por} \geq 100 \text{ mm}$ et $b_{por} + h_{sous-mor} \geq 240 \text{ mm}$

Application Numérique :

On a un assemblage tenon-mortaise avec une porteuse en 85 x 225 et une solive en 85 x 225 en résineux massif.

Le tenon est toute largeur et débouchant en partie supérieure, il a pour hauteur $h_{ten} = 150 \text{ mm}$ et pour longueur $l_{ten} = 40 \text{ mm}$

On a : $l_{ten} = 40 \text{ mm}$ donc on a bien $40 \text{ mm} \leq l_{ten} \leq 80 \text{ mm}$ et $l_{ten} \geq b_{por}/3 = 85/3 = 28 \text{ mm}$

Et : $h_{ten} = 150 \text{ mm}$ donc on a bien $h_{ten} \geq h_{sol}/2 = 225/2 = 112,5 \text{ mm}$

Et : $h_{sous-mor} = h_{por} - h_{ten} = 225 - 150 = 75 \text{ mm}$ donc on a bien $h_{sous-mor} \geq 50 \text{ mm}$ et $h_{sous-mor} \geq h_{por}/3 = 225/3 = 75 \text{ mm}$

On est donc bien dans le domaine de validité, et on peut utiliser les règles de moyens

Pour une résistance de 15 minutes, on a : $b_{por} + h_{sous-mor} = 85 + 75 = 160 \geq 140 \text{ mm}$ donc l'assemblage résiste 15 min

Pour une résistance de 30 minutes, on a : $b_{sol} < 105 \text{ mm}$ et $b_{por} < 120 \text{ mm}$ donc l'assemblage ne résiste pas 30 minutes

MÉTHODE 2 : TABLEAUX DE DURÉES ACQUISES ET COMPLÉMENTS D'ÉPAISSEUR

Si vous avez déjà vérifié votre assemblage à froid, et que vous entrez dans le domaine de validité donné en pages 11 et 12, vous pouvez utiliser les tableaux ci-après pour déterminer la durée de résistance au feu acquise par votre assemblage vis-à-vis de chacune des deux ruptures à vérifier : celle du tenon et celle de la mortaise. Si ces durées ne suffisent pas à atteindre la durée visée, apportez des compléments d'épaisseur comme indiqué en page 15.

1. Durée de résistance au feu acquise vis-à-vis de la rupture du tenon d'un tenon-mortaise

Tableaux 4 – Durée de résistance acquise (en minutes) vis-à-vis de la rupture du tenon en fonction de T_{ten} taux de travail en cisaillement / traction transversale du tenon à froid

Si vous ne connaissez pas le taux de travail à froid de votre assemblage, utilisez le tableau donné pour $T = 100\%$

Si vos dimensions et taux de travail ne sont pas exactement ceux proposés par les tableaux, vous pouvez réaliser des interpolations

		TENON – RESINEUX et hêtre					TENON – FEUILLUS sauf hêtre							
$T_{ten} = 100\%$	RESINEUX	h_{ten}/h_{sol}					FEUILLUS	h_{ten}/h_{sol}						
	$T_{ten} = 100\%$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	$T_{ten} = 100\%$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9		
	b_{sol} (en mm)	80	24	24	24	24	22	b_{sol} (en mm)	80	30	30	30	30	28
		90	29	29	29	29	25		90	30	30	30	30	30
		100	30	30	30	30	28		100	30	30	30	30	30
		110	30	30	30	30	30		110	30	30	30	30	30
≥120		30	30	30	30	30	≥120		30	30	30	30	30	
$T_{ten} = 80\%$	RESINEUX	h_{ten}/h_{sol}					FEUILLUS	h_{ten}/h_{sol}						
	$T_{ten} = 80\%$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	$T_{ten} = 80\%$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9		
	b_{sol} (en mm)	80	29	29	29	29	26	b_{sol} (en mm)	80	30	30	30	30	30
		90	30	30	30	30	30		90	30	30	30	30	30
		100	30	30	30	30	30		100	30	30	30	30	30
		110	30	30	30	30	30		110	30	30	30	30	30
≥120		30	30	30	30	30	≥120		30	30	30	30	30	
$T_{ten} = 60\%$	RESINEUX	h_{ten}/h_{sol}					FEUILLUS	h_{ten}/h_{sol}						
	$T_{ten} = 60\%$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	$T_{ten} = 60\%$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9		
	b_{sol} (en mm)	80	30	30	30	30	30	b_{sol} (en mm)	80	30	30	30	30	30
		90	30	30	30	30	30		90	30	30	30	30	30
		100	30	30	30	30	30		100	30	30	30	30	30
		110	30	30	30	30	30		110	30	30	30	30	30
≥120		30	30	30	30	30	≥120		30	30	30	30	30	
$T_{ten} = 40\%$	RESINEUX	h_{ten}/h_{sol}					FEUILLUS	h_{ten}/h_{sol}						
	$T_{ten} = 40\%$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	$T_{ten} = 40\%$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9		
	b_{sol} (en mm)	80	30	30	30	30	30	b_{sol} (en mm)	80	30	30	30	30	30
		90	30	30	30	30	30		90	30	30	30	30	30
		100	30	30	30	30	30		100	30	30	30	30	30
		110	30	30	30	30	30		110	30	30	30	30	30
≥120		30	30	30	30	30	≥120		30	30	30	30	30	

2. Durée de résistance au feu acquise vis-à-vis de la rupture de la mortaise d'un tenon-mortaise

Tableaux 5 – Durée de résistance acquise (en minutes) vis-à-vis de la rupture de la mortaise en fonction de T_{mor} taux de travail en cisaillement / traction transversale de la mortaise à froid

Si vous ne connaissez pas le taux de travail à froid de votre mortaise, utilisez le tableau donné pour $T_{mor} = 100\%$

Si vos dimensions et taux de travail ne sont pas exactement ceux proposés par les tableaux, vous pouvez réaliser des interpolations

		MORTAISE – RESINEUX et hêtre						MORTAISE – FEUILLUS sauf hêtre									
	$T_{mor} = 100\%$	RESINEUX		b_{por} (en mm)						FEUILLUS		b_{por} (en mm)					
		$T_{mor} = 100\%$		80	100	120	140	160	180	$T_{mor} = 100\%$		80	100	120	140	160	180
$T_{mor} = 100\%$	$h_{sous-mor}$ (en mm)	50		14	16	17	18	20	21	50		16	18	21	22	24	26
		60		15	17	19	21	23	24	60		17	20	24	27	29	30
		70		16	18	21	24	26	28	70		18	23	27	30	30	30
		80		16	19	23	26	29	30	80		19	24	29	30	30	30
		90		17	20	25	28	30	30	90		20	26	30	30	30	30
		100		17	21	26	30	30	30	100		21	27	30	30	30	30
		120		18	23	28	30	30	30	120		22	29	30	30	30	30
		140		18	24	29	30	30	30	140		23	30	30	30	30	30
		≥160		19	25	30	30	30	30	≥160		23	30	30	30	30	30
$T_{mor} = 80\%$	$h_{sous-mor}$ (en mm)	50		17	19	22	24	25	26	50		20	24	27	30	30	30
		60		18	22	25	28	30	30	60		22	27	30	30	30	30
		70		19	24	28	30	30	30	70		24	30	30	30	30	30
		80		20	25	30	30	30	30	80		25	30	30	30	30	30
		90		21	26	30	30	30	30	90		26	30	30	30	30	30
		100		21	27	30	30	30	30	100		27	30	30	30	30	30
		120		22	29	30	30	30	30	120		28	30	30	30	30	30
		140		23	30	30	30	30	30	140		29	30	30	30	30	30
		≥160		24	30	30	30	30	30	≥160		30	30	30	30	30	30
$T_{mor} = 60\%$	$h_{sous-mor}$ (en mm)	50		20	25	28	30	30	30	50		26	30	30	30	30	30
		60		23	28	30	30	30	30	60		28	30	30	30	30	30
		70		24	30	30	30	30	30	70		30	30	30	30	30	30
		80		25	30	30	30	30	30	80		30	30	30	30	30	30
		90		26	30	30	30	30	30	90		30	30	30	30	30	30
		100		27	30	30	30	30	30	100		30	30	30	30	30	30
		120		28	30	30	30	30	30	120		30	30	30	30	30	30
		140		28	30	30	30	30	30	140		30	30	30	30	30	30
		≥160		29	30	30	30	30	30	≥160		30	30	30	30	30	30
$T_{mor} = 40\%$	$h_{sous-mor}$ (en mm)	50		26	30	30	30	30	30	50		30	30	30	30	30	30
		60		28	30	30	30	30	30	60		30	30	30	30	30	30
		70		30	30	30	30	30	30	70		30	30	30	30	30	30
		80		30	30	30	30	30	30	80		30	30	30	30	30	30
		90		30	30	30	30	30	30	90		30	30	30	30	30	30
		100		30	30	30	30	30	30	100		30	30	30	30	30	30
		120		30	30	30	30	30	30	120		30	30	30	30	30	30
		≥140		30	30	30	30	30	30	≥140		30	30	30	30	30	30

3. Éventuels compléments d'épaisseur à apporter

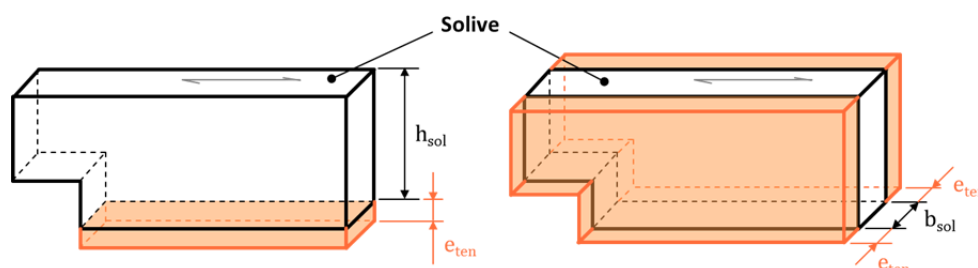
Pour obtenir une durée de résistance supplémentaire, il faut apporter une surépaisseur e déterminée ainsi :

- $e = 0,8$ mm par minute supplémentaire pour les résineux et le hêtre massifs
- $e = 0,7$ mm par minute supplémentaire pour les résineux et le hêtre lamellés
- $e = 0,55$ mm par minute supplémentaire pour les feuillus massifs et lamellés (sauf hêtre)

Pour que votre assemblage résiste pendant une certaine durée, il faut vérifier que cette durée est atteinte pour les deux modes de rupture : rupture du tenon et rupture de la mortaise. Il s'agira donc de calculer séparément les compléments d'épaisseurs e_{ten} et e_{mor} à apporter pour ce faire.

Pour augmenter la durée de résistance en cisaillement du tenon, le complément d'épaisseur doit être apporté ainsi :

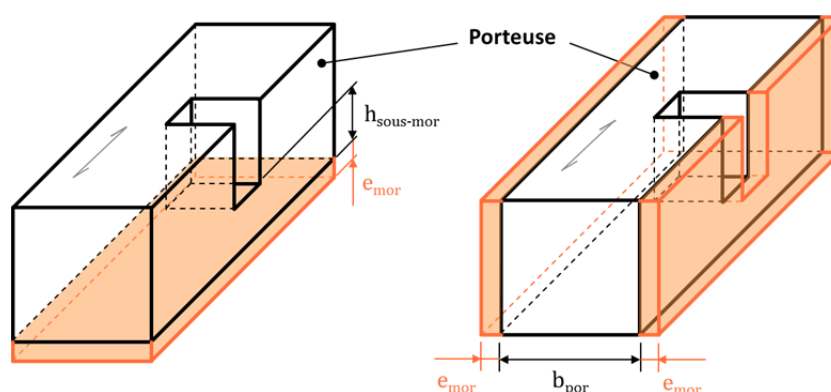
- Augmenter h_{sol} en ajoutant la surépaisseur e_{ten} sur la face inférieure de la solive
- Augmenter b_{sol} en élargissant la solive de 2 fois e_{ten}



Apport de surépaisseur : pour augmenter h_{sol} de e_{ten} (à gauche) et pour augmenter b_{sol} de 2 fois e_{ten} (à droite)

Pour augmenter la durée de résistance en cisaillement de la mortaise, le complément d'épaisseur doit être apporté ainsi :

- Augmenter $h_{sous-mor}$ en ajoutant la surépaisseur e_{mor} sur la face inférieure de la porteuse
- Augmenter b_{por} en élargissant la porteuse de 2 fois e_{mor}



Apport de surépaisseur : pour augmenter $h_{sous-mor}$ de e_{mor} (à gauche) et pour augmenter b_{por} de 2 fois e_{mor} (à droite)

Application Numérique : dans le même cas que l'application numérique précédente, et l'on vise une résistance de 30 minutes

On a un assemblage tenon-mortaise avec une porteuse en 85 x 225 et une solive en 85 x 225 en résineux massif

Le tenon est toute largeur et débouchant en partie supérieure, il a pour hauteur $h_{ten} = 150$ mm et pour longueur $l_{ten} = 40$ mm

On a vu dans l'application numérique précédente que l'on est bien dans le domaine de validité, et on peut utiliser les tableaux de durée acquise

L'assemblage a été dimensionné à froid via une méthode simplifiée, on ne connaît pas la valeur des taux de travail à froid, on supposera donc 100%

Il s'agit de résineux avec $T_{ten} = T_{mor} = 100$ % on utilisera donc pour chacun des deux modes de rupture le tableau le plus en haut à gauche

1/ Vis-à-vis de la rupture du tenon :

Pour $b_{sol} = 85$ mm et $h_{ten}/h_{sol} = 150/225 = 0,66$ le tableau ne donne pas de résultat direct. On utilisera donc des valeurs interpolées à l'aide des valeurs proches. Il s'agit ici de la moyenne entre 24 et 29, c'est-à-dire 26,5 minutes. Il manque donc 3,5 minutes pour atteindre une résistance R30.

Il faudra ajouter une surépaisseur $e_{ten} = 0,8 \times 3,5 = 2,8$ mm que l'on peut arrondir à 3 mm

2/ Vis-à-vis de la rupture de la mortaise :

Pour $h_{sous-mor} = 225 - 150 = 75$ mm et $b_{por} = 85$ mm le tableau ne donne pas de résultat direct. On utilisera donc des valeurs interpolées à l'aide des valeurs proche. On peut ici utiliser 16 minutes, il manque donc 14 minutes pour atteindre une résistance R30.

Il faudra ajouter une surépaisseur $e_{mor} = 0,8 \times 14 = 11,2$ mm que l'on peut arrondir à 12 mm

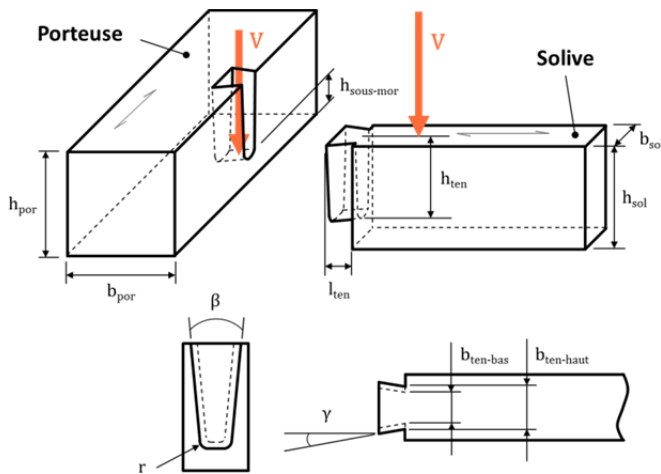
Bilan : Pour mémoire on avait prévu à froid une solive et une porteuse de section 85 x 225

Ainsi pour obtenir R30 il faudra réaliser la solive avec une section d'au moins $(85 + 2 \times 3) \times (225 + 1 \times 3)$ soit une section minimale de 91 x 228

et il faudra réaliser la porteuse avec une section d'au moins $(85 + 2 \times 12) \times (225 + 1 \times 12)$ soit une section minimale de 109 x 237

1.3. QUEUE D'ARONDE EN PLANCHER

PRÉSENTATION DE L'ASSEMBLAGE



V	Effort tranchant dans l'assemblage	[daN]
h_{por}	Hauteur de la poutre porteuse	[mm]
b_{por}	Largeur de la poutre porteuse	[mm]
h_{sol}	Hauteur de la solive	[mm]
b_{sol}	Largeur de la solive	[mm]
$h_{sous-mor}$	Hauteur de bois sous la mortaise	[mm]
h_{ten}	Hauteur du tenon	[mm]
$b_{ten-haut}$	Largeur du tenon à sa base en haut	[mm]
$b_{ten-bas}$	Largeur du tenon à sa base en bas	[mm]
l_{ten}	Longueur du tenon	[mm]
r	Rayon des congés du tenon	[mm]
α	Angle porteur/supporté	[°]
β	Angle des flancs de la queue d'aronde	[°]
γ	Angle de taille de la queue d'aronde	[°]

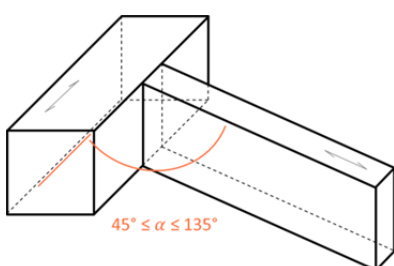
DOMAINE DE VALIDITÉ DE LA MÉTHODE SIMPLE

- TYPE DE QUEUE D'ARONDE tenon centré sur sa largeur
- NATURE DES BOIS UTILISÉS même essence pour tous les éléments
- SECTIONS DES ELEMENTS
 - Largeur de 80 mm à 180 mm
 - Hauteur de 100 mm à 240 mm
 - Solive aussi large ou moins large que la poutre porteuse

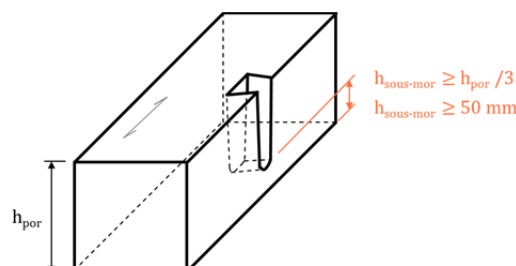


Les méthodes présentées dans les pages 17 à 20 ne sont valables que si le domaine de validité présenté ici est respecté

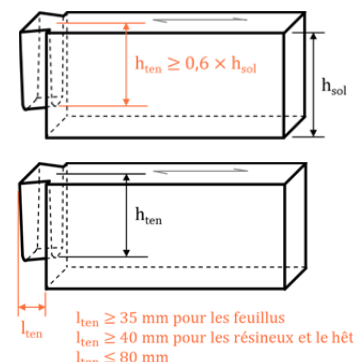
- GEOMETRIE DE L'ASSEMBLAGE
 - Hauteur de bois sous la mortaise $h_{sous-mor} \geq h_{por} / 3$ et $h_{sous-mor} \geq 50$ mm
 - Hauteur du tenon $h_{ten} \geq 0,6 \times h_{sol}$
 - Largeur du tenon $b_{ten-haut} \geq 0,8 \times b_{sol}$ et $b_{ten-bas} \geq 0,5 \times b_{sol}$
 - Longueur du tenon $35 \text{ mm} \leq l_{ten} \leq 80 \text{ mm}$ pour les feuillus sauf le hêtre
 $40 \text{ mm} \leq l_{ten} \leq 80 \text{ mm}$ pour les résineux et le hêtre
 - Rayon des congés du tenon $10 \text{ mm} \leq r \leq 60 \text{ mm}$
 - Angle porteur/supporté $45^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$
 - Angle des flancs de la queue d'aronde $4^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$
 - Angle de taille de la queue d'aronde $10^\circ \leq \gamma \leq 20^\circ$
- EXECUTION
 - Les zones sollicitées de l'assemblage doivent être exemptes de défauts rédhibitoires
 - Mise en œuvre à une humidité proche du futur point d'équilibre (NF DTU 31.1)
 - Il ne doit y avoir aucun jeu au niveau de l'appui du tenon dans la mortaise (NF DTU 31.1)
 - Les autres jeux doivent être limités à 2 mm



Limites de l'angle porteuse/solive



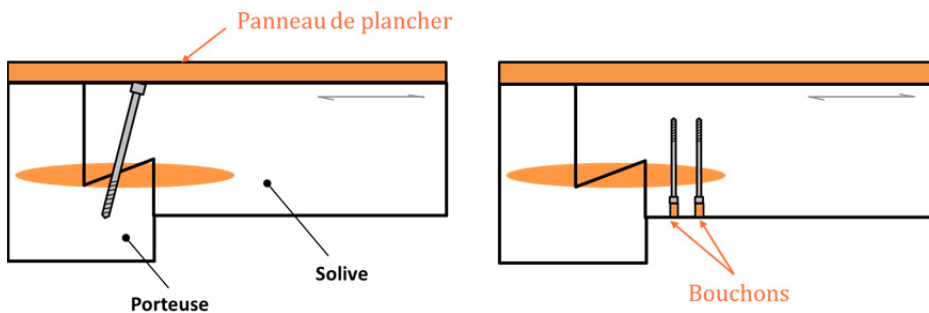
Exigences concernant la mortaise



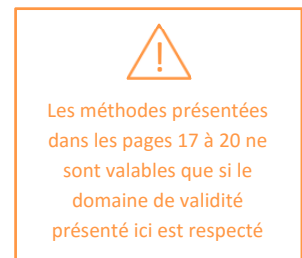
Exigences concernant la hauteur et la longueur du tenon

Des dispositions doivent être prises pour assurer le maintien du contact au niveau de l'appui du tenon dans la mortaise (par exemple charges permanentes, ou organes de maintien...).

- ORGANES DE MAINTIEN de préférence non métalliques (chevilles en bois plus dur que ceux à assembler)
si organes de maintien métalliques :
 - ne sont pas visibles donc pas accessibles aux flammes (par exemple vis lardées par le haut puis recouvertes par le panneau de plancher)
 - sinon sont protégés par chapelles et bouchons (par exemple vis pour frettage en traction transversale et sous face de la solive)
- DUREE MAXIMALE méthode valable pour un temps t_{req} de résistance au feu maximal de 30 minutes



Protection des organes métalliques visibles traversant les zones sollicitées de l'assemblage



MÉTHODE 1 : RÈGLES DE MOYENS

Si vous avez déjà vérifié votre assemblage par queue d'aronde à froid, et que vous entrez dans le domaine de validité donné en pages 16 et 17, le respect des règles de moyens présentées ci-dessous est suffisant pour justifier de la résistance au feu pour 15 ou 30 minutes.

Tableau 6 – Règles de moyens à respecter en fonction de la durée de résistance à l'incendie visée pour une queue d'aronde

Essence	R15 (15 minutes)	R30 (30 minutes)
Résineux et hêtre	$b_{por} + h_{sous-mor} \geq 140 \text{ mm}$	$b_{sol} \geq 105 \text{ mm}$ et $b_{por} \geq 120 \text{ mm}$ et $b_{por} + 2 h_{sous-mor} \geq 300 \text{ mm}$
Feuillus sauf hêtre	Le respect du domaine de validité pages 16 et 17 suffit	$b_{sol} \geq 85 \text{ mm}$ et $b_{por} \geq 100 \text{ mm}$ et $b_{por} + h_{sous-mor} \geq 235 \text{ mm}$

Application Numérique :

On a un assemblage par queue d'aronde avec une porteuse en 100 x 180 et une solive en 80 x 160 en résineux massif.

Le tenon a pour largeur à sa base en partie supérieure 80 mm et en partie inférieure 70 mm.

Le tenon a une longueur de 40 mm et une hauteur de 110 mm.

La mortaise a la même hauteur et la même largeur que celles du tenon (au jeu près).

On a : $b_{ten-haut} = 80 \text{ mm}$ donc on a bien $b_{ten-haut} \geq 0,8 \times b_{sol} = 64 \text{ mm}$

Et : $b_{ten-bas} = 70 \text{ mm}$ donc on a bien $b_{ten-bas} \geq 0,5 \times b_{sol} = 40 \text{ mm}$

Et : $l_{ten} = 40 \text{ mm}$ donc on a bien $40 \text{ mm} \leq l_{ten} \leq 80 \text{ mm}$

Et : $h_{ten} = 110 \text{ mm}$ donc on a bien $h_{ten} \geq 0,6 \times h_{sol} = 0,6 \times 160 = 96 \text{ mm}$

Et : $h_{sous-mor} = h_{por} - h_{ten} = 180 - 110 = 70 \text{ mm}$ donc on a bien $h_{sous-mor} \geq 50 \text{ mm}$ et $h_{sous-mor} \geq h_{por}/3 = 180/3 = 60 \text{ mm}$

On est donc bien dans le domaine de validité, et on peut utiliser les règles de moyens

Pour une résistance de 15 minutes, on a : $b_{por} + h_{sous-mor} = 100 + 70 = 170 \geq 140 \text{ mm}$ donc l'assemblage résiste 15 min

Pour une résistance de 30 minutes, on a : $b_{sol} < 105 \text{ mm}$ et $b_{por} < 120 \text{ mm}$ donc l'assemblage ne résiste pas 30 minutes

MÉTHODE 2 : TABLEAUX DE DURÉES ACQUISES ET COMPLÉMENTS D'ÉPAISSEUR

Si vous avez déjà vérifié votre assemblage à froid, et que vous entrez dans le domaine de validité donné en pages 16 et 17, vous pouvez utiliser les tableaux ci-après pour déterminer la durée de résistance au feu acquise par votre assemblage vis-à-vis de chacune des deux ruptures à vérifier : celle du tenon et celle de la mortaise. Si ces durées ne suffisent pas à atteindre la durée visée, apportez des compléments d'épaisseur comme indiqué en page 20.

1. Durée de résistance au feu acquise vis-à-vis de la rupture du tenon d'une queue d'aronde

Tableaux 7 – Durée de résistance acquise (en minutes) vis-à-vis de la rupture du tenon en fonction de T_{ten} taux de travail en cisaillement / traction transversale du tenon à froid

Si vous ne connaissez pas le taux de travail à froid de votre tenon, utilisez le tableau donné pour $T_{ten} = 100\%$

Si vos dimensions et taux de travail ne sont pas exactement ceux proposés par les tableaux, vous pouvez réaliser des interpolations

		TENON – RESINEUX et hêtre					TENON – FEUILLUS sauf hêtre					
$T_{ten} = 100\%$	RESINEUX $T_{ten} = 100\%$		h_{ten}/h_{sol}				FEUILLUS $T_{ten} = 100\%$		h_{ten}/h_{sol}			
			0,6	0,7	0,8	0,9	0,6	0,7	0,8	0,9		
	b_{sol} (en mm)	80	25	25	25	22	b_{sol} (en mm)	80	30	30	30	28
		90	29	30	29	25		90	30	30	30	30
		100	30	30	30	28		100	30	30	30	30
		110	30	30	30	30		110	30	30	30	30
≥120		30	30	30	30	≥120		30	30	30	30	
$T_{ten} = 80\%$	RESINEUX $T_{ten} = 80\%$		h_{ten}/h_{sol}				FEUILLUS $T_{ten} = 80\%$		h_{ten}/h_{sol}			
			0,6	0,7	0,8	0,9	0,6	0,7	0,8	0,9		
	b_{sol} (en mm)	80	29	29	29	26	b_{sol} (en mm)	80	30	30	30	30
		90	30	30	30	30		90	30	30	30	30
		100	30	30	30	30		100	30	30	30	30
		110	30	30	30	30		110	30	30	30	30
≥120		30	30	30	30	≥120		30	30	30	30	
$T_{ten} = 60\%$	RESINEUX $T_{ten} = 60\%$		h_{ten}/h_{sol}				FEUILLUS $T_{ten} = 60\%$		h_{ten}/h_{sol}			
			0,6	0,7	0,8	0,9	0,6	0,7	0,8	0,9		
	b_{sol} (en mm)	80	30	30	30	30	b_{sol} (en mm)	80	30	30	30	30
		90	30	30	30	30		90	30	30	30	30
		100	30	30	30	30		100	30	30	30	30
		110	30	30	30	30		110	30	30	30	30
≥120		30	30	30	30	≥120		30	30	30	30	
$T_{ten} = 40\%$	RESINEUX $T_{ten} = 40\%$		h_{ten}/h_{sol}				FEUILLUS $T_{ten} = 40\%$		h_{ten}/h_{sol}			
			0,6	0,7	0,8	0,9	0,6	0,7	0,8	0,9		
	b_{sol} (en mm)	80	30	30	30	30	b_{sol} (en mm)	80	30	30	30	30
		90	30	30	30	30		90	30	30	30	30
		100	30	30	30	30		100	30	30	30	30
		110	30	30	30	30		110	30	30	30	30
≥120		30	30	30	30	≥120		30	30	30	30	

2. Durée de résistance au feu acquise vis-à-vis de la rupture de la mortaise d'une queue d'aronde

Tableaux 8 – Durée de résistance acquise (en minutes) vis-à-vis de la rupture de la mortaise en fonction de T_{mor} taux de travail en cisaillement / traction transversale de la mortaise à froid

Si vous ne connaissez pas le taux de travail à froid de votre mortaise, utilisez le tableau donné pour $T_{mor} = 100\%$

Si vos dimensions et taux de travail ne sont pas exactement ceux proposés par les tableaux, vous pouvez réaliser des interpolations

		MORTAISE – RESINEUX et hêtre						MORTAISE – FEUILLUS sauf hêtre							
	T_{mor}	RESINEUX	b_{por} (en mm)						FEUILLUS	b_{por} (en mm)					
		$T_{mor} = 100\%$	80	100	120	140	160	180	$T_{mor} = 100\%$	80	100	120	140	160	180
$T_{mor} = 100\%$	$h_{sous-mor}$ (en mm)	50	14	16	21	26	30	30	50	16	18	26	33	38	38
		60	15	17	24	30	30	30	60	17	20	30	38	46	48
		70	16	18	26	30	30	30	70	18	23	33	43	51	58
		80	16	19	29	30	30	30	80	19	24	36	46	56	65
		90	17	20	30	30	30	30	90	20	26	38	49	60	69
		100	17	21	30	30	30	30	100	21	27	40	52	63	73
		120	18	23	30	30	30	30	120	22	29	42	56	68	80
		140	18	24	30	30	30	30	140	23	30	44	58	72	85
		≥160	19	25	30	30	30	30	≥160	23	31	46	60	74	88
$T_{mor} = 80\%$	$h_{sous-mor}$ (en mm)	50	17	19	25	30	30	30	50	20	24	30	30	30	30
		60	18	22	29	30	30	30	60	22	27	30	30	30	30
		70	19	24	30	30	30	30	70	24	30	30	30	30	30
		80	20	25	30	30	30	30	80	25	30	30	30	30	30
		90	21	26	30	30	30	30	90	26	30	30	30	30	30
		100	21	27	30	30	30	30	100	27	30	30	30	30	30
		120	22	29	30	30	30	30	120	28	30	30	30	30	30
		140	23	30	30	30	30	30	140	29	30	30	30	30	30
		≥160	24	30	30	30	30	30	≥160	30	30	30	30	30	30
$T_{mor} = 60\%$	$h_{sous-mor}$ (en mm)	50	20	25	30	30	30	30	50	26	30	30	30	30	30
		60	23	28	30	30	30	30	60	28	30	30	30	30	30
		70	24	30	30	30	30	30	70	30	30	30	30	30	30
		80	25	30	30	30	30	30	80	30	30	30	30	30	30
		90	26	30	30	30	30	30	90	30	30	30	30	30	30
		100	27	30	30	30	30	30	100	30	30	30	30	30	30
		120	28	30	30	30	30	30	120	30	30	30	30	30	30
		140	28	30	30	30	30	30	140	30	30	30	30	30	30
		≥160	29	30	30	30	30	30	≥160	30	30	30	30	30	30
$T_{mor} = 40\%$	$h_{sous-mor}$ (en mm)	50	26	30	30	30	30	30	50	30	30	30	30	30	30
		60	28	30	30	30	30	30	60	30	30	30	30	30	30
		70	30	30	30	30	30	30	70	30	30	30	30	30	30
		80	30	30	30	30	30	30	80	30	30	30	30	30	30
		90	30	30	30	30	30	30	90	30	30	30	30	30	30
		100	30	30	30	30	30	30	100	30	30	30	30	30	30
		120	30	30	30	30	30	30	120	30	30	30	30	30	30
		140	30	30	30	30	30	30	140	30	30	30	30	30	30
		≥140	30	30	30	30	30	30	≥140	30	30	30	30	30	30

3. Éventuels compléments d'épaisseur à apporter

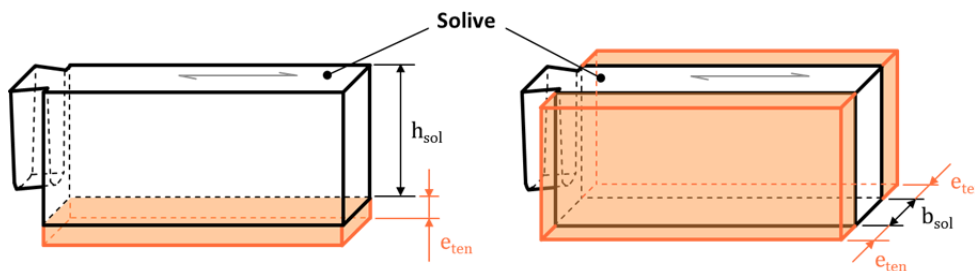
Pour obtenir une durée de résistance supplémentaire, il faut apporter une surépaisseur e déterminée ainsi :

- $e = 0,8$ mm par minute supplémentaire pour les résineux et le hêtre massifs
- $e = 0,7$ mm par minute supplémentaire pour les résineux et le hêtre lamellés
- $e = 0,55$ mm par minute supplémentaire pour les feuillus massifs et lamellés (sauf hêtre)

Pour que votre assemblage résiste pendant une certaine durée, il faut vérifier que cette durée est atteinte pour les deux modes de rupture : rupture du tenon et rupture de la mortaise. Il s'agira donc de calculer séparément les compléments d'épaisseurs e_{ten} et e_{mor} à apporter pour ce faire.

Pour augmenter la durée de résistance en cisaillement du tenon, le complément d'épaisseur doit être apporté ainsi :

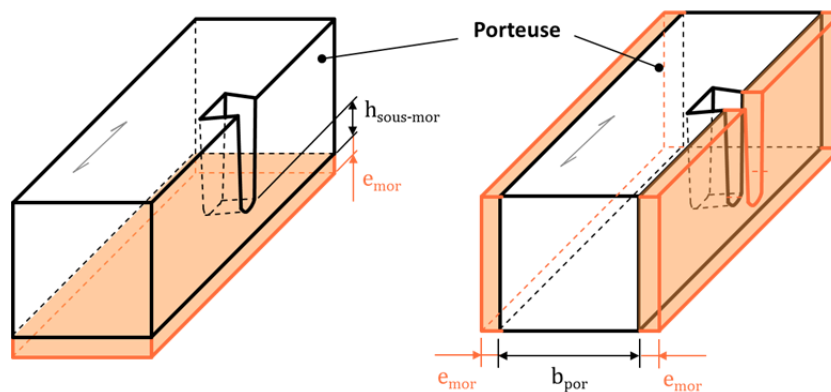
- Augmenter h_{sol} en ajoutant la surépaisseur e_{ten} sur la face inférieure de la solive
- Augmenter b_{sol} en élargissant la solive de 2 fois e_{ten}



Apport de surépaisseur : pour augmenter h_{sol} de e_{ten} (à gauche) et pour augmenter b_{sol} de 2 fois e_{ten} (à droite)

Pour augmenter la durée de résistance en cisaillement de la mortaise, le complément d'épaisseur doit être apporté ainsi :

- Augmenter $h_{sous-mor}$ en ajoutant la surépaisseur e_{mor} sur la face inférieure de la porteuse
- Augmenter b_{por} en élargissant la porteuse de 2 fois e_{mor}



Apport de surépaisseur : pour augmenter $h_{sous-mor}$ de e_{mor} (à gauche) et pour augmenter b_{por} de 2 fois e_{mor} (à droite)

Application Numérique : dans le même cas que l'application numérique précédente, et l'on vise une résistance de 30 minutes

On a un assemblage par queue d'aronde avec une porteuse en 100 x 180 et une solive en 80 x 160 en résineux massif.

Le tenon a pour largeur à sa base en partie supérieure 80 mm et en partie inférieure 70 mm.

Le tenon a une longueur de 40 mm et une hauteur de 110 mm.

La mortaise a la même hauteur et la même largeur que celles du tenon (au jeu près).

On a vu dans l'application numérique précédente que l'on est bien dans le domaine de validité, et on peut utiliser les tableaux de durée acquise

L'assemblage a été dimensionné à froid via une méthode simplifiée, on ne connaît pas la valeur des taux de travail à froid, on supposera donc 100%

Il s'agit de résineux avec $T_{ten} = T_{mor} = 100\%$ on utilisera donc pour chacun des deux modes de rupture le tableau le plus en haut à gauche

1/ Vis-à-vis de la rupture du tenon :

Pour $b_{sol} = 80$ mm et $h_{ten}/h_{sol} = 150/225 \approx 0,7$ le tableau donne 25 minutes. Il manque donc 5 minutes pour atteindre une résistance R30.

Il faudra ajouter une surépaisseur $e_{ten} = 0,8 \times 5 = 4$ mm

2/ Vis-à-vis de la rupture de la mortaise :

Pour $h_{sous-mor} = 180 - 110 = 70$ mm et $b_{por} = 100$ mm le tableau donne 18 minute. Il manque donc 12 minutes pour atteindre R30.

Il faudra ajouter une surépaisseur $e_{mor} = 0,8 \times 12 = 9,6$ mm que l'on peut arrondir à 10 mm

Bilan : Pour mémoire on avait prévu à froid une solive de section 80 x 160 et une porteuse de section 100 x 180

Ainsi pour obtenir R30 il faudra réaliser la solive avec une section d'au moins $(80 + 2 \times 4) \times (160 + 1 \times 4)$ soit une section minimale de 88 x 164

et il faudra réaliser la porteuse avec une section d'au moins $(100 + 2 \times 10) \times (180 + 1 \times 10)$ soit une section minimale de 120 x 190

MÉTHODES DE DIMENSIONNEMENT AVANCÉES

INTRODUCTION

Les méthodes avancées présentées dans la section ci-après ont pour objectif de permettre un dimensionnement optimisé des assemblages traditionnels de structures bois en situation incendie, dans une application stricte des principes de l'Eurocode 5.

Ces méthodes avancées sont présentées sur deux ou trois pages par technique d'assemblage. **Elles ne sont valides que dans les limites des domaines de validité qui sont définis pour chaque technique d'assemblage, et pour des structures bois couvertes (classes de service 1 et 2). La durée de résistance au feu maximale qui peut être justifiée à l'aide de ces méthodes est de 30 minutes.**

Pour chaque technique d'assemblage, un schéma général introduit les principales notations utilisées dans les formules de calcul.

Le paragraphe « **Domaine de validité** » donne les exigences (pour la plupart géométriques) à respecter afin de pouvoir utiliser les méthodes de dimensionnement présentées. Des indications sont données en cas de non-respect strict du domaine de validité, mais le praticien est seul responsable de la validité des hypothèses qu'il prendra de ce cas.

Le paragraphe « **Dimensionnement avancé** » permet pour un assemblage connu de calculer pour chaque mode de rupture la contrainte de calcul appliquée et la résistance de calcul. Afin de valider un assemblage, tous les modes de rupture doivent être vérifiés. Une application numérique est donnée pour chaque formule présentée.

Les efforts mentionnés dans toute cette section sont des efforts de calcul. L'effort de calcul en situation incendie est indiqué « fi » (par exemple $F_{d,fi}$ ou $V_{d,fi}$). Il est à déterminer au choix :

- Soit par combinaisons en utilisant les facteurs $\psi_{1,1}$ de la NF EN 1991-1-2 §4.3.1 et de son annexe nationale
- Soit pris par simplification égal à l'effort de calcul à froid multiplié par η_{fi} avec $\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{1,1} Q_{k,1}}{\gamma_k G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$ ou $\eta_{fi} = 0,7$

Dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080), les propriétés de résistance sont habituellement données au fractile à 5%. Or pour la vérification des structures bois en situation d'incendie, ce sont les propriétés de résistance au fractile à 20% qui doivent être utilisées (NF EN 1995-1-2 § 2.3.(3)). Dans toute la section **k_{fi} est le coefficient utilisé pour convertir les valeurs données au fractile à 5% en leur équivalent au fractile à 20%**. Il vaut :

- 1,25 pour le bois massif
- 1,15 pour le bois lamellé
- 1,1 pour le LVL

Dans toute la section, **la profondeur efficace de carbonisation sera calculée dans toute la section en utilisant la vitesse de carbonisation fictive β_n** . Ainsi on a dans toute la section : $d_{ef} = \beta_n t + k_0 d_0$

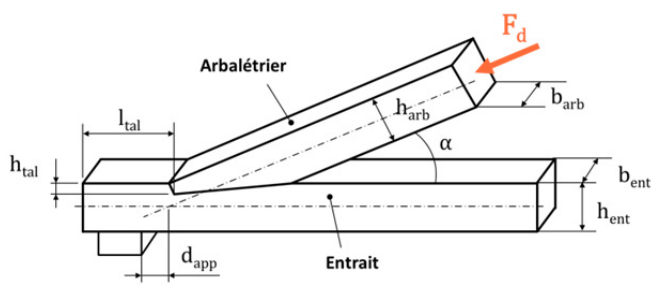
Avec : $d_0 = 7 \text{ mm}$

$k_0 =$ la valeur la plus petite entre 1 et $t/20$

$\beta_n =$ $\left\{ \begin{array}{l} 0,8 \text{ mm/min pour les résineux et le hêtre massifs} \\ 0,7 \text{ mm/min pour les résineux et le hêtre lamellés} \\ 0,55 \text{ mm/min pour les feuillus massifs et lamellés (sauf hêtre)} \end{array} \right.$

2.1. EMBREVEMENT SIMPLE EN CHARPENTE

PRÉSENTATION DE L'ASSEMBLAGE



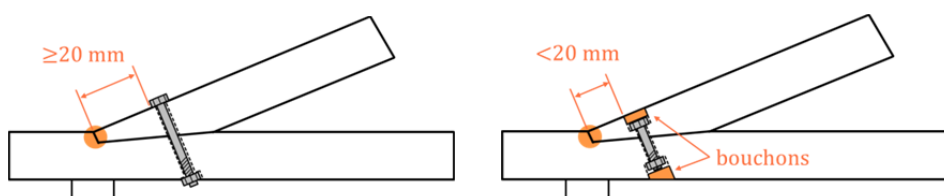
F_d	Effort de calcul le long de l'arbalétrier	[N]
α	Angle entre l'arbalétrier et l'entrait	[°]
b_{ent}	Largeur de l'entrait	[mm]
h_{ent}	Hauteur de l'entrait	[mm]
b_{arb}	Largeur de l'arbalétrier	[mm]
h_{arb}	Hauteur de l'arbalétrier	[mm]
h_{tal}	Hauteur du talon	[mm]
l_{tal}	Longueur du talon	[mm]
d_{app}	Distance de l'assemblage à l'appui	[mm]

DOMAINE DE VALIDITÉ DE LA MÉTHODE AVANCÉE

- TYPE D'EMBREVEMENT : embrèvement simple sans tenon-mortaise
- NATURE DES BOIS UTILISES : bois classés mécaniquement
- SECTIONS DES ELEMENTS
 - Largeur maximale : 180 mm pour l'arbalétrier et 200 mm pour l'entrait
 - Hauteur maximale : 300 mm
 - b_{arb} : $\leq b_{ent}$
- ANGLE ENTRAIT/ARBALETRIER : de 0° à 90°
- GEOMETRIE D'ENTAILLE : entaille taillée à la bissectrice
- HAUTEUR DU TALON
 - Si α inférieur à 50° : $h_{tal} \leq h_{ent} / 4$
 - Si α supérieur à 50° : $h_{tal} \leq h_{ent} / 6$
- LONGUEUR DU TALON : $150 \text{ mm} \leq l_{tal} \leq 8 \times h_{tal}$
- CONDITIONS D'APPUI : appui proche de l'aplomb du nœud de l'assemblage ($d_{app} \leq h_{ent}$)
- EXECUTION
 - Les zones sollicitées de l'assemblage doivent être exemptes de défauts rédhibitoires
 - Les bois doivent être mis en œuvre à une humidité proche de leur futur point d'équilibre (NF DTU 31.1)
 - Il ne doit y avoir aucun jeu au niveau du contact de l'about (NF DTU 31.1)
 - Le jeu au niveau du pas de l'embrèvement doit être limité à 2 mm

Des dispositions doivent être prises pour assurer le maintien du contact au niveau de l'about de l'embrèvement (par exemple charges permanentes, ou organes de maintien...).

- ORGANES DE MAINTIEN : de préférence non métalliques (chevilles en bois plus dur que ceux à assembler)
si organes de maintien métalliques :
 - se trouvent à au moins 20 mm des zones sollicitées (talon et about)
 - sinon sont protégés (chapelles et bouchons)
- DUREE MAXIMALE : méthode valable pour un temps t_{req} de résistance au feu maximal de 30 min
 $l_{tal} \geq 150 \text{ mm}$ doit être vérifié tout au long de l'incendie (jusqu'à $t = t_{req}$)
 $h_{tal} \geq 10 \text{ mm}$ doit être vérifié tout au long de l'incendie (jusqu'à $t = t_{req}$)



Protection des organes métalliques situés à moins de 20 mm des zones sollicitées de l'assemblage

DIMENSIONNEMENT AVANCÉ

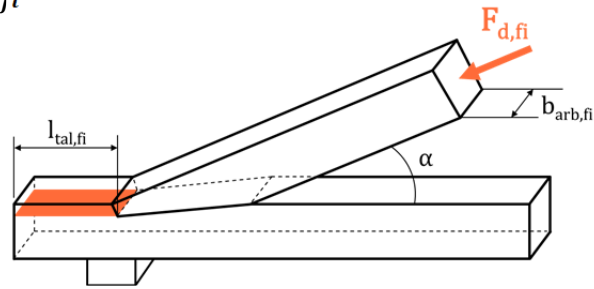
1. Vérification du cisaillement du talon : $f_{v,d,fi} \geq \tau_{d,fi}$

Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$\tau_{d,fi} = \frac{F_{d,fi} \times \cos \alpha \times k_{maj}}{b_{arb,fi} \times k_{cr} \times l_{tal,fi}}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi}$$



- Avec : k_{maj} coefficient de majoration de la contrainte en cisaillement
 égal à 1,25 pour le bois lamellé et le bois massif reconstitué
 égal à 1,65 pour le bois massif
- k_{cr} coefficient de prise en compte de l'influence des fissures dans l'entrait
 à prendre dans l'Amendement A1 à l'Eurocode 5 et dans l'Annexe Nationale (§ 6.1.7)
- $f_{v,k}$ résistance caractéristique au cisaillement du bois utilisé pour l'entrait [MPa]
 à prendre dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080)
- $b_{arb,fi}$ largeur de l'arbalétrier en situation incendie [mm] $b_{arb,fi} = b_{arb} - 2 d_{ef}$
- $l_{tal,fi}$ longueur du talon en situation incendie [mm] $l_{tal,fi} = l_{tal} - d_{ef}$
- Et : $F_{d,fi}$ effort de calcul le long de l'arbalétrier en situation incendie [N]
 k_{fi} coefficient de passage à une valeur fractile à 20% des propriétés de résistance
 d_{ef} profondeur efficace de carbonisation relative au matériau de l'entrait [mm]
 À déterminer comme indiqué en bas de page 22

Application Numérique :

Pour un entrait de section 160 x 160 et un arbalétrier de section 100 x 200 en lamellé collé résineux GL24, en classe de service 2

Avec une pente de 35°, un talon de hauteur 40 mm et de longueur 200 mm

Avec un effort de calcul à froid de 15 000 N issu de la combinaison 1,35 G

Et pour une durée de résistance à l'incendie visée de 30 minutes

La géométrie de l'assemblage à froid respecte bien le domaine de validité, on peut donc utiliser la méthode de dimensionnement avancée

$$d_{ef} = \beta_n t + k_0 d_0 = 0,7 \times 30 + 1 \times 7 = 28 \text{ mm}$$

$$\tau_{d,fi} = \frac{F_{d,fi} \times \cos \alpha \times k_{maj}}{b_{arb,fi} \times k_{cr} \times l_{tal,fi}} = \frac{0,7 \times 15\,000 \times 0,82 \times 1,25}{(100 - 2 \times 28) \times 1 \times (200 - 28)} = 1,42 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi} = 3,5 \times 1,15 = 4,03 \text{ MPa}$$

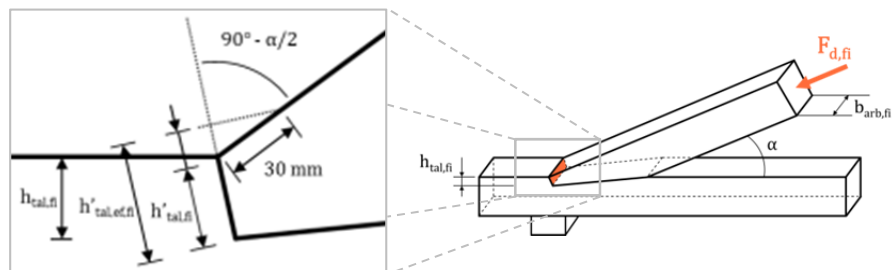
D'où un taux de travail de $1,42/4,03 = 35\%$ l'assemblage résiste bien durant 30 minutes au cisaillement du talon2. Vérification de la compression oblique l'about (côté arbalétrier) : $f_{c,2,d,fi} \geq \sigma_{c,2,d,fi}$

Calcul de la contrainte de compression [MPa]

$$\sigma_{c,2,d,fi} = \frac{F_{d,fi} \times \cos(\alpha/2)}{b_{arb,fi} \times h'_{tal,ef,fi}}$$

Calcul de la résistance en compression [Mpa]

$$f_{c,2,d,fi} = f_{c,2,k} \times k_{fi}$$



- Avec : $h'_{tal,ef,fi}$ longueur efficace de compression oblique de l'about côté arbalétrier en situation incendie [mm]
 $h'_{tal,ef,fi} = \frac{h_{tal,fi}}{\cos(\alpha/2)} + \min \left[30 \times \sin(\alpha/2); \frac{h_{tal,fi}}{\cos(\alpha/2)} \right]$
- $h_{tal,fi}$ hauteur du talon en situation incendie [mm] $h_{tal,fi} = h_{tal} - d_{ef}$
- $b_{arb,fi}$ largeur de l'arbalétrier en situation incendie [mm] $b_{arb,fi} = b_{arb} - 2 d_{ef}$

- $f_{c,2,\alpha,k}$ résistance caractéristique en compression oblique du bois utilisé à un angle de $\alpha/2$ [MPa]
- $$f_{c,2,\alpha,k} = \frac{f_{c,0,k} \times f_{c,90,k} \times k_{c,90}}{f_{c,0,k} \times \sin^2(\alpha/2) + k_{c,90} \times f_{c,90,k} \times \cos^2(\alpha/2)} \quad (\text{formule 6.16 de l'Eurocode 5 adaptée})$$
- $f_{c,0,k}$ résistance caractéristique à la compression longitudinale du bois utilisé pour l'arbalétrier [MPa] à prendre dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080)
- $f_{c,90,k}$ résistance caractéristique à la compression transversale du bois utilisé pour l'arbalétrier [MPa] à prendre dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080)
- $k_{c,90}$ coefficient de prise en compte de la configuration de chargement en compression transversale à prendre dans l'Amendement A1 à l'Eurocode 5 et dans l'Annexe Nationale (§ 6.1.5 (4)) (à considérer comme un élément reposant sur appuis discrets)

- Et : $F_{d,fi}$ effort de calcul le long de l'arbalétrier en situation incendie [N]
 k_{fi} coefficient de passage à une valeur fractile à 20% des propriétés de résistance
 d_{ef} profondeur efficace de carbonisation relative au matériau de l'arbalétrier [mm]
 À déterminer comme indiqué en bas de page 22

Application Numérique :

Dans le même cas que l'application numérique précédente

$$d_{ef} = \beta_n t + k_0 d_0 = 0,7 \times 30 + 1 \times 7 = 28 \text{ mm}$$

$$h'_{tal,ef,fi} = \frac{h_{tal,fi}}{\cos(\alpha/2)} + \min \left[30 \times \sin(\alpha/2); \frac{h_{tal,fi}}{\cos(\alpha/2)} \right] = \frac{(40-28)}{0,95} + \min \left[30 \times 0,3; \frac{(40-28)}{0,95} \right] = 12,6 + \min[9; 12,6] = 21,6 \text{ mm}$$

$$f_{c,2,\alpha,k} = \frac{f_{c,0,k} \times f_{c,90,k} \times k_{c,90}}{f_{c,0,k} \times \sin^2(\alpha/2) + k_{c,90} \times f_{c,90,k} \times \cos^2(\alpha/2)} = \frac{24 \times 2,5 \times 1,75}{24 \times 0,09 + 1,75 \times 2,5 \times 0,91} = 17,07 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,2,d,fi} = \frac{F_{d,fi} \times \cos(\alpha/2)}{b_{arb,fi} \times h'_{tal,ef,fi}} = \frac{0,7 \times 15\,000 \times 0,95}{(100 - 2 \times 28) \times 21,6} = 10,53 \text{ MPa}$$

$$f_{c,2,d,fi} = f_{c,2,\alpha,k} \times k_{fi} = 17,07 \times 1,15 = 19,64 \text{ MPa}$$

D'où un taux de travail de $10,53/19,64 = 54\%$ l'assemblage résiste bien durant 30 minutes à la compression de l'about
 Aussi à l'issue de l'incendie on aura :

$$l_{tal,fi} = l_{tal} - d_{ef} = 200 - 28 = 172 \text{ mm} \text{ qui sont supérieurs aux } 150 \text{ mm requis tout au long de l'incendie}$$

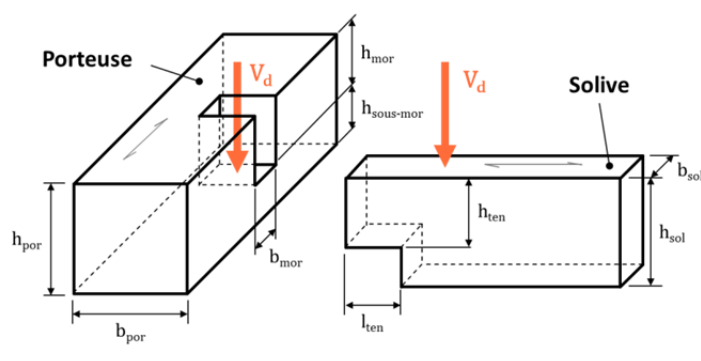
$$h_{tal,fi} = h_{tal} - d_{ef} = 40 - 28 = 12 \text{ mm} \text{ qui sont supérieurs aux } 10 \text{ mm requis tout au long de l'incendie}$$

SORTIE DU DOMAINE DE VALIDITÉ ET AUTRES REMARQUES

- En cas de non-respect des règles d'exécution concernant l'humidité des bois et les jeux à la mise en œuvre, en particulier dans le cas exceptionnel des bois de forte section présentant lors de leur mise en œuvre un taux d'humidité relativement élevé, le calcul doit tenir compte d'une attaque du feu au niveau des interfaces entre pièces.
- Si les matériaux des deux éléments sont différents, en particulier si celui de l'entrait est moins résistant que celui de l'arbalétrier, justifiez la résistance en compression oblique de l'about côté entrait. Le calcul se fait sur les mêmes principes que celui côté arbalétrier, avec toutefois une longueur efficace de compression oblique à déterminer autrement.
- Si vous ne pouvez pas respecter les préconisations sur la profondeur d'entaille maximale, justifiez la résistance en cisaillement transversal de la section d'entrait résiduelle au droit de l'entaille.
- Si la longueur du talon est inférieure à 150 mm ou que des fentes existent dans le plan de cisaillement de celui-ci, renforcez-le en utilisant par exemples des vis disposées transversalement au fil du bois.
- Lorsque l'appui n'est pas suffisamment proche de l'aplomb du nœud de l'assemblage, l'excentricité implique des efforts parasites de cisaillement, flexion et traction dans l'entrait. Aussi le fonctionnement global de la ferme est modifié, et sa modélisation ne peut plus être canonique. Ainsi si on a $d_{app} > h_{ent}$ il faut :
 - Soit déplacer l'appui en ajoutant une jambe de force, un corbeau.... pour recréer un appui canonique
 - Soit justifier la résistance de l'entrait aux efforts parasites ainsi créés, et tenir compte de l'excentricité dans la modélisation du fonctionnement global de la ferme

2.2. TENON-MORTAISE EN PLANCHER

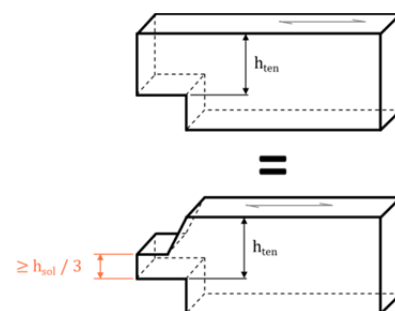
PRÉSENTATION DE L'ASSEMBLAGE



V_d	Effort tranchant de calcul	[N]
h_{por}	Hauteur de la poutre porteuse	[mm]
b_{por}	Largeur de la poutre porteuse	[mm]
h_{sol}	Hauteur de la solive	[mm]
b_{sol}	Largeur de la solive	[mm]
h_{mor}	Hauteur de la mortaise	[mm]
$h_{sous-mor}$	Hauteur de bois sous la mortaise	[mm]
b_{mor}	Largeur de la mortaise	[mm]
h_{ten}	Hauteur du tenon	[mm]
l_{ten}	Longueur du tenon	[mm]

DOMAINE DE VALIDITÉ DE LA MÉTHODE AVANCÉE

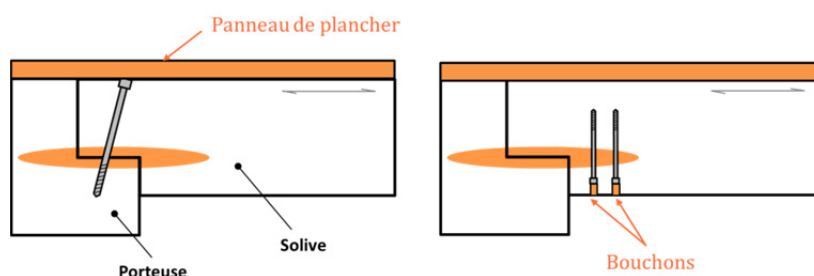
- TYPE DE TENON-MORTAISE tenon débouchant en partie supérieure ou avec mordâne
- NATURE DES BOIS UTILISES bois classés mécaniquement
- SECTIONS DES ELEMENTS
 - Largeur maximale 180 mm
 - Hauteur maximale 300 mm
 - Solive aussi large ou moins large que la porteuse
- GEOMETRIE DE L'ASSEMBLAGE
 - Angle porteur/supporté $45^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$
 - Largeur du tenon toute largeur ou avec épaulements ≤ 10 mm
 - Longueur du tenon $40 \text{ mm} \leq l_{ten} \leq 80 \text{ mm}$ et $l_{ten} \geq b_{por}/3$
 - Hauteur du tenon $h_{ten} \geq h_{sol}/2$
 - Hauteur sous mortaise $h_{sous-mor} \geq h_{por}/4$
- EXECUTION
 - Les zones sollicitées de l'assemblage doivent être exemptes de défauts rédhibitoires
 - Mise en œuvre à une humidité proche du futur point d'équilibre (NF DTU 31.1)
 - Il ne doit y avoir aucun jeu au niveau de l'appui du tenon sur la mortaise (NF DTU 31.1)
 - Les autres jeux doivent être limités à 2 mm



Le tenon débouchant en partie supérieure et le tenon avec mordâne se traitent de façon similaire si la partie centrale du tenon est suffisamment haute

Des dispositions doivent être prises pour assurer le maintien du contact au niveau de l'appui du tenon sur la mortaise (par exemple charges permanentes, ou organes de maintien...).

- ORGANES DE MAINTIEN de préférence non métalliques (chevilles en bois plus dur que ceux à assembler)
si organes de maintien métalliques :
 - ne sont pas visibles (sous le panneau de plancher)
 - sinon sont protégés (chappelles et bouchons)
- DUREE MAXIMALE méthode valable pour un temps t_{req} de résistance au feu maximal de 30 min
 $h_{sous-mor} \geq h_{por}/6$ doit être vérifié tout au long de l'incendie (jusqu'à $t = t_{req}$)
 $h_{sous-mor} \geq 20$ mm doit être vérifié tout au long de l'incendie (jusqu'à $t = t_{req}$)



Protection des organes métalliques visibles traversant les zones sollicitées de l'assemblage

DIMENSIONNEMENT AVANCÉ

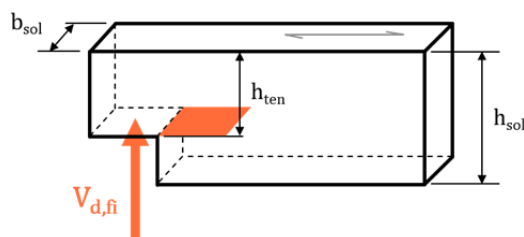
1. Vérification du cisaillement du tenon (cisaillement et traction transversale combinés) : $f_{v,d,fi} \geq \tau_{d,fi}$

Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$\tau_{d,fi} = \frac{3}{2} \times k_{cal} \times \frac{V_{d,fi} \times h_{sol,fi}}{b_{sol,fi} \times k_{cr} \times h_{ten,fi}^2}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi}$$



Avec : k_{cal} coefficient de calibration intégrant les incertitudes de modélisation égal à 1,29 (issu de l'étude de calibration pour le dimensionnement à froid cf. Guide CODIFAB dédié)

k_{cr} coefficient de prise en compte de l'influence des fissures dans la solive à prendre dans l'Amendement A1 à l'Eurocode 5 et dans l'Annexe Nationale (§ 6.1.7)

$f_{v,k}$ résistance caractéristique au cisaillement du bois utilisé pour la solive [MPa] à prendre dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080)

$h_{sol,fi}$ hauteur de la solive en situation incendie [mm] $h_{sol,fi} = h_{sol} - d_{ef}$

$b_{sol,fi}$ largeur de la solive en situation incendie [mm] $b_{sol,fi} = b_{sol} - 2 d_{ef}$

$h_{ten,fi}$ hauteur du tenon en situation incendie [mm] $h_{ten,fi} = \min[h_{ten}; h_{sol,fi}]$

Et : $V_{d,fi}$ effort tranchant de calcul en situation incendie [N]

k_{fi} coefficient de passage à une valeur fractile à 20% des propriétés de résistance

d_{ef} profondeur efficace de carbonisation relative au matériau de la solive [mm]

À déterminer comme indiqué en bas de page 22

Application Numérique :

Pour une poutre porteuse et une solive de sections 75 x 225 en résineux massif C24, en classe de service 1

Le tenon est toute largeur, a une hauteur de 150 mm et une longueur de 50 mm

La mortaise a également une hauteur de 150 mm et débouche sur le dessus de l'élément porteur, on a une hauteur de bois de 75 mm sous mortaise

Avec un effort de calcul à froid de 4 500 N issu de la combinaison 1,35 G + 1,5 Q

Et pour une durée de résistance à l'incendie visée de 15 minutes

La géométrie de l'assemblage à froid respecte bien le domaine de validité, on peut donc utiliser la méthode de dimensionnement avancée

$$d_{ef} = \beta_n t + k_0 d_0 = 0,8 \times 15 + \frac{15}{20} \times 7 = 17,25 \text{ mm}$$

$$\tau_{d,fi} = \frac{3}{2} \times k_{cal} \times \frac{V_{d,fi} \times h_{sol,fi}}{b_{sol,fi} \times k_{cr} \times h_{ten,fi}^2} = \frac{3}{2} \times 1,29 \times \frac{0,7 \times 4\,500 \times (225 - 17,25)}{(75 - 2 \times 17,25) \times 0,67 \times \min[150; 225 - 17,25]^2} = 2,07 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi} = 4 \times 1,25 = 5 \text{ MPa}$$

D'où un taux de travail de $2,07/5 = 41\%$ l'assemblage résiste bien durant 15 minutes au cisaillement du tenon

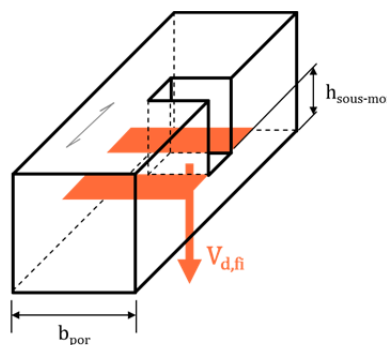
2. Vérification du cisaillement de la mortaise (cisaillement et traction transversale combinés) : $f_{v,d,fi} \geq \tau_{d,fi}$

Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$\tau_{d,fi} = \frac{3}{4} \times \frac{V_{d,fi}}{b_{por,fi} \times k_{cr} \times h_{sous-mor,fi}}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi}$$



Avec : $f_{v,k}$ résistance caractéristique au cisaillement du bois utilisé pour la porteuse [MPa]
à prendre dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080)

k_{cr} coefficient de prise en compte de l'influence des fissures dans la porteuse
à prendre dans l'Amendement A1 à l'Eurocode 5 et dans l'Annexe Nationale (§ 6.1.7)

$b_{por,fi}$ largeur de la poutre porteuse en situation incendie [mm] $b_{por,fi} = b_{por} - 2 d_{ef}$

$h_{sous-mor,fi}$ hauteur de bois sous la mortaise en situation incendie [mm] $h_{sous-mor,fi} = h_{sous-mor} - d_{ef}$

Et : $V_{d,fi}$ effort tranchant de calcul en situation incendie [N]

k_{fi} coefficient de passage à une valeur fractile à 20% des propriétés de résistance

d_{ef} profondeur efficace de carbonisation relative au matériau de la porteuse [mm]

À déterminer comme indiqué en bas de page 22

Application Numérique :

Dans le même cas que l'application numérique précédente

$$d_{ef} = \beta_n t + k_0 d_0 = 0,8 \times 15 + \frac{15}{20} \times 7 = 17,25 \text{ mm}$$

$$\tau_{d,fi} = \frac{3}{4} \times \frac{V_{d,fi}}{b_{por,fi} \times k_{cr} \times h_{sous-mor,fi}} = \frac{3}{4} \times \frac{0,7 \times 4500}{(75 - 2 \times 17,25) \times 0,67 \times (75 - 17,25)} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi} = 4 \times 1,25 = 5 \text{ MPa}$$

D'où un taux de travail de $1,51/5 = 30\%$ l'assemblage résiste bien durant 15 minutes au cisaillement de la mortaise

Aussi à l'issue de l'incendie on aura :

$$h_{sous-mor,fi} = h_{sous-mor} - d_{ef} = 75 - 17,25 = 57,75 \text{ mm}$$

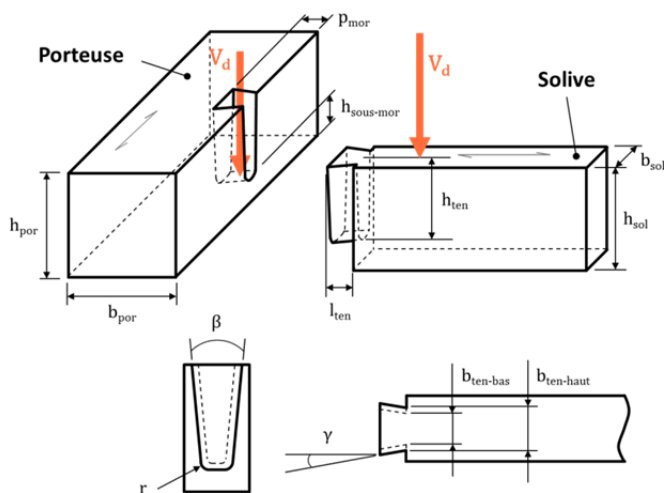
qui sont supérieurs aux 20 mm et aux $225/6=37,5$ mm requis tout au long de l'incendie

SORTIE DU DOMAINE DE VALIDITÉ ET AUTRES REMARQUES

- En cas de non-respect des règles d'exécution concernant l'humidité des bois et les jeux à la mise en œuvre, en particulier dans le cas exceptionnel des bois de forte section présentant lors de leur mise en œuvre un taux d'humidité relativement élevé, le calcul doit tenir compte d'une attaque du feu au niveau des interfaces entre pièces.

2.3. QUEUE D'ARONDE EN PLANCHER

PRÉSENTATION DE L'ASSEMBLAGE



V_d	Effort tranchant de calcul	[N]
h_{por}	Hauteur de la poutre porteuse	[mm]
b_{por}	Largeur de la poutre porteuse	[mm]
h_{sol}	Hauteur de la solive	[mm]
b_{sol}	Largeur de la solive	[mm]
p_{mor}	Profondeur de la mortaise	[mm]
$h_{sous-mor}$	Hauteur de bois sous la mortaise	[mm]
h_{ten}	Hauteur du tenon	[mm]
$b_{ten-haut}$	Largeur du tenon à sa base en haut	[mm]
$b_{ten-bas}$	Largeur du tenon à sa base en bas	[mm]
l_{ten}	Longueur du tenon	[mm]
r	Rayon des congés du tenon	[mm]
α	Angle porteur/supporté	[°]
β	Angle des flancs de la queue d'aronde	[°]
γ	Angle de taille de la queue d'aronde	[°]

DOMAINE DE VALIDITÉ DE LA MÉTHODE AVANCÉE

- TYPE DE QUEUE D'ARONDE tenon centré sur sa largeur
- NATURE DES BOIS UTILISES bois classés mécaniquement
- SECTIONS DES ELEMENTS
 - Largeur maximale 180 mm
 - Hauteur maximale 240 mm
 - Solive aussi large ou moins large que la poutre porteuse
- GEOMETRIE DE L'ASSEMBLAGE
 - Hauteur de bois sous la mortaise $h_{sous-mor} \geq h_{por} / 4$
 - Hauteur du tenon $h_{ten} \geq 0,6 \times h_{sol}$
 - Largeur du tenon $b_{ten-haut} \geq 0,8 \times b_{sol}$ et $b_{ten-bas} \geq 0,5 \times b_{sol}$
 - Longueur du tenon $25 \text{ mm} \leq l_{ten} \leq 80 \text{ mm}$
 - Rayon des congés du tenon $10 \text{ mm} \leq r \leq 60 \text{ mm}$
 - Angle porteur/supporté $45^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$
 - Angle des flancs de la queue d'aronde $4^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$
 - Angle de taille de la queue d'aronde $10^\circ \leq \gamma \leq 20^\circ$
- EXECUTION
 - Les zones sollicitées de l'assemblage doivent être exemptes de défauts rédhibitoires
 - Les bois doivent être mis en œuvre à une humidité proche de leur futur point d'équilibre (NF DTU 31.1)
 - Les jeux doivent être limités à 2 mm

Des dispositions doivent être prises pour assurer le maintien du contact au niveau de l'appui du tenon sur la mortaise (par exemple charges permanentes, ou organes de maintien...).

- ORGANES DE MAINTIEN de préférence non métalliques (chevilles en bois plus dur que ceux à assembler)
si organes de maintien métalliques :
 - ne sont pas visibles (sous le panneau de plancher)
 - sinon sont protégés (chapelles et bouchons)
- DUREE MAXIMALE méthode valable pour un temps t_{req} de résistance au feu maximal de 30 min
 $p_{mor} \geq 10 \text{ mm}$ doit être vérifié tout au long de l'incendie (jusqu'à $t = t_{req}$)
 $h_{sous-mor} \geq h_{por} / 6$ et $h_{sous-mor} \geq 20 \text{ mm}$ doivent être vérifiés tout au long de l'incendie

DIMENSIONNEMENT AVANCÉ

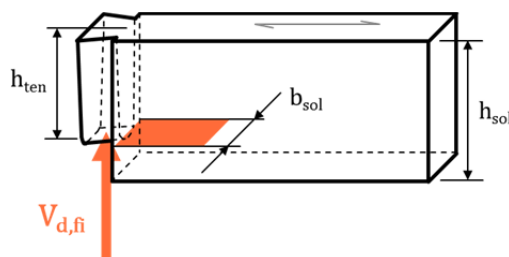
1. Vérification du cisaillement du tenon (cisaillement et traction transversale combinés) : $f_{v,d} \geq \tau_d$

Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$\tau_{d,fi} = \frac{3}{2} \times k_{cal} \times \frac{V_{d,fi} \times h_{sol,fi}}{b_{sol,fi} \times k_{cr} \times h_{ten,fi}^2}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi}$$



- Avec :
- k_{cal} coefficient de calibration intégrant les incertitudes de modélisation égal à 1,61 (issu de l'étude de calibration pour le dimensionnement à froid cf. Guide CODIFAB dédié)
 - k_{cr} coefficient de prise en compte de l'influence des fissures dans la solive à prendre dans l'Amendement A1 à l'Eurocode 5 et dans l'Annexe Nationale (§ 6.1.7)
 - $f_{v,k}$ résistance caractéristique au cisaillement du bois utilisé pour la solive [MPa] à prendre dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080)
 - $h_{sol,fi}$ hauteur de la solive en situation incendie [mm] $h_{sol,fi} = h_{sol} - d_{ef}$
 - $b_{sol,fi}$ largeur de la solive en situation incendie [mm] $b_{sol,fi} = b_{sol} - 2 d_{ef}$
 - $h_{ten,fi}$ hauteur du tenon en situation incendie [mm] $h_{ten,fi} = \min[h_{ten}; h_{sol,fi}]$
- Et :
- $V_{d,fi}$ effort tranchant de calcul en situation incendie [N]
 - k_{fi} coefficient de passage à une valeur fractile à 20% des propriétés de résistance
 - d_{ef} profondeur efficace de carbonisation relative au matériau de la solive [mm]
- À déterminer comme indiqué en bas de page 22

Application Numérique :

Pour une poutre porteuse de section 100 x 180 et une solive de section 80 x 160, en résineux massif C24, en classe de service 1
Le tenon a pour largeur à sa base en partie supérieure 80 mm et en partie inférieure 70 mm, une hauteur de 110 mm et une longueur de 30 mm
La mortaise aura la même hauteur et la même largeur que celles du tenon (au jeu près), avec une hauteur de bois sous mortaise de 70 mm
Avec un effort de calcul à froid de 3 000 N issu de la combinaison 1,35 G + 1,5 Q
Et pour une durée de résistance à l'incendie visée de 15 minutes
La géométrie de l'assemblage à froid respecte bien le domaine de validité, on peut donc utiliser la méthode de dimensionnement avancée

$$d_{ef} = \beta_n t + k_0 d_0 = 0,8 \times 15 + \frac{15}{20} \times 7 = 17,25 \text{ mm}$$

$$\tau_{d,fi} = \frac{3}{2} \times k_{cal} \times \frac{V_{d,fi} \times h_{sol,fi}}{b_{sol,fi} \times k_{cr} \times h_{ten,fi}^2} = \frac{3}{2} \times 1,29 \times \frac{0,7 \times 3\,000 \times (160 - 17,25)}{(80 - 2 \times 17,25) \times 0,67 \times \min[110; 160 - 17,25]^2} = 1,96 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi} = 4 \times 1,25 = 5 \text{ MPa}$$

D'où un taux de travail de $1,96/5 = 39\%$ l'assemblage résiste bien durant 15 minutes au cisaillement du tenon

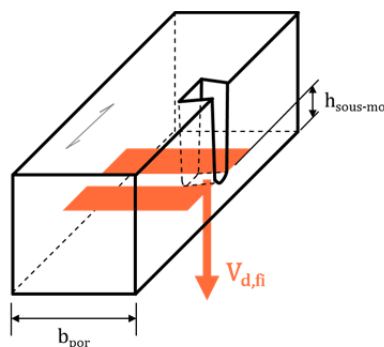
2. Vérification du cisaillement de la mortaise (cisaillement et traction transversale combinés) : $f_{v,d} \geq \tau_d$

Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$\tau_{d,fi} = \frac{3}{4} \times \frac{V_{d,fi}}{b_{ef,fi} \times k_{cr} \times h_{s\text{ous-mor},fi}}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi}$$



Avec : k_{cr} coefficient de prise en compte de l'influence des fissures dans la porteuse à prendre dans l'Amendement A1 à l'Eurocode 5 et dans l'Annexe Nationale (§ 6.1.7)

$f_{v,k}$ résistance caractéristique au cisaillement du bois utilisé pour la porteuse [MPa] à prendre dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080)

$b_{ef,fi}$ largeur efficace de cisaillement de la porteuse en situation incendie [mm] $b_{ef,fi} = \min[100; b_{por,fi}]$

$b_{por,fi}$ largeur de la porteuse en situation incendie [mm] $b_{por,fi} = b_{por} - 2 d_{ef}$

$h_{s\text{ous-mor},fi}$ hauteur de bois sous la mortaise en situation incendie [mm] $h_{s\text{ous-mor},fi} = h_{s\text{ous-mor}} - d_{ef}$

Et : $V_{d,fi}$ effort tranchant de calcul en situation incendie [N]

k_{fi} coefficient de passage à une valeur fractile à 20% des propriétés de résistance

d_{ef} profondeur efficace de carbonisation relative au matériau de la porteuse [mm]

À déterminer comme indiqué en bas de page 22

Application Numérique :

Dans le même cas que l'application numérique précédente

$$b_{ef,fi} = \min[100; b_{por,fi}] = \min[100; 100 - 2 \times 17,25] = \min[100; 65,5] = 65,5 \text{ mm}$$

$$\tau_{d,fi} = \frac{3}{4} \times \frac{V_{d,fi}}{b_{ef,fi} \times k_{cr} \times h_{s\text{ous-mor},fi}} = \frac{3}{4} \times \frac{0,7 \times 3\,000}{65,5 \times 0,67 \times (70 - 17,25)} = 0,68 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi} = 4 \times 1,25 = 5 \text{ MPa}$$

D'où un taux de travail de $0,68/5 = 14\%$ l'assemblage résiste bien durant 15 minutes au cisaillement de la mortaise

Aussi à l'issue de l'incendie on aura :

$$p_{mor,fi} = l_{ten} - d_{ef} = 30 - 17,25 = 12,75 \text{ mm qui sont supérieurs aux 10 mm requis tout au long de l'incendie}$$

$$h_{s\text{ous-mor},fi} = h_{s\text{ous-mor}} - d_{ef} = 70 - 17,25 = 52,75 \text{ mm qui sont supérieurs aux 20 mm et aux } 180/6=30 \text{ mm requis tout au long de l'incendie}$$

SORTIE DU DOMAINE DE VALIDITÉ ET AUTRES REMARQUES

- En cas de non-respect des règles d'exécution concernant l'humidité des bois et les jeux à la mise en œuvre, en particulier dans le cas exceptionnel des bois de forte section présentant lors de leur mise en œuvre un taux d'humidité relativement élevé, le calcul doit tenir compte d'une attaque du feu au niveau des interfaces entre pièces.

MÉTHODOLOGIE DE PROJET

INTRODUCTION

Le présent guide est le fruit d'un projet rédactionnel qui a couru sur la totalité de l'année 2015. Ce projet confié par le CODIFAB à la société C4Ci s'est découpé en 6 phases :

1. le recueil et l'étude détaillée des méthodes de calcul existantes
2. le recueil des données d'essais et retours d'expérience disponibles concernant les assemblages traditionnels
3. la proposition de méthodes pour le calcul de la résistance des assemblages traditionnels
4. leur discussion et leur amélioration grâce au groupe consultatif d'experts
5. leur simplification
6. la rédaction du présent guide

La section ci-après présente de façon synthétique les principales étapes de réalisation projet, afin que le lecteur curieux ou averti puisse en comprendre les tenants et les aboutissants. Cette section sera utile également dans l'éventualité d'une future révision du présent guide et des méthodes de calcul qui y sont présentées.

Pour en savoir plus, les rapports complets de l'étude sont disponibles auprès du CODIFAB.

3.1. TRAVAIL BIBLIOGRAPHIQUE

Le travail de recherche bibliographique concernant la résistance au feu des assemblages traditionnels bois-bois a abouti très rapidement au constat : **aucun travail conséquent n'a été rendu public dans le monde sur le sujet**. Seule la campagne d'essais menée en France en 2014 par le CSTB pour l'UMB FFB constitue une source de données d'essais fiables. Toutefois, les assemblages traditionnels bois-bois sont à la fois « assemblages » et « sections massives de bois », on imagine aisément pouvoir tirer avantage des connaissances et méthodes existantes sur la résistance à l'incendie de ceux-ci.

Ainsi, le travail bibliographique a eu pour principaux objectifs de :

- Recueillir les quelques données d'essais et retours d'expérience disponibles
- Les confronter aux connaissances et méthodes existantes concernant les assemblages et les sections massives
- Faire émerger de cette confrontation la compréhension et la prédiction des principaux mécanismes en jeu

PRINCIPE DE JUSTIFICATION DES STRUCTURES BOIS SOUSMISES A L'INCENDIE

L'EN 1995-1-2 [2] exprime le principe de vérification des structures bois soumises à l'incendie dans le domaine des efforts :

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad (\S 2.4.1(2)P)$$

Avec : $E_{d,fi}$ Valeur de calcul de l'effet des actions pour la situation incendie

$R_{d,t,fi}$ Valeur de calcul de la résistance correspondante pour la situation incendie

Certaines méthodes simplifiées de l'Eurocode utilisent les équations écrites dans le domaine des efforts et transformées pour les exprimer dans le domaine du temps. Nous en détaillerons certaines plus loin.

DETERMINATION DE L'EFFET DES ACTIONS

L'EN 1995-1-2 donne deux possibilités pour déterminer $E_{d,fi}$:

En déterminant les combinaisons d'actions pour la situation incendie (§ 2.4.2(1))

Il s'agit de déterminer l'effet des actions pour $t=0$ en utilisant les facteurs de combinaison $\psi_{1,1}$ ou $\psi_{2,1}$ suivant EN 1991-1-2 §4.3.1. Pour la France l'annexe nationale impose l'utilisation de $\psi_{1,1}$.

En utilisant un coefficient de réduction par rapport à la situation à froid (§ 2.4.2(2))

Il s'agit de multiplier l'effet des actions à froid par un coefficient de réduction : $E_{d,fi} = \eta_{fi} \times E_d$

Avec : η_{fi} calculé par $\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$ avec $\psi_{fi} = \psi_{1,1}$ pour la France (cf. point plus haut)

Ou : η_{fi} approximé forfaitairement (pour la France l'annexe nationale impose la valeur de 0,7)

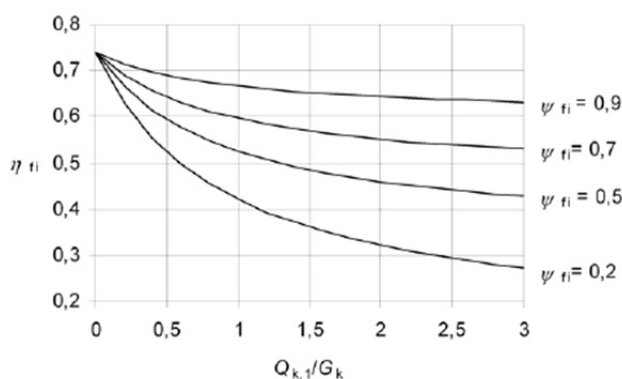


Figure 2.1 – Exemples of reduction factor η_{fi} versus load ratio $Q_{k,1}/G_k$ according to expression (2.9)

Valeurs de η_{fi} fonction de $Q_{k,1}/G_k$ et de ψ_{fi} pour $\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_{Q1} = 1,5$

SECTION RESIDUELLE DES ELEMENTS BOIS

L'EN 1995-1-2 donne deux vitesses de carbonisation pour déterminer la section résiduelle :

La vitesse de carbonisation unidimensionnelle (§ 3.4.2(1))

On a : $d_{char,0} = \beta_0 t$ et on prend en compte l'arrondi des angles des éléments (rayon = $d_{char,0}$)

Cette vitesse n'est utilisable que pour une épaisseur minimale des éléments définie suivant 3.4.2(3). Si les éléments ne sont pas assez épais, on doit utiliser la vitesse fictive.

La vitesse de carbonisation fictive (§ 3.4.2(2) et § 4.4.2(1) et annexe nationale)

On a : $d_{char,n} = \beta_n t$ et on ignore l'arrondi des angles des éléments (l'effet des arrondis est inclus dans β_n)

Table 3.1 – Design charring rates β_0 and β_n of timber, LVL, wood panelling and wood-based panels

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Softwood and beech Glued laminated timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ Solid timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,65	0,7 0,8
b) Hardwood Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of 290 kg/m^3 Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,50	0,7 0,55
c) LVL with a characteristic density of $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Panels Wood panelling Plywood Wood-based panels other than plywood	0,9 ^a 1,0 ^a 0,9 ^a	– – –

^a The values apply to a characteristic density of 450 kg/m^3 and a panel thickness of 20 mm; see 3.4.2(9) for other thicknesses and densities.

Tableau des vitesses de carbonisation de l'EN 1995-1-2

PROPRIETES MECANIQUES DES ELEMENTS BOIS

L'Eurocode permet de prendre en compte de la modification des performances de deux façons alternatives :

- Soit on utilise une **méthode de calcul avancée par éléments finis** intégrant les modèles thermiques et mécaniques des matériaux, et on utilise les facteurs de réduction des résistances et rigidités en fonction de la température donnés par l'Annexe B
- Soit on utilise une **méthode de calcul simplifiée nommée « méthode de la section réduite »** qui consiste à utiliser les mêmes propriétés du matériau bois qu'à froid tout en réduisant forfaitairement la section de ces éléments pour tenir compte de la perte de performance dans la zone de pyrolyse

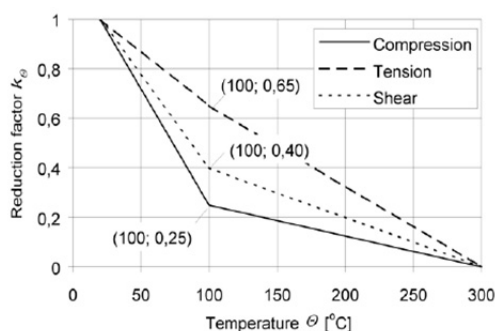
Méthode de calcul avancée par éléments finis

Figure B4 – Reduction factor for strength parallel to grain of softwood

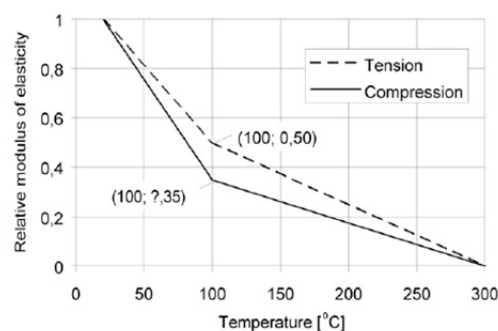


Figure B5 – Effect of temperature on modulus of elasticity parallel to grain of softwood

Facteurs de réduction des résistances et rigidités donnés par l'Annexe B de l'EN 1995-1-2

Méthode de la section réduite

On définit une épaisseur carbonisée effective, basée sur l'épaisseur carbonisée réelle que l'on augmente

$$\text{On a : } d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0 = \beta_n t + k_0 d_0$$

$$\text{Avec : } d_0 = 7 \text{ mm et } k_0 = \min[1; t/20]$$

Note : ceci revient à considérer une couche de 7 mm aux propriétés nulles. En réalité, comme nous l'avons vu plus haut, il s'agit d'une couche d'environ 35 mm dont les propriétés sont réduites d'environ 20%.

Autres éléments méthodologiques de l'EN 1995-1-2

1. Quelle que soit la méthode de calcul choisie (éléments finis ou section réduite) les propriétés de référence à utiliser ne sont plus les valeurs fractiles à 5% mais celles à 20%. Le coefficient k_{fi} permet de passer des unes aux autres ainsi (§ 2.3.(3)) :

$$\text{Propriétés de résistance : } f_{20} = k_{fi} \times f_k$$

$$\text{Propriétés de rigidité : } S_{20} = k_{fi} \times S_{05}$$

Avec k_{fi} donné par le tableau 2.1 (§ 2.3(3))

	k_{fi}
Solid timber	1,25
Glued-laminated timber	1,15
Wood-based panels	1,15
LVL	1,1
Connections with fasteners in shear with side members of wood and wood-based panels	1,15
Connections with fasteners in shear with side members of steel	1,05
Connections with axially loaded fasteners	1,05

Coefficient k_{fi} fonction du matériau (table 2.1 de l'EN 1995-1-2)

2. Les coefficients partiels à utiliser sont donnés au § 2.3(1)P :

$$\text{Propriétés de résistance : } f_{d,fi} = k_{mod,fi} \times \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$\text{Propriétés de rigidité : } S_{d,fi} = k_{mod,fi} \times \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}}$$

Avec : $\gamma_{M,fi} = 1$ pour la France (annexe nationale § 2.3(1)P)

$k_{mod,fi} = 1$ pour tous (§ 4.2.2(5))

3. Il est indiqué en complément pour la vérification simplifiée des éléments que (§ 4.3) :

- La stabilité latérale doit être garantie afin que l'élément résiduel ne flambe pas
- La compression transversale peut être négligée
- Le cisaillement peut être négligé dans les sections entières
- La section résiduelle des poutres entaillées au niveau de l'entaille doit être supérieure à 60% de la section requise à froid

DETERMINATION DE LA RESISTANCE DES ASSEMBLAGES PAR TIGES

Méthode forfaitaire

Il s'agit de donner des durées de résistance forfaitaires par type d'organe pour un assemblage non protégé (§ 6.2.1.1(1))

Table 6.1 — Fire resistances of unprotected connections with side members of wood

	Time of fire resistance $t_{d,fi}$ min	Provisions ^a
Nails	15	$d \geq 2,8$ mm
Screws	15	$d \geq 3,5$ mm
Bolts	15	$t_1 \geq 45$ mm
Dowels	20	$t_1 \geq 45$ mm
Connectors according to EN 912	15	$t_1 \geq 45$ mm

^a d is the diameter of the fastener and t_1 is the thickness of the side member

Tableau des résistances forfaitaires pour les assemblages non protégés

- Avec possibilité d'augmenter celles-ci (sans dépasser 30 min) en augmentant l'épaisseur et la largeur des éléments bois, ainsi que les distances des organes aux bords et aux extrémités de a_{fi} (§ 6.2.1.1(2))

$$a_{fi} = \beta_n \times k_{flux} \times (t_{req} - t_{d,fi})$$

Avec :

- β_n vitesse de carbonisation (déjà vu plus haut)
- $k_{flux} = 1,5$ pour tenir compte du flux de chaleur augmenté dans l'organe
- t_{req} temps de résistance requis
- $t_{d,fi}$ temps forfaitaire donné par le tableau 6.1

- Ou avec possibilité d'augmenter celles-ci en protégeant les organes par une protection de durée avant démarrage de la carbonisation t_{ch} (§ 6.2.1.2(1))

$$t_{ch} \geq t_{req} - 0,5 t_{d,fi} \quad \text{pour les protections en bois, panneaux à base de bois, ou plaques de plâtre de type A ou H}$$

$$t_{ch} \geq t_{req} - 1,2 t_{d,fi} \quad \text{pour les protections en plâtre de type F}$$

Avec :

- t_{req} temps de résistance requis
- $t_{d,fi}$ temps forfaitaire donné par le tableau 6.1

Méthode de la charge réduite

L'étude analytique de la résistance des assemblages par tiges en situation incendie a montré que l'on pouvait approximer la perte de résistance avec le temps à une fonction exponentielle négative.

Ainsi on peut calculer la résistance de l'assemblage à l'instant t à partir de la résistance à $t = 0$ avec :

$$F_{v,Rk,fi} = e^{-kt} F_{v,Rk} \quad \text{avec } k \text{ qui a été calibré pour chaque type d'assemblage (§ 6.2.2.1(2))}$$

Table 6.3 — Parameter k

Connection with	k	Maximum period of validity for parameter k in an unprotected connection min
Nails and screws	0,08	20
Bolts wood-to-wood with $d \geq 12$ mm	0,065	30
Bolts steel-to-wood with $d \geq 12$ mm	0,085	30
Dowels wood-to-wood ^a with $d \geq 12$ mm	0,04	40
Dowels steel-to-wood ^a with $d \geq 12$ mm	0,085	30
Connectors in accordance with EN 912	0,065	30

^a The values for dowels are dependent on the presence of one bolt for every four dowels

Coefficient k pour chaque type d'assemblage

La résolution de l'équation $E_{d,fi} = R_{d,fi}$ permet également de calculer directement le temps de résistance d'un assemblage :

$$t_{d,fi} = -\frac{1}{k} \ln \frac{\eta_{fi} \eta_0 k_{mod} \gamma_{M,fi}}{\gamma_M k_{fi}} \quad (\S 6.2.2.1(3))$$

Avec : η_0 taux de travail de l'assemblage à froid
 k_{mod} facteur de modification à froid
 et tous les coefficients tels que définis précédemment

Cette méthode est valide pour les boulons et broches pour les épaisseurs utilisées à la calibration des coefficients k , à savoir :

$$t_1 \geq \max[50 ; 50 + 1,25(d - 12)] \quad \text{avec } d \text{ diamètre du boulon ou de la broche en mm} \quad (\S 6.2.2.1(1))$$

Avec la méthode de la charge réduite, tout comme avec la méthode forfaitaire, il est possible d'aller au-delà des durées calculées (avec certaines limites) en augmentant les épaisseurs de bois ou en protégeant l'assemblage. (§ 6.2.2.1(6) et § 6.2.2.2)

DETERMINATION DE LA RESISTANCE DES ASSEMBLAGES TRADITIONNELS

Il semble à priori naturel **d'appliquer aux assemblages traditionnels les principes de vitesse de carbonisation et de section résiduelle existants pour les poutres**, ces assemblages étant réalisés sur des éléments relativement massifs. On peut aussi supposer que le fonctionnement et les **modes de rupture identifiés à froid pour ces assemblages restent valides** en situation incendie.

Toutefois, il reste à vérifier que des comportements ou modes de rupture nouveaux n'apparaissent pas. On peut aussi se poser la question de la jonction entre les éléments bois assemblés : leur non protection les rend elle vulnérables, notamment par les jeux en présence ? Aussi, comme on l'a vu pour les assemblages par organes métalliques, on peut se demander dans quelle mesure les organes de maintien présents (chevilles bois, boulons...) peuvent altérer le comportement théorique de ces assemblages. Enfin il s'agit de savoir quelles méthodes concrètes utiliser pour calculer les sections résiduelles et les résistances de ces assemblages en situation incendie.

Vitesse de carbonisation

Les essais réalisés en France [7] sur les queues d'aronde confirment que la carbonisation des éléments assemblés traditionnellement suit les mêmes principes que ceux connus pour les poutres :

- En partie courante des poutres testées, les profondeurs de carbonisation mesurées sont proches de celles calculées suivant la méthode EN 1995-1-2 avec β_0
- A proximité des assemblages, les profondeurs de carbonisation sont même moindres, il y a formation de « moignons » de bois autour de la zone de contact des poutres assemblées l'hypothèse de vitesse de carbonisation est donc sécuritaire dans la zone d'assemblage
- On note également que la zone de contact entre les poutres et le fond de la mortaise n'ont subi qu'une faible coloration, indiquant que le bois ne s'est pas consumé à cet endroit, malgré la présence de jeux.

Cette observation sur le jeu en fond de mortaise est confortée par d'autres règles existantes :

- La règle des 3 mm de jeu pour la protection latérale des plaques en âme de l'EN 1995-1-2
- La non prise en compte des jeux inférieurs à 5 mm dans le calcul de la carbonisation en Nouvelle-Zélande [3]

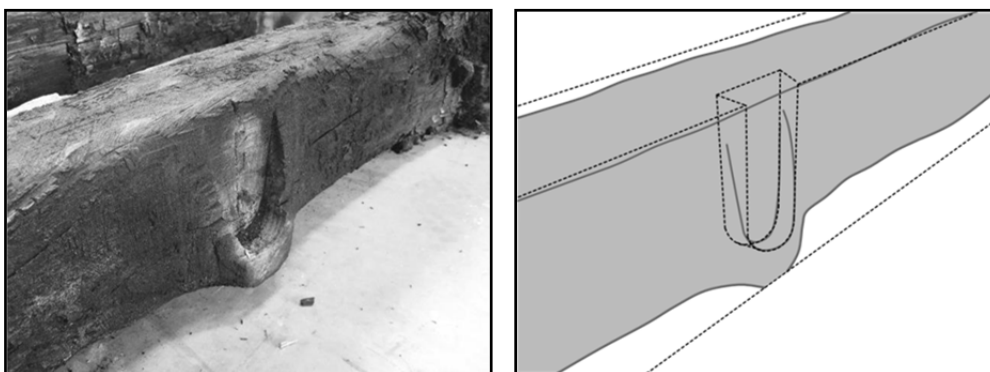


Photo et dessin d'un des assemblages testés - On peut observer l'effet de « moignon »

Modes de rupture

Si l'on souhaite appliquer les méthodes de calcul connues pour le dimensionnement à froid de ces assemblages, il est important de vérifier que de nouveaux modes de rupture n'apparaissent pas.

En ce qui concerne les assemblages par queues d'aronde, les essais au feu sur des configurations dont les modes de rupture à froid diffèrent (3 essais tenon fragile / 3 essais mortaise fragile) ont montré que les modes de rupture sont les mêmes qu'à froid. On note même que le mode de rupture avec cisaillement / traction transversale de la mortaise est plus présent.

Toutefois, en extrapolant les observations d'essais, il semble que l'on puisse affirmer qu'une fois la profondeur de carbonisation de la face avant de la porteuse égale à la profondeur initiale de la mortaise, deux nouveaux modes de rupture soient potentiellement créés :

- Rupture du bois sous la mortaise par cisaillement suivant le plan vertical de fond de mortaise
- Déversement de la poutre portée (solive) par manque de maintien latéral

On imagine aisément pouvoir étendre les observations ci-dessus aux assemblages par tenon-mortaise, étant donné la similarité des géométries et des modes de rupture.

Aucun essai à notre connaissance n'a été réalisé sur des assemblages par embrèvement. Cependant rien ne laisse penser que de nouveaux modes de rupture puissent apparaître. On peut toutefois estimer que la rupture par compression de l'about sera plus fréquente qu'à froid, étant donné faible hauteur comprimée (talons de 30 mm) relativement à la largeur cisailée (entrants de plus de 100 mm de large).

Influence des organes de maintien

Les assemblages traditionnels s'ils sont basés sur le principe du transfert des efforts par contact bois sur bois, sont souvent associés à des organes de maintien ayant pour objectifs d'assurer le contact entre les éléments bois, d'assurer la cohésion des fermes lors du levage et e l'assemblage de la charpente, de parer à une éventuelle inversion d'efforts...

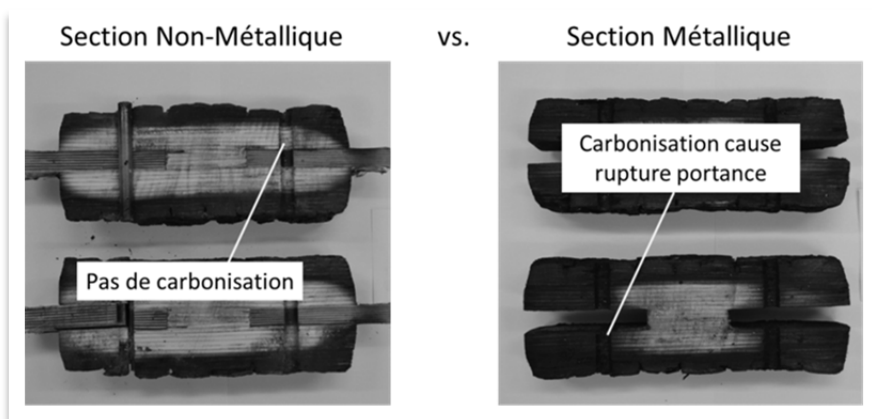
Chevilles bois

Les chevilles bois sont traditionnellement réalisées dans des bois plus dur que ceux à assembler. Or comme le présente l'EN 1995-1-2 les bois plus dur ont des vitesses de carbonisation moins élevées. On peut donc faire l'hypothèse simple d'une non modification du comportement au feu des assemblages traditionnels si les organes de maintien sont en bois.

Organes métalliques

Aucun essai n'a à notre connaissance été réalisé pour étudier le comportement au feu d'assemblages traditionnels munis d'organes de maintien métalliques. Toutefois, on peut faire l'hypothèse simple que si ces organes ne traversent pas les zones contraintes de l'assemblage, ils ne peuvent pas en altérer la résistance. Ceci est d'autant plus vrai si ces organes sont eux-mêmes protégés.

Des essais réalisés à l'Université de Bath sur des assemblages par tiges ont montré récemment le bon comportement des chevilles bois vis-à-vis des transferts de chaleur dans les assemblages [8]. Ces observations confirment logiquement les hypothèses formulées ci-avant.



Photos des essais de l'Université de Bath (cheville bois vs. broche métallique dans les assemblages par tiges)

Méthodes de justification à adopter

Il semble découler des observations précédentes que l'on puisse adopter les principes suivants pour la justification au feu des assemblages traditionnels bois :

- Utilisation de la méthode de la section réduite suivant méthode EN 1995-1-2 avec β_n et $k_0 d_0$
- Calcul des effets des actions suivant méthode EN 1995-1-2 (combinaisons situation incendie ou coeff. de réduction)
- Calcul de la résistance suivant méthodes à froid avec coefficients partiels adaptés et utilisation des fractiles à 20%
- Eventuelles méthodes simplifiées pour déterminer le temps de résistance $t_{d,fi}$ (forfaitairement ou selon une méthode similaire à celle de la charge réduite existant pour les assemblages par tiges)

Ces méthodes devant être limitées à un domaine de validité clairement défini en veillant en particulier à :

- Définir les sections minimales des éléments bois
- Définir des jeux maximaux autorisés entre les pièces lorsque pertinent
- Définir les règles de positionnement et de protection des organes de maintien métalliques

Retour d'expérience d'un sinistre récent

Le 15 juin 2015, la charpente de la basilique Saint Donatien, édifice du patrimoine de la ville de Nantes, subissait un incendie important ravageant une grande partie de sa toiture. Les premiers travaux de d'urgence de mise en sécurité de l'édifice, sous Maîtrise d'Ouvrage de la Ville de Nantes, ont débuté le 20 octobre 2015 et devraient s'achever au plus tôt début 2017. Le 22 octobre 2015 Rodolphe Maufront (UMB FFB) s'est rendu sur le chantier pour une mission de retour d'expérience. Le compte-rendu de sa visite est disponible conjointement au présent rapport. Les principaux enseignements sont les suivants :

- Un bon comportement général de la charpente qui est restée debout dans la zone soumise à l'incendie moins de 60 minutes (estimation sur constat en l'attente des résultats d'expertise)
- Des effondrements dans la zone soumise à l'incendie plus longtemps (2 heures à priori en certains endroits)
- La confirmation de l'importance des jeux sur la pénétration des flammes entre pièces assemblées, notamment pour les pièces très massives posées humides, les assemblages pour lesquels le contact n'est pas systématique car sans effort permanent dans le sens du maintien (ex : moises), et les pièces avec aubier non durable non traité et par conséquent disparu dans le temps.
- La non carbonisation des bois en contact avec les boulons métalliques, contrairement à ce qui est observé en laboratoire, probablement car les températures atteintes dans un incendie réel de comble ventilé sont inférieures à celles d'un incendie conventionnel.



Basilique Saint Donatien, Nantes – à gauche partie de charpente encore debout, à droite tenon-mortaise

SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES

N°	Titre	Auteurs (date)
1	Fire resistance of solid timber structures	Buchanan, A.H. (≥ 2004)
2	NF EN 1995-1-2 - Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-2 : Généralités - Calcul des structures au feu	Comité Européen de Normalisation (2005)
3	Structural design for fire Safety	Buchanan, A.H. (2001)
4	Methods for calculating the fire resistance of exposed wood members (beams, columns and decks)	American Wood Council (2014)
5	Fire safety in Timber Buildings	B. Östman et al. (2010)
6	NF EN 1995-1-1 - Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : Généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments	Comité Européen de Normalisation (2005)
7	Rapport d'essais N°RS09-035/A concernant le comportement au feu d'assemblages en bois usinés en queue d'aronde	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (2014)
8	Fire performance of metal free timber connections	D. Brandon et al. (2015)
9	Fire resistance performance of unprotected wood-wood-wood and wood-steel-wood connections: a literature review and new data correlations	L. Peng et al. (2010)
10	Performance of timber connections exposed to fire: a review	C. Maraveas et al. (2013)
11	Fire design of steel-to-timber dowelled connections	C. Erchinger, A. Frangi, M. Fontana (2009)
12	Fire resistance of timber connections	C. Austruy (2007)
13	DTU P92-703 - Règles bois feu 88	Groupe de coordination des textes techniques (1988)
14	Thermo-mechanical behaviour of timber-to-timber connections exposed to fire	M. Audebert et al. (2013)
15	Behavior of dowelled and bolted steel-to-timber connections exposed to fire	M. Audebert et al. (2012)
16	Etude du comportement au feu des assemblages de structures bois : Approche expérimentale et modélisation	K. Laplanche (2006)
17	Approche expérimentale et modélisation du comportement au feu d'assemblage bois sous différents types de sollicitations	M. Audebert (2012)
18	Experimental and numerical analysis of timber connections in tension perpendicular to grain in fire	M. Audebert et al. (2014)
19	Influence de la température sur les assemblages bois	P. Dias de Moraes (2003)
20	Transfert thermo-hydrrique dans les assemblages bois sous incendie	A. Samaké et al. (2013)
21	Fire resistance of joint details in loadbearing timber construction A literature survey	O. Carling (1989)
22	Fire safe use of wood	The european network FSUW (2004)
23	Résistance incendie des assemblages bois Comportement à froid des assemblages bois-métal	P. Racher et al. (2002)
24	Comportement à froid des assemblages bois Etude expérimentale du comportement mécanique à froid d'assemblages en bois lamellé-collé brochés en double cisaillement	J.F. Bocquet
25	Rapport du comportement au feu des assemblages bois Assemblages bois/métal en double cisaillement	N. Ayme (2003)
26	Comportement au feu des assemblages bois Assemblages bois/bois et bois/métal en double cisaillement	K.Laplanche, D.Dhima (2003)

3.2. DEVELOPPEMENT DES METHODES AVANCEES

DEMARCHE GENERALE

Le premier objectif fixé par le CODIFAB pour le développement des méthodes de justification est de **couvrir les trois types d'assemblages traités dans le Guide CODIFAB « Dimensionnement à froid des assemblages traditionnels bois »**, dans les limites des domaines de validité qui y sont définis.

Le second objectif est de permettre à des publics différents de s'approprier les méthodes en proposant pour chaque type d'assemblage bois-bois traditionnel en situation d'incendie **deux modes de justification** : une méthode analytique dite **méthode « avancée »** et une **méthode « simple »**.

Dans cette première version du guide, **les méthodes se limitent à une durée de résistance au feu de 30 minutes**, car :

- Les assemblages bois-bois traditionnels sont utilisés principalement dans des structures courantes qui ne sont soumises qu'à une obligation R15 ou R30 (habitation 1^{ère} et 2^{ème} famille, petits ERPs...)
- Les propositions sont basées principalement sur les connaissances acquises sur le comportement au feu des sections de poutres bois et des assemblages bois-bois par tiges métalliques, ainsi que sur une bibliographie qui a révélé une faible quantité de données expérimentales sur le sujet.

Plus généralement et pour les mêmes raisons, lors du développement de ces méthodes les orientations techniques majeures ont été prises dans le sens de la sécurité.

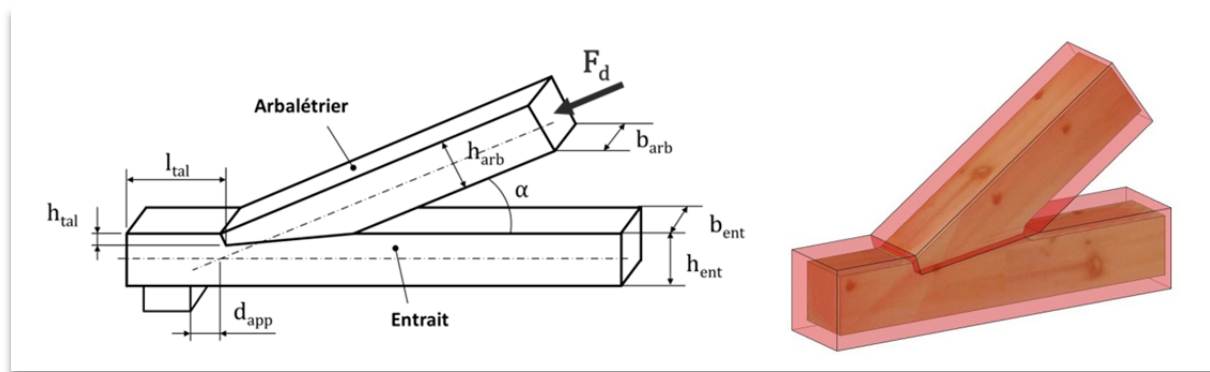
Les méthodes simples font l'objet de la première partie du présent guide, les méthodes avancées font l'objet de la seconde.

HYPOTHESES SUR LE COMPORTEMENT DES ASSEMBLAGES EN SITUATION D'INCENDIE

Embrèvement en charpente

Les embrèvements utilisés en charpente sont soumis au feu sur l'ensemble des faces des éléments bois. On a donc simultanément **diminution des dimensions** suivantes par carbonisation :

- b_{ent} et h_{ent} des deux côtés
- b_{arb} et h_{arb} des deux côtés
- h_{tal} d'un seul côté (face supérieure de l'entrait)
- l_{tal} d'un seul côté (extrémité de l'entrait)



Notations utilisées pour les embrèvements en charpente / Volumes de bois carbonisés durant un incendie

La progression du front de carbonisation connue sur les poutres rectangulaires en bois permet de formuler l'hypothèse que **la géométrie globale de l'assemblage - ainsi que ses principes de fonctionnement identifiés à froid - sont préservés** tant que :

- Les exigences du domaine de validité définies à froid sont respectées. En particulier tant que la longueur du talon l_{tal} est supérieure à 150 mm. Le praticien vérifiera que c'est le cas à tout instant de l'incendie.

- L'épaisseur du talon est suffisante tout au long de l'incendie pour que l'assemblage fonctionne (h_{tal} supérieure à 10 mm par exemple). Ce critère fixe ainsi une limite absolue de durée de résistance au feu pour ce type d'assemblage : $d_{ef} \leq h_{tal} - 10$ avec d_{ef} profondeur de carbonisation efficace.

Aussi, l'EN 1995-1-2 indique que la compression transversale peut être négligée en situation incendie. Ainsi il est proposé de ne pas vérifier la rupture en compression transversale de l'entrait (partie horizontale sous le pas de l'embrèvement), puisque cette rupture n'entraîne effectivement pas de ruine de la structure.

Par conséquent, **les vérifications suivantes sont retenues** :

- Cisaillement du talon
- Compression de l'about

En complément des méthodes de calculs, et des domaines de validité déjà définis pour la justification à froid des embrèvements, **les règles d'exécution complémentaires** suivantes sont adoptées :

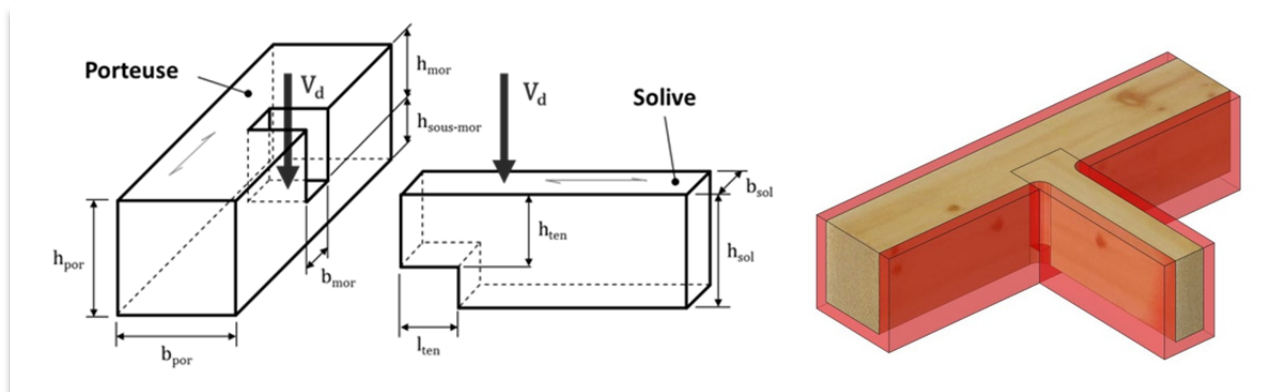
- Mettre en œuvre les bois proches de leur futur point d'équilibre hygroscopique (cf. NF DTU 31.1), limiter les jeux entre les pièces au minimum nécessaire (aucun jeu pour les zones de contact participant au transfert des efforts cf. NF DTU 31.1, et 2 mm maximum pour les autres jeux), mettre en œuvre des dispositions pour assurer maintien du contact entre les pièces (charges verticales permanentes, organes de maintien...), et traiter les aubiers non durables (cf. NF DTU 31.1). En cas de non-respect de ces règles, en particulier dans le cas exceptionnel des bois de forte section présentant lors de leur mise en œuvre un taux d'humidité relativement élevé, le calcul doit prendre en compte d'une attaque du feu au niveau des interfaces entre pièces (possible uniquement avec méthode analytique).
- Favoriser l'utilisation d'organes de maintien non métalliques, telles les chevilles bois réalisées dans un bois plus dur que celui des pièces à assembler
- Dans le cas d'utilisation d'organes de maintien métalliques, tels les boulons anti-soulèvement, s'assurer tant que possible qu'ils ne traversent pas et soient à une distance supérieure à 20 mm des zones sollicitées de l'assemblage que sont le talon et l'about. Si cela est impossible, ces organes doivent être protégés du feu (par exemple chapelles et bouchons pour noyer les têtes)

Tenon-mortaise en plancher

Les assemblages par tenon-mortaise utilisés en plancher sont soumis au feu sur l'ensemble des faces des éléments bois à l'exception de leur face supérieure qui est recouverte et protégée par le plancher. On a donc simultanément **diminution des dimensions** suivantes par carbonisation :

- b_{por} des deux côtés et h_{por} d'un seul côté (face inférieure de la porteuse)
- b_{sol} des deux côtés et h_{sol} d'un seul côté (face inférieure de la solive)
- $h_{sous-mor}$ d'un seul côté (face inférieure de la porteuse)
- h_{ten} d'un seul côté (face inférieure du tenon)

Note : la face inférieure du tenon n'est attaquée que lorsque la solive a suffisamment été carbonisée pour que $h_{sol} - h_{ten} = 0$



Notations utilisées pour les tenons-mortaises en plancher / Volumes de bois carbonisés durant un incendie

La progression du front de carbonisation connue sur les poutres rectangulaires en bois permet de formuler l'hypothèse que **la géométrie globale de l'assemblage - ainsi que ses principes de fonctionnement identifiés à froid - sont préservés** tant que :

- Les exigences du domaine de validité définies à froid sont respectées. En particulier tant que la hauteur de bois sous mortaise est supérieure à un quart de la hauteur du porteur (ou à minima au sixième) et à 20 mm. Le praticien vérifiera que c'est le cas à tout instant de l'incendie.
- La profondeur résiduelle de la mortaise est suffisante pour que l'appui de la solive sur la porteuse soit maintenu (profondeur résiduelle de mortaise supérieure à 10 mm par exemple). Sur le domaine de validité visé c'est toujours le cas puisque l'on a déjà : $l_{ten} \geq 40 \text{ mm}$ (la profondeur de pénétration maximale sur 30 minutes est de 31 mm).

Aussi, l'EN 1995-1-2 indique que la compression transversale peut être négligée en situation incendie. Ainsi il est proposé de ne pas vérifier les ruptures en compression transversale du tenon et de la mortaise, puisque ces ruptures n'entraînent effectivement pas de ruine de la structure.

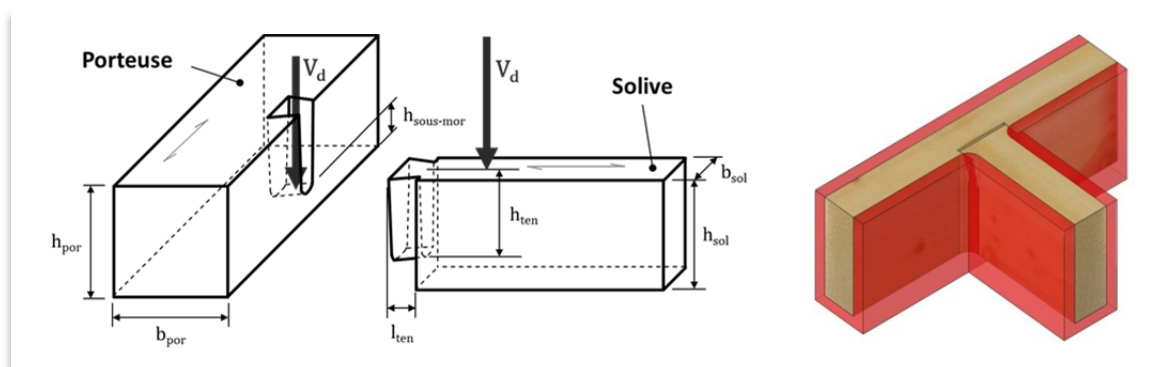
Par conséquent, **les vérifications suivantes sont retenues** :

- Cisaillement/traction transversale du tenon
- Cisaillement/traction transversale de la mortaise

En complément des méthodes de calculs, et des domaines de validité déjà définis pour la justification à froid des embrèvements, des **règles d'exécution complémentaires** sont adoptées (similaires à celles pour les embrèvements).

Queue d'aronde en plancher

Le comportement et les notations sont similaires à ceux du tenon-mortaise en plancher.



Notations utilisées pour les queues d'aronde en plancher / Volumes de bois carbonisés durant un incendie

Une différence cependant concernant la profondeur résiduelle de la mortaise. Le praticien vérifiera que celle-ci est, à tout instant de l'incendie, suffisante pour que l'appui de la solive sur la porteuse soit maintenu (profondeur résiduelle de mortaise supérieure à 10 mm par exemple).

FORMALISATION DES METHODES CALCULATOIRES

Les principes de fonctionnement identifiés à froid étant supposés valides en situation incendie, **on utilise comme base les équations existantes pour le dimensionnement à froid**, que l'on adapte à la situation incendie comme présenté dans les paragraphes suivants, basés sur la méthode des sections réduites (propriétés matériau inchangées mais sections forfaitairement réduites pour tenir compte de la diminution de celles-ci).

Détermination des sections réduites

Les dimensions qui seront modifiées par l'attaque du feu seront indicées (ex : b_{arb} devient $b_{arb,fi}$).

L'EN 1995-1-2 donne deux vitesses de carbonisation pour le calcul des dimensions attaquées par le feu :

- Une vitesse de carbonisation β_0 , vitesse unidimensionnelle de progression du front de carbonisation
- Une vitesse de carbonisation β_n , vitesse fictive (augmentée pour tenir compte des pertes de performances dues aux arrondis dans les angles des poutres)

Bien que le fonctionnement des assemblages ne concerne que des zones localisées des éléments bois, et que l'on pourrait ainsi utiliser β_0 en s'affranchissant des effets d'angles arrondis, **on se placera dans un premier temps du côté de la sécurité en utilisant β_n .**

Ainsi on a : $d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0 = \beta_n t + k_0 d_0$
Avec : $d_0 = 7 \text{ mm}$ et $k_0 = \min[1; t/20]$

Détermination de l'effet des actions

L'EN 1995-1-2 donne deux possibilités pour déterminer l'effet des actions en situation d'incendie :

- La première (§ 2.4.2(1)) consiste à déterminer l'effet des actions pour $t=0$ en utilisant les facteurs de combinaison $\psi_{1,1}$ ou $\psi_{2,1}$ suivant EN 1991-1-2 §4.3.1. Pour la France l'annexe nationale impose l'utilisation de $\psi_{1,1}$.
- La seconde (§ 2.4.2(2)) consiste à multiplier l'effet des actions à froid par un coefficient de réduction

$E_{d,fi} = \eta_{fi} \times E_d$ avec η_{fi} calculé par $\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_k G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$ (avec $\psi_{fi} = \psi_{1,1}$ pour la France) ou η_{fi} approximé forfaitairement (pour la France l'annexe nationale impose la valeur de 0,7)

Pour les méthodes avancées de dimensionnement incendie des assemblages bois-bois traditionnels, **ces deux possibilités sont conservées**, le choix restant à l'appréciation du praticien (première possibilité pour optimiser le dimensionnement, seconde possibilité pour gagner du temps).

Détermination des coefficients partiels

On a : $f_{d,fi} = k_{mod,fi} \times \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}}$

Avec : $\gamma_{M,fi} = 1$ pour la France (annexe nationale § 2.3(1)P)
 $k_{mod,fi} = 1$ pour tous (§ 4.2.2(5))

Détermination de la valeur fractile à 20% des propriétés de résistance

On a : $f_{20} = k_{fi} \times f_k$

Avec : k_{fi} donné par le tableau 2.1 (§ 2.3(3)) présenté en page 36 du présent guide

SYNTHESE DES METHODES DE CALCUL AVANCEES

Assemblage / mode	Rappel méthodes analytiques à froid	Proposition méthodes analytiques incendie
Embrèvement / Cisaillement talon	$\tau_d = \frac{F_d \times \cos \alpha \times k_{maj}}{b_{arb} \times k_{cr} \times l_{tal}}$ $f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$	$\tau_{d,fi} = \frac{F_{d,fi} \times \cos \alpha \times k_{maj}}{b_{arb,fi} \times k_{cr} \times l_{tal,fi}}$ $f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi}$ <p>Avec :</p> $F_{d,fi} = \eta_{fi} \times F_d \text{ (ou déterminé par combinaisons)}$ $b_{arb,fi} = b_{arb} - 2 d_{ef}$ $l_{tal,fi} = l_{tal} - d_{ef}$
Embrèvement / Compression about	$\sigma_{c,\frac{\alpha}{2},d} = \frac{F_d \times \cos(\alpha/2)}{b_{arb} \times h'_{tal,ef}}$ $f_{c,\frac{\alpha}{2},d} = f_{c,\frac{\alpha}{2},k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$ <p>Avec :</p> $h'_{tal,ef} = \frac{h_{tal}}{\cos(\alpha/2)} + \min \left[30 \times \sin(\alpha/2); \frac{h_{tal}}{\cos(\alpha/2)} \right]$	$\sigma_{c,\frac{\alpha}{2},d,fi} = \frac{F_{d,fi} \times \cos(\alpha/2)}{b_{arb,fi} \times h'_{tal,ef,fi}}$ $f_{c,\frac{\alpha}{2},d,fi} = f_{c,\frac{\alpha}{2},k} \times k_{fi}$ <p>Avec :</p> $F_{d,fi} = \eta_{fi} \times F_d \text{ (ou déterminé par combinaisons)}$ $b_{arb,fi} = b_{arb} - 2 d_{ef}$ $h'_{tal,ef,fi} = \frac{h_{tal,fi}}{\cos(\alpha/2)} + \min \left[30 \times \sin(\alpha/2); \frac{h_{tal,fi}}{\cos(\alpha/2)} \right]$ $h_{tal,fi} = h_{tal} - d_{ef}$

Assemblage / mode	Rappel méthodes analytiques à froid	Proposition méthodes analytiques incendie
Tenon-mortaise / Cisaillement tenon	$\tau_d = \frac{3}{2} \times k_{cal} \times \frac{V_d \times h_{sol}}{b_{sol} \times k_{cr} \times h_{ten}^2}$ $f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$ <p>Avec :</p> $k_{cal} = 1,29$	$\tau_{d,fi} = \frac{3}{2} \times k_{cal} \times \frac{V_{d,fi} \times h_{sol,fi}}{b_{sol,fi} \times k_{cr} \times h_{ten,fi}^2}$ $f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi}$ <p>Avec :</p> $k_{cal} = 1,29$ $V_{d,fi} = \eta_{fi} \times V_d \text{ (ou déterminé par combinaisons)}$ $h_{sol,fi} = h_{sol} - d_{ef}$ $b_{sol,fi} = b_{sol} - 2 d_{ef}$ $h_{ten,fi} = \min[h_{ten}; h_{sol,fi}]$
Tenon-mortaise / Cisaillement mortaise	$\tau_d = \frac{3}{4} \times \frac{V_d}{b_{por} \times k_{cr} \times h_{sous-mor}}$ $f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$	$\tau_{d,fi} = \frac{3}{4} \times \frac{V_{d,fi}}{b_{por,fi} \times k_{cr} \times h_{sous-mor,fi}}$ $f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi}$ <p>Avec :</p> $V_{d,fi} = \eta_{fi} \times V_d \text{ (ou déterminé par combinaisons)}$ $b_{por,fi} = b_{por} - 2 d_{ef}$ $h_{sous-mor,fi} = h_{sous-mor} - d_{ef}$
Queue d'aronde / Cisaillement tenon	$\tau_d = \frac{3}{2} \times k_{cal} \times \frac{V_d \times h_{sol}}{b_{sol} \times k_{cr} \times h_{ten}^2}$ $f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$ <p>Avec :</p> $k_{cal} = 1,61$	$\tau_{d,fi} = \frac{3}{2} \times k_{cal} \times \frac{V_{d,fi} \times h_{sol,fi}}{b_{sol,fi} \times k_{cr} \times h_{ten,fi}^2}$ $f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi}$ <p>Avec :</p> $k_{cal} = 1,61$ $V_{d,fi} = \eta_{fi} \times V_d \text{ (ou déterminé par combinaisons)}$ $h_{sol,fi} = h_{sol} - d_{ef}$ $b_{sol,fi} = b_{sol} - 2 d_{ef}$ $h_{ten,fi} = \min[h_{ten}; h_{sol,fi}]$
Queue d'aronde / Cisaillement mortaise	$\tau_d = \frac{3}{4} \times \frac{V_d}{b_{ef} \times k_{cr} \times h_{sous-mor}}$ $f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$ <p>Avec :</p> $b_{ef} = \min[100; b_{por}]$	$\tau_{d,fi} = \frac{3}{4} \times \frac{V_{d,fi}}{b_{ef,fi} \times k_{cr} \times h_{sous-mor,fi}}$ $f_{v,d,fi} = f_{v,k} \times k_{fi}$ <p>Avec :</p> $V_{d,fi} = \eta_{fi} \times V_d \text{ (ou déterminé par combinaisons)}$ $b_{ef,fi} = \min[100; b_{por,fi}]$ $b_{por,fi} = b_{por} - 2 d_{ef}$ $h_{sous-mor,fi} = h_{sous-mor} - d_{ef}$

3.3. DEVELOPPEMENT DES METHODES SIMPLES

UTILISATION DE LA METHODE DE LA CHARGE REDUITE

Principes de la méthode de la charge réduite

La méthode de la charge réduite est une méthode de calcul analytique utilisée pour estimer le temps de résistance au feu des assemblages de structures bois. Elle est utilisée dans l'EN 1995-1-2 pour la résistance au feu des assemblages de structures bois par tiges métalliques. Il s'agit dans un premier temps d'écrire analytiquement la perte progressive de résistance de l'assemblage en fonction du temps, puis de résoudre l'équation pour trouver le temps en fonction des autres paramètres.

On pose : $R_{d,t,fi} = f_{fi}(param, t) \times f_{d,fi}$

Avec : f_{fi} une fonction des paramètres géométriques de l'assemblage et du temps

On sait que : $f_{d,fi} = \frac{k_{mod,fi} \times k_{fi}}{\gamma_{M,fi}} f_k$

Donc : $R_{d,t,fi} = f_{fi}(param, t) \times \frac{k_{mod,fi} \times k_{fi}}{\gamma_{M,fi}} f_k$ (1)

On pose : $R_d = f(param) \times f_d$

Avec : f une fonction des paramètres géométriques de l'assemblage

On sait que : $f_d = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_k$

Donc : $R_d = f(param) \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_k$ (2)

On sait qu'à rupture : $\frac{E_{d,fi}}{R_{d,t,fi}} = \frac{E_d}{R_d} \times \frac{1}{\eta_0} = 1$

Que l'on peut écrire : $\frac{E_{d,fi}}{E_d} \times \eta_0 = \frac{R_{d,t,fi}}{R_d}$ (3)

Et on sait que : $E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d$ (4)

On peut réécrire et réduire (3) après avoir remplacé $R_{d,t,fi}$, R_d et $\frac{E_{d,fi}}{E_d}$ selon leur expression dans (1) (2) et (4), pour obtenir :

$$\underbrace{\frac{f_{fi}(param, t)}{f(param)}}_{\text{Résistance résiduelle relative de l'assemblage en fonction du temps}} = \eta_0 \times \underbrace{\eta_{fi} \times \frac{1}{k_{fi}} \times \frac{k_{mod}}{k_{mod,fi}} \times \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_M}}_{\text{Coefficient } K_{feu/froid}}$$

Utiliser la méthode de la charge réduite c'est trouver t pour lequel cette équation est vraie.

Le terme de gauche traduit la résistance résiduelle relative de l'assemblage soumis à l'incendie en fonction du temps. Il est égal à 1 pour $t=0$ et décroît progressivement. Il est spécifique à chaque assemblage et dépend des paramètres géométriques.

Le premier terme de droite η_0 est le taux de travail de l'assemblage à froid. On le note également τ_{froid} dans la suite du document, avec la convention suivante : $\eta_0 = \tau_{froid}/100$. Le second terme de droite que l'on nommera par la suite $K_{feu/froid}$ représente le ratio équivalent des taux de sollicitation à froid et en situation d'incendie. Il est inférieur à 1, traduisant ainsi la relative faible sollicitation des assemblages en situation incendie. Il se situe couramment entre 0,2 et 0,5.

Valeur du taux de travail à froid η_0 dans la démarche de simplification

Dans le cas de méthodes simplifiées :

- Soit le praticien connaît le taux de travail à froid de son assemblage pour chaque mode de rupture. Dans ce cas-là il utilise la valeur réelle de η_0 pour utiliser les formules et tableaux des méthodes simples.
- Soit le praticien ne connaît pas le taux de travail à froid (il a par exemple utilisé une méthode simplifiée du Guide CODIFAB « Dimensionnement à froid des assemblages traditionnels bois »). Dans ce cas il considère que son taux de travail à froid est de 100% donc $\eta_0 = 1$.

Valeur du coefficient $K_{feu/froid}$ dans la démarche de simplification

Dans le cas de méthodes simplifiées, on souhaite avec une seule valeur de $K_{feu/froid}$ couvrir l'ensemble des cas visés, en se plaçant du côté de la sécurité, c'est-à-dire avec $K_{feu/froid}$ le plus grand possible.

Or : η_{fi} a pour valeur maximale 0,7

k_{fi} a pour valeur minimale 1,15 (pour le lamellé collé)

k_{mod} a pour valeur maximale 0,9 (en supposant que l'assemblage n'est pas dimensionné à froid par une action instantanée)

$k_{mod,fi}$ vaut 1

$\frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_M}$ vaut 1/1,3

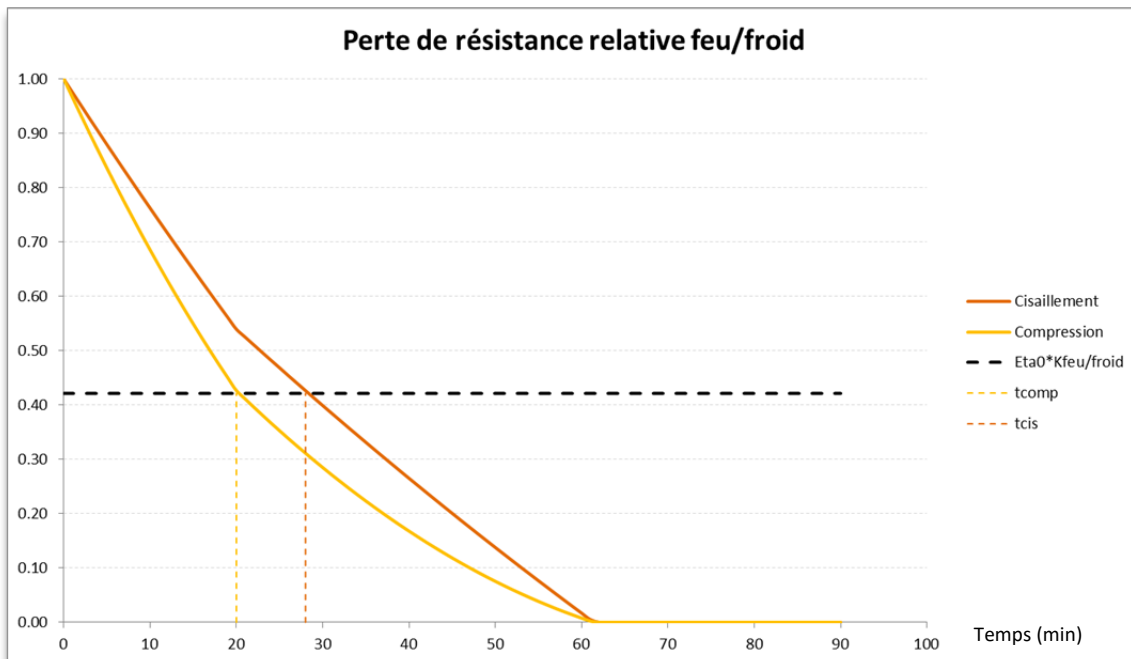
Ainsi on utilise lors de la simplification $K_{feu/froid} = 0,42$

Expression de la perte relative de résistance de l'assemblage en fonction du temps

Embrèvement en charpente

Embrèvement – cisaillement du talon : $\frac{f_{fi}(param,t)}{f(param)} = \frac{b_{arb,fi} l_{tal,fi}}{b_{arb} l_{tal}}$

Embrèvement – compression de l'about : $\frac{f_{fi}(param,t)}{f(param)} = \frac{b_{arb,fi} h'_{tal,ef,fi}}{b_{arb} h'_{tal,ef}}$



Exemple de pertes relatives de résistances pour un embrèvement

Note : sur le domaine de validité visé, sans surépaisseurs apportées pour améliorer la résistance à l'incendie et avec un taux de travail à froid de 100%, on observe dans 100% des cas que c'est la compression de l'about qui est atteinte en premier (souvent autour de 15 minutes), avant le cisaillement du talon (souvent autour de 30 minutes).

Tenon-mortaise en plancher

$$\text{Tenon-mortaise – cisaillement du tenon : } \frac{f_{fi}(\text{param}, t)}{f(\text{param})} = \frac{b_{sol,fi} h_{ten,fi}^2 / h_{sol,fi}}{b_{sol} h_{ten}^2 / h_{sol}}$$

$$\text{Tenon-mortaise – cisaillement de la mortaise : } \frac{f_{fi}(\text{param}, t)}{f(\text{param})} = \frac{b_{por,fi} h_{sous-mor,fi}}{b_{por} h_{sous-mor}}$$

Note : sur le domaine de validité visé, sans surépaisseurs apportées pour améliorer la résistance à l'incendie et avec un taux de travail à froid de 100%, on observe dans environ 80% des cas que c'est la rupture de la mortaise qui est atteinte en premier (souvent autour de 25 minutes), avant celle du tenon (souvent autour de 35 minutes).

Queue d'aronde en plancher

$$\text{Queue d'aronde – cisaillement du tenon : } \frac{f_{fi}(\text{param}, t)}{f(\text{param})} = \frac{b_{sol,fi} h_{ten,fi}^2 / h_{sol,fi}}{b_{sol} h_{ten}^2 / h_{sol}}$$

$$\text{Queue d'aronde – cisaillement de la mortaise : } \frac{f_{fi}(\text{param}, t)}{f(\text{param})} = \frac{b_{ef,fi} h_{sous-mor,fi}}{b_{ef} h_{sous-mor}}$$

Note : sur le domaine de validité visé, sans surépaisseurs apportées pour améliorer la résistance à l'incendie et avec un taux de travail à froid de 100%, on observe dans environ 75% des cas que c'est la rupture de la mortaise qui est atteinte en premier (souvent autour de 30 minutes), avant celle du tenon (souvent autour de 35 minutes).

Résolution des équations par type d'assemblage pour déterminer le temps de résistance

Les expressions de la perte relative de résistance par type d'assemblage ont été vues plus haut. Dans ces expressions, on trouve les dimensions résiduelles (par exemple : $b_{arb,fi}$).

Or on a vu plus haut que ces dimensions sont exprimées en fonction de d_{ef} qui vaut : $d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0 = \beta_n t + k_0 d_0$

Et on a vu également que : $k_0 = \min[1; t/20]$

Or afin de résoudre les équations pour trouver t , on a besoin que ces équations soient linéaires en t .

Ainsi on résout les équations en deux temps :

- Une solution t_1 pour $k_0 = t/20$
- Une solution t_2 pour $k_0 = 1$
- La solution générale est $t = \max[t_1; t_2]$

La résolution analytique des équations pour les six couples « Assemblage + Mode de rupture » est présentée de façon détaillée dans le rapport technique complet.

Exemple de solution pour la rupture en cisaillement du talon d'un embrèvement :

$$\text{On a : } t = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a}$$

$$\text{Avec : } \Delta = b^2 - 4ac$$

$$a = 2 \left(\beta_n + \frac{d_0}{20} \right)^2$$

$$b = - \left(\beta_n + \frac{d_0}{20} \right) (b_{arb} + 2l_{tal})$$

$$c = b_{arb} l_{tal} (1 - \eta_0 K_{feu/froid})$$

DEMARCHE DE SIMPLIFICATION

Afin de rendre plus rapide l'application de la méthode de la charge réduite il a été envisagé divers modes de simplification :

- Des formules simplifiées donnant t en fonction des dimensions principales et du taux de travail à froid
- Des tableaux donnant t en fonction des dimensions principales et du taux de travail à froid
- Des critères simples à respecter sur les dimensions pour obtenir une certaine durée (R15 ou R30)
- Des tableaux donnant le taux de travail maximal à froid pour obtenir une certaine durée (R15 ou R30)

Quel que soit le mode, la simplification doit être réalisée séparément pour les résineux et les feuillus, le paramètre β_n étant très différent pour les deux types d'essences ($\beta_n = 0,7$ ou $0,8$ pour les résineux courants et $0,55$ pour les feuillus courants).

Les paragraphes suivants illustrent le développement des méthodes simples retenues dans le présent guide. Les autres méthodes sont présentées en détail dans le rapport technique complet.

Précision des domaines de validité

On a vu plus tôt que le premier objectif fixé par le CODIFAB pour le développement des méthodes de justification est de couvrir les trois types d'assemblages traités dans le Guide CODIFAB « Dimensionnement à froid des assemblages traditionnels bois », dans les limites des domaines de validité qui y sont définis.

Or pour établir et calibrer des méthodes simples, il faut que ces domaines de validité soient plus précis, en particulier il est nécessaire de définir les dimensions minimales des sections de bois. En effet ce sont ces sections qui sont proportionnellement les moins performantes en situation incendie, et qui vont ainsi piloter certaines simplifications effectuées. Les domaines de validité présentés dans la partie « méthodes simples » du présent guide incluent donc des dimensions minimales, choisies pour permettre de couvrir les sections couramment utilisées par les professionnels.

Aussi, on a vu qu'afin d'éviter la rupture des assemblages dans des modes de ruptures non maîtrisés, il s'agissait pour le praticien de vérifier que certaines dimensions minimales étaient respectées tout le long de l'incendie. Dans le cadre des méthodes simples, les domaines de validité ont été complétés afin de dispenser le praticien de ces vérifications.

Assemblage	Vérification à effectuer	Prescription pour s'en dispenser
Embrèvement	$l_{tal} \geq 150 \text{ mm}$ tout au long de l'incendie	$l_{tal} \geq 180 \text{ mm}$ au départ
	$h_{tal} \geq 10 \text{ mm}$ tout au long de l'incendie	$h_{tal} \geq 35 \text{ mm}$ pour les feuillus sauf hêtre $h_{tal} \geq 40 \text{ mm}$ pour les résineux et le hêtre au départ
Tenon-mortaise	$h_{s\text{ous-mor}} \geq h_{por}/6$ Et $h_{s\text{ous-mor}} \geq 20 \text{ mm}$ tout au long de l'incendie	$h_{s\text{ous-mor}} \geq h_{por}/3$ Et $h_{s\text{ous-mor}} \geq 50 \text{ mm}$ au départ
Queue d'aronde	$h_{s\text{ous-mor}} \geq h_{por}/6$ Et $h_{s\text{ous-mor}} \geq 20 \text{ mm}$ tout au long de l'incendie	$h_{s\text{ous-mor}} \geq h_{por}/3$ Et $h_{s\text{ous-mor}} \geq 50 \text{ mm}$ au départ
	Profondeur résiduelle de mortaise $\geq 10 \text{ mm}$ tout au long de l'incendie	$l_{ten} \geq 35 \text{ mm}$ pour les feuillus sauf hêtre $l_{ten} \geq 40 \text{ mm}$ pour les résineux et le hêtre au départ

Tableaux donnant la durée de résistance acquise en fonction des dimensions et du taux de travail à froid

Il est proposé ici pour chaque mode de rupture et pour quelques valeurs prédéfinies du taux de travail à froid (τ_{froid}), de donner un tableau dont les deux entrées sont les dimensions principales de l'assemblage, et dont la sortie est la durée de résistance acquise calculée suivant la méthode analytique. On permet ainsi une lecture aisée tout en garantissant une performance et une sécurité maximales.

Deux possibilités existent pour calculer les valeurs de chaque case des tableaux :

- On réalise un calcul unique, avec les valeurs des deux paramètres d'entrée définies par la ligne et la colonne correspondantes, et on fixe les autres paramètres à une valeur la plus défavorable possible, afin de couvrir tous les cas rencontrés dans le domaine de validité.
- On réalise un grand nombre de calculs, avec les valeurs des deux paramètres d'entrée définies par la ligne et la colonne correspondantes, et les autres paramètres tirés aléatoirement dans le domaine de validité visé. On retient comme valeur pour la case la plus petite valeur rencontrée.

La première méthode a le mérite de ne nécessiter qu'un seul calcul. On peut utiliser des régressions linéaires de la durée en fonction des différents paramètres afin de déterminer les valeurs défavorables des paramètres de la formule. Toutefois certains paramètres interagissent et le cas défavorable n'est pas toujours simple à déterminer.

La seconde méthode nécessite de plus nombreux calculs mais on est certain d'obtenir la valeur la plus sécuritaire, pour peu que le nombre d'itérations soit suffisant.

C'est la méthode du calcul itératif aléatoire qui est retenue pour le présent guide, avec un nombre d'itérations de 1000 calculs par case. Les taux de travail à froid (τ_{froid}) retenus sont 40%, 60%, 80% et 100%. Les praticiens peuvent interpoler des valeurs pour les taux de travail intermédiaires. Dans les tableaux de la partie « méthodes simples » du présent guide, et en accord avec la décision de limiter les durées de résistance au feu à 30 minutes, tous les résultats supérieurs à 30 minutes ont été mis égaux à 30 minutes.

		TENON – RESINEUX et hêtre					TENON – FEUILLUS sauf hêtre							
$T_{ten} = 100\%$	RESINEUX		h_{ten}/h_{sol}					FEUILLUS		h_{ten}/h_{sol}				
	$T_{ten} = 100\%$		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	$T_{ten} = 100\%$		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	b_{sol} (en mm)	80	24	24	24	24	22	b_{sol} (en mm)	80	30	30	30	30	28
90		29	29	29	29	25	90		30	30	30	30	30	
100		30	30	30	30	28	100		30	30	30	30	30	
110		30	30	30	30	30	110		30	30	30	30	30	
≥120		30	30	30	30	30	≥120		30	30	30	30	30	

Exemple de tableau de durée acquise pour la rupture du tenon d'un assemblage tenon-mortaise

Compléments d'épaisseur pour prolonger la durée acquise

Par analogie avec les sections de poutres et les assemblages par tiges métalliques de l'EN 1995-1-2, il est proposé ici une méthode pour prolonger la durée de résistance au feu acquise par le dimensionnement à froid, et déterminée par les tableaux présentés au paragraphe précédent.

Pour chaque assemblage, le praticien détermine dans un premier temps la durée acquise pour chaque mode de rupture. Selon les cas il apporte des surépaisseurs aux dimensions calculées à froid afin de prolonger la durée de résistance de l'un, de l'autre ou des deux modes de rupture, jusqu'à ce que les deux modes aient une durée supérieure à la durée requise.

La valeur de la surépaisseur à apporter est calculée ainsi : $e = \beta_n (t_{req} - t_{acquis})$

La surépaisseur est à apporter uniquement sur les faces des pièces qui sont concernées par le mode de rupture à traiter. Selon les cas cette surépaisseur est à ajouter d'un côté des éléments ou des deux côtés. Si l'on ajoute déjà des surépaisseurs aux poutres bois pour leur résistance hors assemblages, les surépaisseurs ne doivent pas être cumulées.

Règles de moyens sur les dimensions pour obtenir une certaine durée (R15 ou R30)

Il s'agit ici de proposer la méthode de justification la plus simple possible, c'est-à-dire l'obtention d'une durée donnée (R15 ou R30) sous réserve du simple respect de critères géométriques.

Ces critères peuvent être déduits directement de l'analyse des tableaux présentés au paragraphe précédent donnant t en fonction des dimensions principales et du taux de travail à froid.

Le but étant de proposer la méthode la plus simple, on fait l'hypothèse que les utilisateurs de celle-ci ne connaissent pas le taux de travail à froid, par conséquent les critères proposés sont basés sur les tableaux pour un taux de travail à froid (τ_{froid}) de 100%.

Essence	R15 (15 minutes)	R30 (30 minutes)
Résineux et hêtre	$b_{arb} + 2 h_{tal} \geq 180 \text{ mm}$	$b_{arb} = 180 \text{ mm}$ et $h_{tal} = 75 \text{ mm}$
Feuillus sauf hêtre	Le respect du domaine de validité page 8 suffit	$b_{arb} \geq 140 \text{ mm}$ et $b_{arb} + 4 h_{tal} \geq 400 \text{ mm}$

Exemple de règle de moyen pour la justification des embrèvements

DIMENSIONNEMENT AU FEU DES ASSEMBLAGES DE STRUCTURES BOIS CONFORMEMENT AUX EUROCODES

Ce guide s'adresse aux professionnels de la filière bois, qui, dans le cadre de chantiers de structures bois, se trouvent confrontés à des problématiques de dimensionnement des assemblages traditionnels.

Le lecteur pourra trouver dans ces pages des méthodes de justification des assemblages traditionnels de structures bois en situation d'incendie (embrèvements, queues d'arondes, tenon-mortaise).

Pour chaque technique d'assemblage, le lecteur trouvera dans les deux principales parties de ce guide des méthodes de justification simples, ainsi que des méthodes de justification avancées. Chaque méthode présentée est illustrée par une application numérique. Le lecteur trouvera enfin dans la dernière partie de ce guide l'explication complète de la méthodologie utilisée pour bâtir ce guide.

Notons que ces points de repère n'ont qu'une valeur d'exemple et n'exonèrent pas le professionnel de sa responsabilité de l'exercice de ses devoirs professionnels.

AUTEUR :



2, rue Thomas Edison
67450 Mundolsheim
Tel +33 (0) 821 20 85 13
Fax +33 (0) 355 03 56 20
contact.FR@c4ci.eu
www.c4ci.fr

FINANCEMENT :

