

DIMENSIONNEMENT À FROID DES ASSEMBLAGES TRADITIONNELS BOIS

CONFORMEMENT AUX EUROCODES



FINANCEMENT

CODIFAB

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

AUTEUR



Maxime ALLAIS
Frank KUPFERLE
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	UMB FFB
Gilles MARMORET	CAPEB UNA CMA
Guy-Noël POTRON	CAPEB UNA CMA
Thomas FERET	FIBC

GRUPE CONSULTATIF D'EXPERTS

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

Georges ADJANOHOUN	APAVE
Laurent BLERON	ENSTIB
Renaud BLONDEAU-PATISSIER	WOODEUM
Jean-François BOCQUET	ENSTIB
Soline BONNEVAL	ECSB
Philippe BONTEMPS	AFPA
Dominique CALVI	BET CALVI
Jean-Luc COUREAU	I2M
Benoît DE TERNAY	CHARPENTES FRANCAISES
Carole FAYE	FCBA
Gaëtan GENES	ECSB
Stéphane HAMEURY	CSTB
Laurent LE MAGOROU	FCBA
Etienne LEROY	ITECH
Florent LYON	CSTB
Sergio MEDEL	MD BAT
Benoît MOREL	CMOI
Damien QUIDET	ITECH
Patrick RACHER	POLYTECH CLERMONT-FERRAND
Jacques Long TRINH	Consultant
Jean-Luc ZINS	

Photo de couverture : © Vermont Timber Works - www.vermonttimberworks.com

© C4ci, 2015. Tous droits réservés. En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie - 20 rue des Grands Augustins, 75006 Paris

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. Ce temps d'étude peut être pénalisant pour les structures bois simples, pour lesquelles le temps d'étude est difficilement valorisable économiquement.

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.

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 à froid des assemblages traditionnels de structures bois.

Le présent guide a pour objectif double de :

- Fournir des méthodes de dimensionnement à froid des assemblages traditionnels bois-bois (embrèvement, tenon-mortaise, queue d'aronde, cheville) conformes aux Eurocodes
- Simplifier ces méthodes de dimensionnement pour les cas des structures les plus courantes

Afin de déterminer les méthodes de dimensionnement à froid des assemblages traditionnels bois-bois, les consultants de C4Ci ont effectué un travail large d'identification des méthodes existantes et résultats d'essais en Europe et dans le Monde. Ils ont en particulier pu s'appuyer sur les travaux de recherche français financés par les organisations professionnelles du CODIFAB et réalisés entre 2004 et 2013. Ils ont sélectionnées et calibrées les meilleures méthodes, et les ont soumises à la validation d'experts techniques volontaires rassemblés au sein d'un groupe consultatif.

La simplification des méthodes de dimensionnement a été réalisée par un compromis entre temps d'étude et précision du calcul. Des domaines d'emploi restreints ont permis de limiter la perte de performance due à l'aspect sécuritaire des simplifications. Aussi, des prescriptions de conception permettent de se placer dans les modes de rupture souhaités, limitant ainsi le nombre de formules à vérifier. Enfin, des coefficients complexes ont été approximés par des valeurs courantes et sécuritaires.

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
Règles CB	Ancien code de calcul des structures bois Français (remplacé par les Eurocodes)
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 (Octobre 2008)
NF EN 1995-1-1/A2	Amendement A2 à l'Eurocode 5 (Juillet 2014)
NF EN 1995-1-1/NA	Annexe Nationale Française à l'Eurocode 5 (Mai 2010)
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.....	10
1.3. QUEUE D'ARONDE EN PLANCHER.....	12
1.4. CHEVILLE EN DOUBLE CISAILLEMENT.....	14
2. EXEMPLES DE CALCUL UTILISANT LES METHODES SIMPLES.....	16
2.1. DIMENSIONNEMENT D'UN EMBREVEMENT SIMPLE EN CHARPENTE.....	18
2.2. DIMENSIONNEMENT D'UNE QUEUE D'ARONDE EN PLANCHER.....	24
3. TABLEAUX DE VALEURS BASES SUR LES METHODES SIMPLES.....	28
3.1. EMBREVEMENT SIMPLE EN CHARPENTE.....	30
3.2. TENON-MORTAISE EN PLANCHER.....	31
3.3. QUEUE D'ARONDE EN PLANCHER.....	32
3.4. CHEVILLE EN DOUBLE CISAILLEMENT.....	33
4. METHODES DE DIMENSIONNEMENT AVANCEES.....	34
4.1. EMBREVEMENT SIMPLE EN CHARPENTE.....	36
4.2. TENON-MORTAISE EN PLANCHER.....	40
4.3. QUEUE D'ARONDE EN PLANCHER.....	44
4.4. CHEVILLE EN DOUBLE CISAILLEMENT.....	48
5. METHODOLOGIE DE PROJET.....	50
5.1. RECEUIL ET ETUDE DES METHODES DE CALCUL EXISTANTES.....	52
5.2. RECEUIL DES DONNEES D'ESSAI DISPONIBLES.....	54
5.3. CALIBRATION DES METHODES DE CALCUL DE RESISTANCE.....	55
5.4. SELECTION DES METHODES DE CALCUL DE RESISTANCE.....	57
5.5. SIMPLIFICATION DES METHODES DE CALCUL DE RESISTANCE.....	61
5.6. PROPOSITION/CALIBRATION DES METHODES DE CALCUL DE RIGIDITE.....	62

MÉTHODES DE DIMENSIONNEMENT SIMPLES

INTRODUCTION

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

Ces méthodes simples sont présentées par technique d'assemblage sur une double page. **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).**

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 pré-dimensionnement et de dimensionnement présentées. En cas de non-respect du domaine de validité, consulter la section « **4. Méthode de dimensionnement avancées** » du présent document.

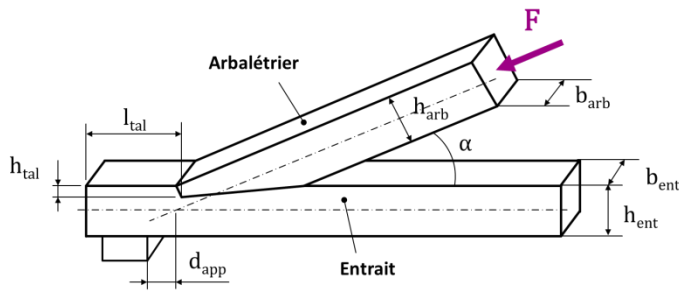
Le paragraphe « **Pré-dimensionnement rapide** » permet à partir d'un effort connu appliqué sur l'assemblage de déterminer certaines dimensions clés des assemblages afin d'en assurer la résistance. Afin de valider un assemblage, toutes les formules présentées doivent être utilisées. Enfin, il convient de vérifier que les résultats des calculs sont compatibles avec le domaine de validité.

Le paragraphe « **Dimensionnement simple** » permet pour un assemblage connu de calculer pour chaque mode de rupture la contrainte (notée C) appliquée et la résistance de l'assemblage (notée R) afin de les comparer. On doit avoir $R \geq C$, que l'on peut aussi écrire $C/R \leq 100\%$ (C/R est le taux de travail à froid). **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 réels. Ils sont issus directement de la descente de charges réelles appliquées sur la structure, **sans besoin de les pondérer par des coefficients complémentaires.** Les coefficients de sécurité sont déjà inclus dans les formules présentées. **Si vous ne disposez pas des efforts réels appliqués à votre structure mais uniquement des efforts pondérés,** divisez-les par 1,5 pour pouvoir utiliser les formules de cette section.

1.1. EMBREVEMENT SIMPLE EN CHARPENTE

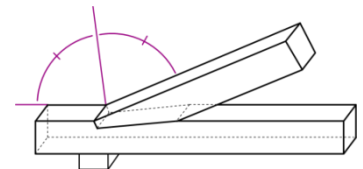
PRÉSENTATION DE L'ASSEMBLAGE



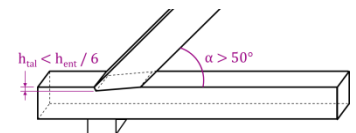
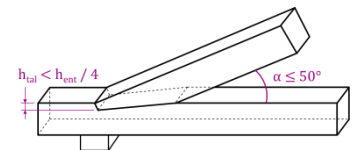
F	Effort <u>non pondéré</u> sur l'arbalétrier	[daN]
α	Angle entre l'arbalétrier et l'entrait	[°]
b_{ent}	Largeur de l'entrait	[mm]
h_{ent}	Hauteur de l'entrait	[mm]
b_{arb}	Largeur de l'arbalétrier	[mm]
h_{arb}	Hauteur de l'arbalétrier	[mm]
h_{tal}	Hauteur du talon	[mm]
l_{tal}	Longueur du talon	[mm]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

DOMAINE DE VALIDITÉ DE LA MÉTHODE SIMPLE

- TYPE D'EMBREVEMENT : embreèvement simple sans tenon-mortaise
- NATURE DES BOIS UTILISES : même nature pour tous les éléments
 - Massif/reconstitué : résineux C18 à C30, feuillus D18 à D30
 - Lamellé collé : résineux GL20 à GL30
- SECTIONS DES ELEMENTS
 - Largeur maximale : 180 mm pour l'arbalétrier et 200 mm pour l'entrait
 - Hauteur maximale : 300 mm
 - h_{arb} : $\geq 0,6 \times h_{ent} + 10$ mm
 - b_{arb} : $\leq b_{ent}$
- ANGLE ENTRAIT/ARBALETRIER : de 17° à 60° (soit 30% à 175%)
- 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



Taillage à la bissectrice obligatoire



Hauteur maximale du talon fonction de l'angle

PRÉ-DIMENSIONNEMENT RAPIDE

Longueur minimale du talon $l_{tal} = 48,6 \times \frac{F \times \cos \alpha \times k_{maj}}{b_{arb} \times R_v}$ [mm]

Hauteur minimale du talon $h_{tal} = 32,5 \times \frac{F \times \cos^2(\alpha/2)}{b_{arb} \times R_c}$ [mm]

k_{maj} vaut 1,25 pour le bois lamellé et le bois massif reconstitué et 1,65 pour le bois massif.

Retrouvez les valeurs courantes de $\cos \alpha$, $\cos^2(\alpha/2)$, R_v et R_c dans les tableaux 1 et 2 ci-après.

Application Numérique : pour un entrait en 160 x 160, un arbalétrier en 100 x 200 en résineux massif C24, une pente de 35°, et un effort de 1 100 daN

On a bien $h_{arb} \geq 0,6 \times h_{ent} + 10$ puisque $200 \geq 0,6 \times 160 + 10 = 106$ et On a bien $b_{arb} \leq b_{ent}$ puisque $100 \leq 160$

On peut donc utiliser la méthode de pré-dimensionnement rapide

$$l_{tal} = 48,6 \times \frac{F \times \cos \alpha \times k_{maj}}{b_{arb} \times R_v} = 48,6 \times \frac{1100 \times 0,82 \times 1,65}{100 \times 4} = 181 \text{ mm} \quad \text{et} \quad h_{tal} = 32,5 \times \frac{F \times \cos^2(\alpha/2)}{b_{arb} \times R_c} = 32,5 \times \frac{1100 \times 0,91}{100 \times 12,83} = 25 \text{ mm}$$

Vérifications : on a bien $l_{tal} \geq 150$ mm, $l_{tal} \leq 8 \times 25 = 200$ mm, et $h_{tal} \leq h_{ent}/4 = 160/4 = 40$ mm



DIMENSIONNEMENT SIMPLE

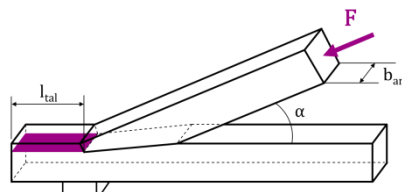
1. Vérification du cisaillement du talon : on doit avoir $R \geq C$

Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$C = 22,4 \times \frac{F \times \cos \alpha \times k_{maj}}{b_{arb} \times l_{tal}}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$R = 0,46 \times R_v$$



Surface contrainte en cisaillement



Dans toute la double page F est l'effort non pondéré appliqué à l'assemblage.

Si vous disposez d'un effort F déjà pondéré, divisez-le par 1,5

Avec : $\cos \alpha$ à prendre dans le tableau 1 ci-après

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

R_v résistance caractéristique au cisaillement du bois utilisé [MPa]
à prendre dans le tableau 2 ci-après

Application Numérique : dans le même cas que l'application numérique précédente avec un talon de longueur 200 mm et de hauteur 40 mm

$$C = 22,4 \times \frac{F \times \cos \alpha \times k_{maj}}{b_{arb} \times l_{tal}} = 22,4 \times \frac{1100 \times 0,82 \times 1,65}{100 \times 200} = 1,67 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad R = 0,46 \times R_v = 0,46 \times 4 = 1,84 \text{ MPa} \quad \text{On a bien } R \geq C$$

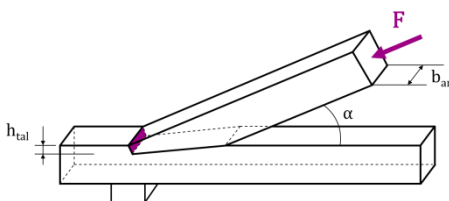
2. Vérification de la compression oblique l'about : on doit avoir $R \geq C$

Calcul de la contrainte de compression [MPa]

$$C = 15 \times \frac{F \times \cos^2(\alpha/2)}{b_{arb} \times h_{tal}}$$

Calcul de la résistance en compression [Mpa]

$$R = 0,46 \times R_c$$



Surface de l'about contrainte en compression oblique

Avec : $\cos^2(\alpha/2)$ à prendre dans le tableau 1 ci-après

R_c résistance caractéristique à la compression de l'about à un angle de $(\alpha/2)$ [MPa]
à prendre dans le tableau 1 ci-après

Application Numérique : dans le même cas que l'application numérique précédente

$$C = 15 \times \frac{F \times \cos^2(\alpha/2)}{b_{arb} \times h_{tal}} = 15 \times \frac{1100 \times 0,91}{100 \times 40} = 3,75 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad R = 0,46 \times R_c = 0,46 \times 12,83 = 5,90 \text{ MPa} \quad \text{On a bien } R \geq C$$

Tableau 1 – Résistance à la compression oblique fonction de l'angle α

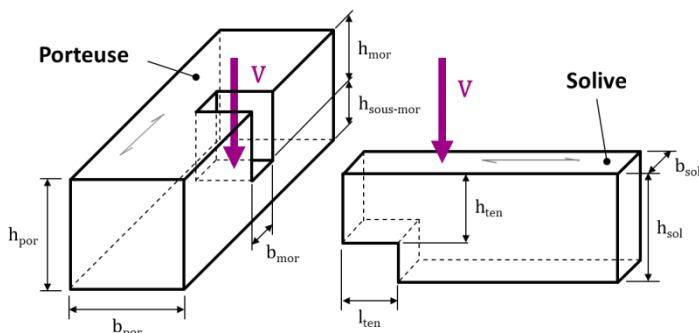
α [°]	α [%]	$\cos \alpha$	$\cos^2(\alpha/2)$	R_c [MPa]		
				Massif/BMR Résineux	Massif/BMR Feuillus	Lamellé Résineux
17	30%	0,96	0,98	16,40	17,43	18,55
20	35%	0,94	0,97	15,87	17,22	18,06
25	45%	0,91	0,96	14,89	16,82	17,13
30	60%	0,87	0,93	13,66	16,26	15,94
35	70%	0,82	0,91	12,83	15,85	15,12
40	85%	0,77	0,88	11,76	15,27	14,03
45	100%	0,71	0,85	10,89	14,76	13,13
50	120%	0,64	0,82	9,99	14,17	12,18
55	140%	0,58	0,79	9,23	13,64	11,35
60	175%	0,50	0,75	8,48	13,06	10,53

Tableau 2
Résistance au cisaillement

Classe de bois	R_v [MPa]
C18	3,4
C24	4
C30	4
D18	3,5
D24	3,7
D30	3,9
GL20h	3,5
GL24h	3,5
GL28h	3,5
GL30h	3,5

1.2. TENON-MORTAISE EN PLANCHER

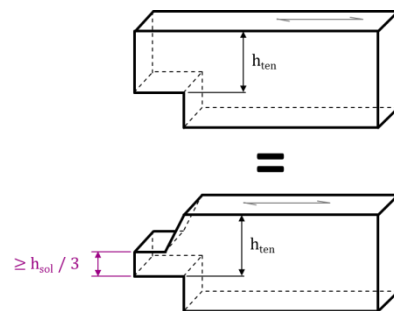
PRÉSENTATION DE L'ASSEMBLAGE



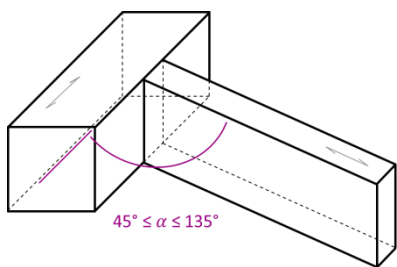
V	Effort tranchant <u>non pondéré</u>	[daN]
h_{por}	Hauteur de la poutre porteuse	[mm]
b_{por}	Largeur de la poutre porteuse	[mm]
h_{sol}	Hauteur de la solive	[mm]
b_{sol}	Largeur de la solive	[mm]
h_{mor}	Hauteur de la mortaise	[mm]
$h_{sous-mor}$	Hauteur de bois sous la mortaise	[mm]
b_{mor}	Largeur de la mortaise	[mm]
h_{ten}	Hauteur du tenon	[mm]
l_{ten}	Longueur du tenon	[mm]

DOMAINE DE VALIDITÉ DE LA MÉTHODE SIMPLE

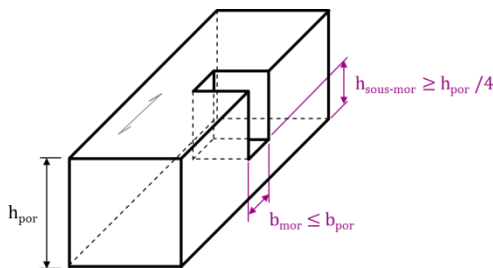
- TYPE DE TENON-MORTAISE : tenon toute largeur et débouchant en partie supérieure ou avec mordâne
- NATURE DES BOIS UTILISÉS : même nature pour tous les éléments
 - Massif/reconstitué : résineux C18 à C30, feuillus D18 à D30
 - Lamellé collé : résineux GL20 à GL30
- SECTIONS DES ELEMENTS
 - Largeur maximale : 180 mm
 - Hauteur maximale : 300 mm
 - Solive moins large que la poutre porteuse
- GEOMETRIE DE L'ASSEMBLAGE
 - Angle porteur/supporté : $45^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$
 - Longueur du tenon :
 - $l_{ten} \geq 0,3 \times h_{ten}$
 - $l_{ten} \geq b_{por}/3$
 - $l_{ten} \geq 40 \text{ mm}$
 - $l_{ten} \leq 80 \text{ mm}$
 - 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 réhibitoires
 - Il doit exister un jeu entre l'extrémité du tenon et le fond d'une mortaise borgne



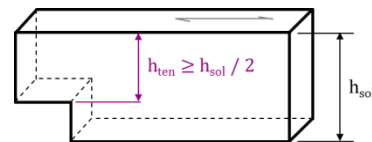
Le tenon débouchant en partie supérieure et le tenon avec mordâne se traitent de façon similaire si la partie centrale du tenon est suffisamment haute



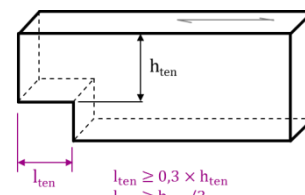
Limites de l'angle porteuse/solive



Exigences concernant la mortaise



Exigences concernant la hauteur du tenon



Exigences concernant la longueur du tenon

Les méthodes présentées en pages 10 et 11 ne sont valables que si le domaine de validité présenté ici est respecté

PRÉ-DIMENSIONNEMENT RAPIDE

Hauteur minimale du tenon

$$h_{ten} = \sqrt{93,9 \times \frac{V}{R_v} \times \frac{h_{sol}}{b_{sol}}} \quad [\text{mm}]$$

Hauteur minimale de bois sous mortaise

$$h_{sous-mor} = 36,4 \times \frac{V}{R_v \times b_{por}} \quad [\text{mm}]$$

Retrouvez les valeurs courantes de R_v dans le tableau 3 ci-après.

Application Numérique :

On a un assemblage tenon-mortaise sur lequel s'applique un effort tranchant transversal au fil de l'élément porteur de 300 daN.

On a un élément porteur en 75 x 225 et un élément supporté en 75 x 225 en résineux massif C24, formant ensemble un angle de 90°.

Le tenon est toute largeur et débouchant en partie supérieure. La mortaise aura la même hauteur et la même largeur que celles du tenon (au jeu près).

Les vérifications de la géométrie de l'assemblage montrent pour l'instant que l'on peut utiliser la méthode de pré-dimensionnement rapide

$$h_{ten} = \sqrt{93,9 \times \frac{V}{R_v} \times \frac{h_{sol}}{b_{sol}}} = \sqrt{93,9 \times \frac{300}{4} \times \frac{225}{75}} = 145 \text{ mm} \quad \text{et} \quad h_{sous-mor} = 36,4 \times \frac{V}{R_v \times b_{por}} = 36,4 \times \frac{400}{4 \times 75} = 49 \text{ mm}$$

En prenant $h_{ten} = 150 \text{ mm}$, on a bien $h_{ten} \geq h_{sol} / 2$. Ce qui donne $h_{sous-mor} = h_{por} - h_{ten} = 75 \text{ mm}$, on a bien $h_{sous-mor} \geq 49 \text{ mm}$ et $\geq h_{por} / 4$

Enfin, il nous faut choisir une longueur de tenon telle que : $l_{ten} \geq 0,3 \times h_{ten}$ et $l_{ten} \geq b_{por} / 3$ et $l_{ten} \geq 40 \text{ mm}$ et $l_{ten} \leq 80 \text{ mm}$. $l_{ten} = 50 \text{ mm}$ convient

DIMENSIONNEMENT SIMPLE

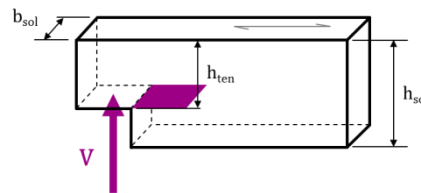
1. Vérification du cisaillement du tenon : on doit avoir $R \geq C$

Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$C = 43,3 \times \frac{V \times h_{sol}}{b_{sol} \times h_{ten}^2}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$R = 0,46 \times R_v$$



La surface réellement sollicitée (en rose) est différente de celle utilisée pour le calcul ($b_{sol} \times h_{ten}$)

Avec : R_v résistance caractéristique au cisaillement du bois utilisé [MPa]
à prendre dans le tableau 3 ci-après

Application Numérique : dans le même cas que l'application numérique précédente avec $h_{ten} = 150 \text{ mm}$, $l_{ten} = 50 \text{ mm}$, d'où $h_{sous-mor} = 75 \text{ mm}$

$$C = 43,3 \times \frac{V \times h_{sol}}{b_{sol} \times h_{ten}^2} = 43,3 \times \frac{300 \times 225}{75 \times 150^2} = 1,73 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad R = 0,46 \times R_v = 0,46 \times 4 = 1,84 \text{ MPa} \quad \text{On a bien } R \geq C$$

2. Vérification du cisaillement de la mortaise : on doit avoir $R \geq C$

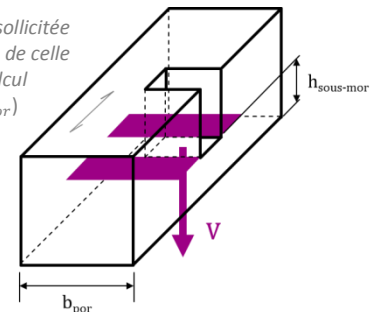
Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$C = 16,8 \times \frac{V}{b_{por} \times h_{sous-mor}}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$R = 0,46 \times R_v$$

La surface réellement sollicitée (en rose) est différente de celle utilisée pour le calcul ($b_{por} \times h_{sous-mor}$)



Avec : R_v résistance caractéristique au cisaillement du bois utilisé [MPa]
à prendre dans le tableau 3 ci-après

Application Numérique : dans le même cas que l'application numérique précédente

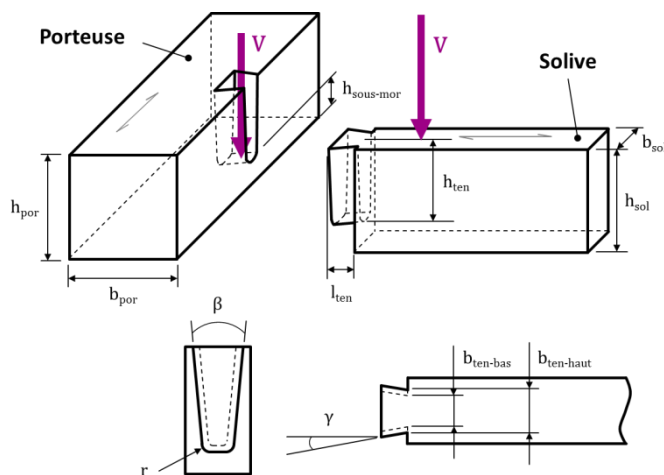
$$C = 16,8 \times \frac{V}{b_{por} \times h_{sous-mor}} = 16,8 \times \frac{300}{75 \times 75} = 0,90 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad R = 0,46 \times R_v = 0,46 \times 4 = 1,84 \text{ MPa} \quad \text{On a bien } R \geq C$$

Tableau 3 – Résistance au cisaillement fonction de la classe de bois

Classe de bois	C18	C24	C30	D18	D24	D30	GL20h	GL24h	GL28h	GL30h
R_v [MPa]	3,4	4	4	3,5	3,7	3,9	3,5	3,5	3,5	3,5

1.3. QUEUE D'ARONDE EN PLANCHER

PRÉSENTATION DE L'ASSEMBLAGE



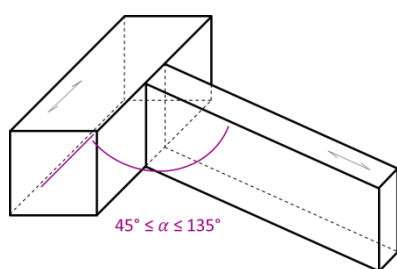
V	Effort tranchant <u>non pondéré</u>	[daN]
h_{por}	Hauteur de la poutre porteuse	[mm]
b_{por}	Largeur de la poutre porteuse	[mm]
h_{sol}	Hauteur de la solive	[mm]
b_{sol}	Largeur de la solive	[mm]
$h_{sous-mor}$	Hauteur de bois sous la mortaise	[mm]
h_{ten}	Hauteur du tenon	[mm]
$b_{ten-haut}$	Largeur 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

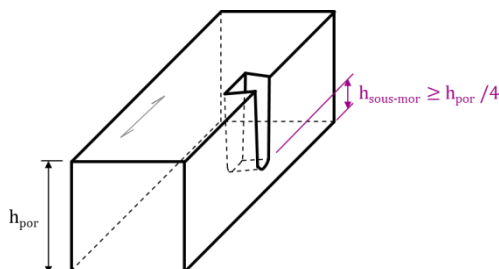
- TYPE DE QUEUE D'ARONDE tenon centré sur sa largeur
- NATURE DES BOIS UTILISÉS même nature pour tous les éléments
 - Massif/reconstitué résineux C18 à C30, feuillus D18 à D30
 - Lamellé collé résineux GL20 à GL30
- SECTIONS DES ELEMENTS
 - Largeur maximale 180 mm
 - Hauteur maximale 240 mm
 - Solive 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 $b_{ten-bas} \geq 0,75 \times b_{sol}$
 - Longueur du tenon $l_{ten} \geq 0,3 \times h_{ten}$ et $l_{ten} \geq 25$ mm et $l_{ten} \leq 80$ mm
 - Rayon des congés du tenon 10 mm $\leq r \leq 60$ 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
 - Il peut exister un jeu positif entre la partie inférieure du tenon et la mortaise



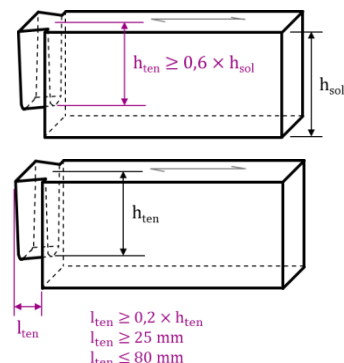
Les méthodes présentées en page 13 ne sont valables que si le domaine de validité présenté ici est respecté



Limites de l'angle porteuse/solive



Exigences concernant la mortaise



Exigences concernant la hauteur et la longueur du tenon

PRÉ-DIMENSIONNEMENT SIMPLE

Hauteur minimale du tenon

$$h_{ten} = \sqrt{117,1 \times \frac{V}{R_v} \times \frac{h_{sol}}{b_{sol}}} \quad [\text{mm}]$$

b_{ef} est la valeur la plus petite entre b_{por} et 100 mm

Hauteur minimale de bois sous mortaise

$$h_{sous-mor} = 36,4 \times \frac{V}{R_v \times b_{ef}} \quad [\text{mm}]$$

Retrouvez les valeurs courantes de R_v dans le tableau 4 ci-après.

Application Numérique :

On a un assemblage par queue d'aronde sur lequel s'applique un effort tranchant transversal au fil de l'élément porteur de 200 daN.

On a un élément porteur en 100 x 180 et un élément supporté en 80 x 160 en résineux massif C24, formant ensemble un angle de 90°.

Le tenon a pour largeur à sa base en partie supérieure 80 mm et en partie inférieure 70 mm. On a bien $b_{ten-haut} \geq 0,8 \times b_{sol}$ et $b_{ten-bas} \geq 0,75 \times b_{sol}$

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

Les vérifications de la géométrie de l'assemblage montrent pour l'instant que l'on peut utiliser la méthode de pré-dimensionnement rapide

$$h_{ten} = \sqrt{117,1 \times \frac{V}{R_v} \times \frac{h_{sol}}{b_{sol}}} = \sqrt{117,1 \times \frac{200}{4} \times \frac{160}{80}} = 109 \text{ mm} \quad \text{et} \quad h_{sous-mor} = 36,4 \times \frac{V}{R_v \times b_{por}} = 36,4 \times \frac{200}{4 \times 100} = 19 \text{ mm}$$

En prenant $h_{ten} = 110 \text{ mm}$, on a bien $h_{ten} \geq 0,6 \times h_{sol}$. Ce qui donne $h_{sous-mor} = h_{por} - h_{ten} = 70 \text{ mm}$, on a bien $h_{sous-mor} \geq 19 \text{ mm}$ et $h_{por} / 4$. Enfin, il nous faut choisir une longueur de tenon telle que : $25 \text{ mm} \leq l_{ten} \leq 80 \text{ mm}$ et $l_{ten} \geq 0,3 \times h_{ten}$. Une longueur de tenon de 35 mm convient

DIMENSIONNEMENT SIMPLE

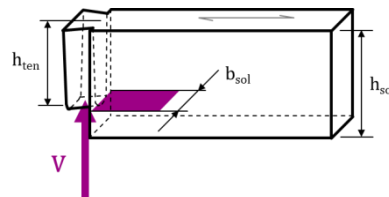
1. Vérification du cisaillement du tenon : on doit avoir $R \geq C$

Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$C = 54,1 \times \frac{V \times h_{sol}}{b_{sol} \times h_{ten}^2}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$R = 0,46 \times R_v$$



La surface réellement sollicitée (en rose) est différente de celle utilisée pour le calcul ($b_{sol} \times h_{ten}$)



Dans toute la page V est l'effort non pondéré appliqué à l'assemblage.

Si vous disposez d'un effort V déjà pondéré, divisez-le par 1,5

Avec : R_v résistance caractéristique au cisaillement du bois utilisé [MPa] à prendre dans le tableau 4 ci-après

Application Numérique : dans le même cas que l'application numérique précédente avec $h_t = 110 \text{ mm}$, $l_t = 35 \text{ mm}$, d'où $h_{sous-mor} = 70 \text{ mm}$

$$C = 54,1 \times \frac{V \times h_{sol}}{b_{sol} \times h_{ten}^2} = 54,1 \times \frac{200 \times 160}{80 \times 110^2} = 1,79 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad R = 0,46 \times R_v = 0,46 \times 4 = 1,84 \text{ MPa} \quad \text{On a bien } R \geq C$$

2. Vérification du cisaillement de la mortaise : on doit avoir $R \geq C$

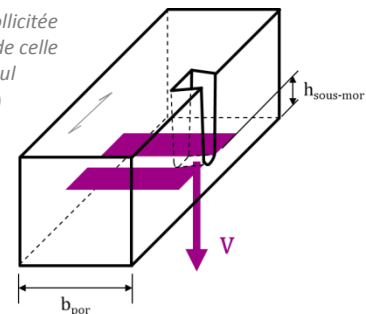
Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$C = 16,8 \times \frac{V}{b_{ef} \times h_{sous-mor}}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$R = 0,46 \times R_v$$

La surface réellement sollicitée (en rose) est différente de celle utilisée pour le calcul ($b_{ef} \times h_{sous-mor}$)



Avec : b_{ef} est la valeur la plus petite entre b_{por} [mm] et 100 [mm]

R_v résistance caractéristique au cisaillement du bois utilisé [MPa] à prendre dans le tableau 4 ci-après

Application Numérique : dans le même cas que l'application numérique précédente

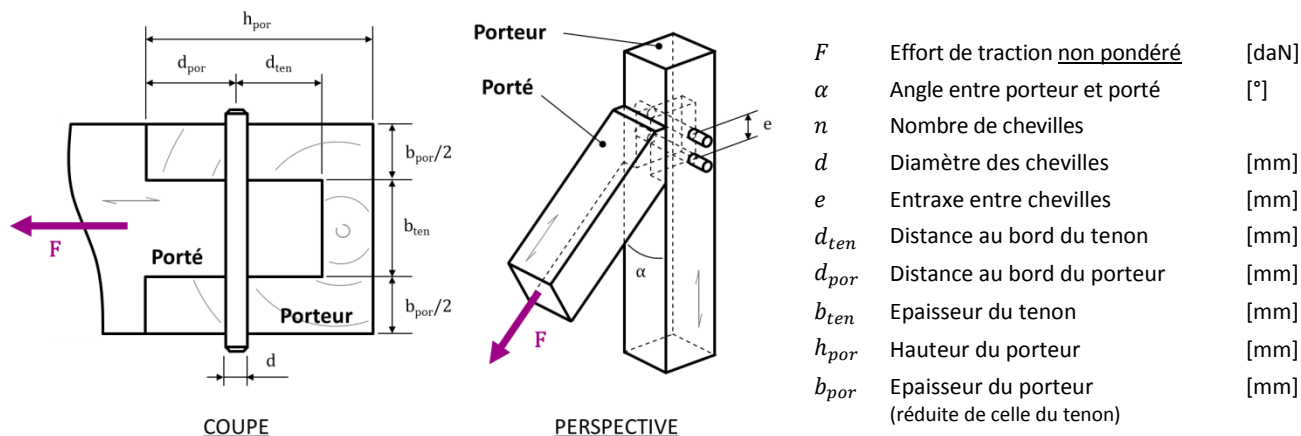
$$C = 16,8 \times \frac{V}{b_{por} \times h_{sous-mor}} = 16,8 \times \frac{200}{100 \times 70} = 0,48 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad R = 0,46 \times R_v = 0,46 \times 4 = 1,84 \text{ MPa} \quad \text{On a bien } R \geq C$$

Tableau 4 – Résistance au cisaillement fonction de la classe de bois

Classe de bois	C18	C24	C30	D18	D24	D30	GL20h	GL24h	GL28h	GL30h
R_v [MPa]	3,4	4	4	3,5	3,7	3,9	3,5	3,5	3,5	3,5

1.4. CHEVILLE EN DOUBLE CISAILLEMENT

PRÉSENTATION DE L'ASSEMBLAGE



DOMAINE DE VALIDITÉ DE LA MÉTHODE SIMPLE

Les chevilles ne sont pas prévues pour reprendre d'effort en situation courante. Les méthodes présentées ci-après permettent uniquement de justifier de la résistance des chevilles lors de situations exceptionnelles comme le cas de phase de levage ou le cas d'un soulèvement de la toiture.

- TYPE DE CHEVILLE : tronconique ou circulaire
- NATURE DES BOIS UTILISÉS : bois secs plus durs que les bois à assembler (ex : acacia, chêne, frêne)
- GEOMETRIE DE L'ASSEMBLAGE
 - Nombre de chevilles : $n = 1$ ou 2
 - Diamètre des chevilles : $14 \text{ mm} \leq d \leq 30 \text{ mm}$
 - Entraxe des chevilles : $e \geq 2 \times d$
 - Epaisseur du tenon : $b_{ten} \geq 2 \times d$
 - Distance au bord du tenon : $d_{ten} \geq 2 \times d$
 - Distance au bord du porteur : $d_{por} \geq d$
- EXECUTION
 - Les zones sollicitées de l'assemblage doivent être exemptes de défauts rédhibitoires

⚠

Les méthodes présentées en pages 14 et 15 ne sont valables que si le domaine de validité présenté ici est respecté

DIMENSIONNEMENT SIMPLE

1. Vérification du cisaillement des chevilles : on doit avoir $R \geq F$

Calcul de la résistance au cisaillement [daN]

$$R = 0,3 \times n \times d^2$$

Avec : n nombre de chevilles
 d diamètre des chevilles [mm]

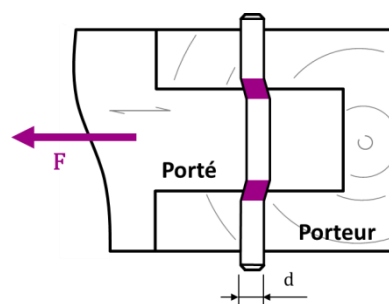
Application Numérique :

Pour un assemblage tenon-mortaise avec 2 chevilles de diamètre 20 mm

Avec un effort de traction de 200 daN

$$F = 200 \text{ daN} \quad \text{et} \quad R = 0,3 \times n \times d^2 = 0,3 \times 2 \times 20^2 = 240 \text{ daN}$$

On a bien $R \geq F$



Mode de rupture des chevilles en double cisaillement

⚠

Dans toute la double page F est l'effort non pondéré appliqué à l'assemblage. Si vous disposez d'un effort F déjà pondéré, divisez-le par 1,5

2. Vérification de la traction transversale du porteur : on doit avoir $R \geq F \times \sin \alpha$

Calcul de la résistance à la traction transversale [daN]

$$R = 8,6 \times \frac{b_{por} \times d_{por}}{h_{por}}$$

Avec : $\sin \alpha$ donné par le tableau 5 ci-après

Application Numérique :

Dans le même cas que l'application numérique précédente

Avec un porteur en 200 x 200 et un tenon de 40 mm d'épaisseur

Un angle entre porteur et porté de 60°

Et une distance au bord du porteur de 50 mm

$$F \times \sin \alpha = 200 \times \sin 60^\circ = 200 \times 0,87 = 174 \text{ daN}$$

$$R = 8,6 \times \frac{b_{por} \times d_{por}}{h_{por}} = 8,6 \times \frac{(200 - 40) \times 50}{200} = 344 \text{ daN}$$

On a bien $R \geq F \times \sin \alpha$

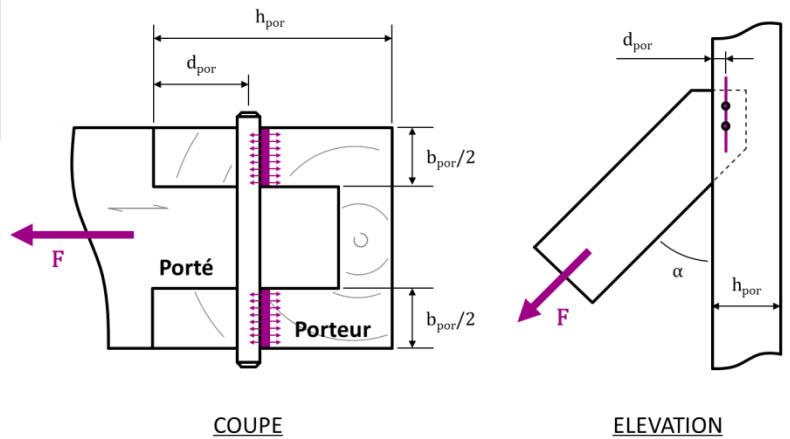


Tableau 5 – Sinus de l'angle α

α [°]	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\sin \alpha$	0,17	0,34	0,50	0,64	0,77	0,87	0,94	0,98	1,00

EXEMPLES DE CALCUL UTILISANT LES MÉTHODES SIMPLES

INTRODUCTION

Les exemples de calcul présentés dans la section ci-après ont pour objectif d'**illustrer à travers deux cas concrets** l'utilisation de la section « **1. Méthodes de dimensionnement simples** » du présent guide. Le premier cas est un embrèvement simple avant utilisé pour assembler les arbalétriers et entrants d'une charpente traditionnelle. Le second est une queue d'aronde utilisée pour assembler solives et porteuses d'un plancher.

Dans chacun des cas, l'exemple présenté détaille **les étapes minimales à suivre** pour dimensionner l'assemblage :

1. Déterminer les efforts appliqués à l'assemblage
2. Vérifier que l'on est bien dans le domaine de validité des méthodes simples du présent guide
3. Dimensionner l'assemblage en utilisant les formules de la section 1

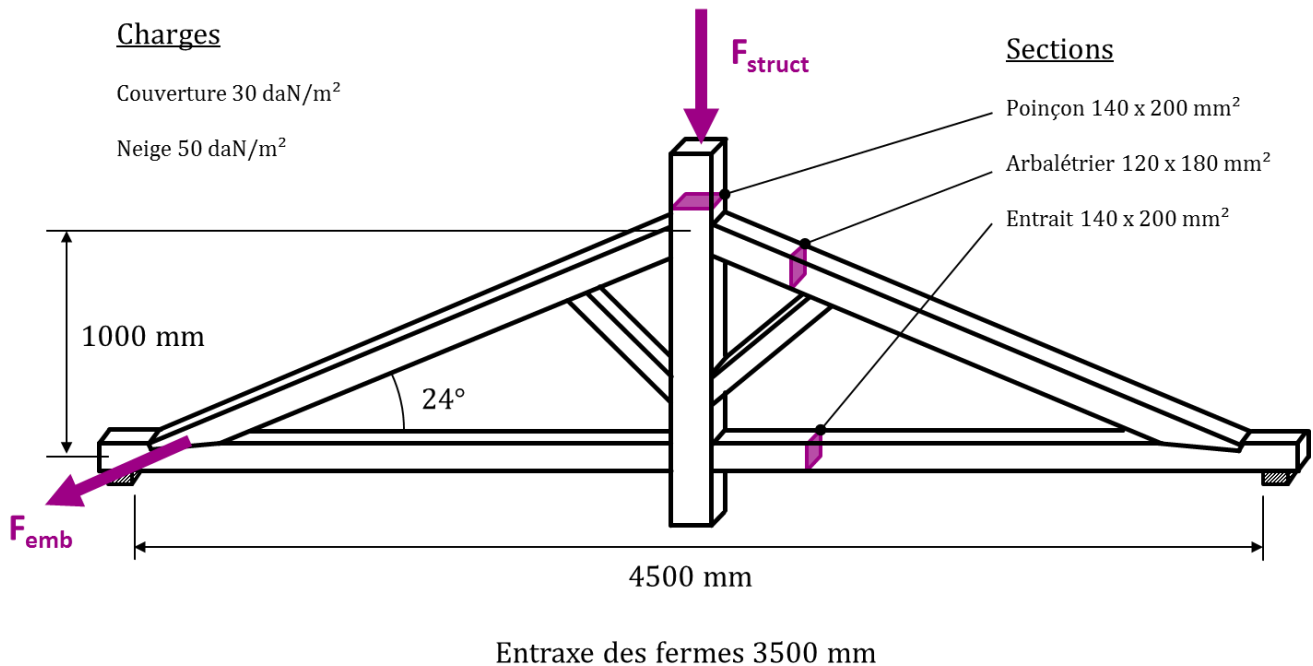
Pour la détermination des efforts appliqués à l'assemblage, il est montré comment agir si l'on souhaite calculer ces efforts **à la main ou à l'aide d'un logiciel** de calcul de structure.

La **vérification de la conformité au domaine de validité se fait en général en deux temps**. Le premier temps - avant le dimensionnement de l'assemblage - a pour objet de vérifier si globalement l'on est dans un cas valide. Le second temps - après le dimensionnement de l'assemblage - permet de vérifier si les solutions qui viennent d'être calculées restent valides.

Enfin, pour le dimensionnement de l'assemblage il est montré comment utiliser les méthodes de « Pré-dimensionnement rapide » ou de « Dimensionnement simple » de la section 1 du présent guide, **selon si l'on a déjà fixé ou non certains paramètres de l'assemblage**.

2.1. DIMENSIONNEMENT D'UN EMBREUMENT SIMPLE EN CHARPENTE

DONNÉES DE L'EXEMPLE



Il s'agit d'une charpente traditionnelle en résineux massif C24 dont les fermes de portée 4,5 m et de hauteur 1 m sont disposées à entraxe régulier de 3,5 m. Les sections des éléments ont déjà été déterminées par ailleurs, et l'on cherche à dimensionner l'embrèvement simple en pied d'arbalétrier.

DÉTERMINATION DE L'EFFORT APPLIQUÉ À L'ASSEMBLAGE

On cherche ici à déterminer l'effort axial F_{emb} appliqué à l'assemblage par embrèvement.

CAS 1 – Détermination de l'effort à la main

1. On détermine l'effort F_{struct} appliqué à la ferme

On ramène tous les efforts appliqués à la ferme (poids propre des bois, poids de couverture, poids de neige) au sommet de celle-ci, sans les pondérer.

a. Composante due au poids propre des bois

Chaque ferme doit supporter son propre poids qui est la somme des poids de chaque élément

$$F_{struct,poids} = 9,81 \text{ N/kg} \times (Masse_{poinçon} + Masse_{arba} + Masse_{entrait})$$

Avec pour chaque pièce : $Masse = Volume \times Densité = (Largeur \times Hauteur \times Longueur) \times Densité$

La densité moyenne du C24 peut être prise à 420 kg/m³ (suivant NF EN 338)

$$\text{Donc : } Masse_{poinçon} = 0,140 \text{ m} \times 0,200 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 420 \text{ kg/m}^3 = 11,8 \text{ kg}$$

$$Masse_{arba} = 2 \times 0,120 \text{ m} \times 0,180 \text{ m} \times 2,25 \text{ m} / \cos 24^\circ \times 420 \text{ kg/m}^3 = 44,7 \text{ kg}$$

$$Masse_{entrait} = 0,140 \text{ m} \times 0,200 \text{ m} \times 4,5 \text{ m} \times 420 \text{ kg/m}^3 = 52,9 \text{ kg}$$

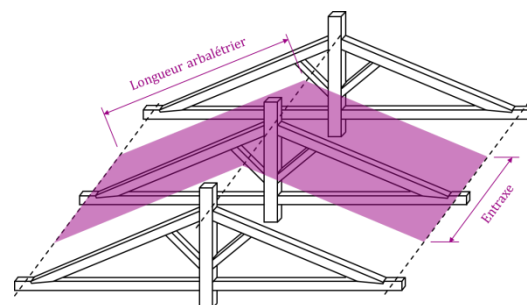
$$F_{struct,poids} = 9,81 \text{ N/kg} \times (11,8 \text{ kg} + 44,7 \text{ kg} + 52,9 \text{ kg}) = 1\,073 \text{ N} = 107 \text{ daN}$$

b. Composante due à la couverture

Chaque ferme supporte une bande de chargement de couverture de largeur égale à l'entraxe des fermes, et de longueur égale à celle de deux fois l'arbalétrier.

$$F_{struct,couv} = q_{couv} \times Entraxe \times 2 \times Longueur_{arba}$$

$$F_{struct,couv} = 30 \text{ daN} \times 3,5 \text{ m} \times 2 \times 2,25 \text{ m} / \cos 24^\circ = 517 \text{ daN}$$



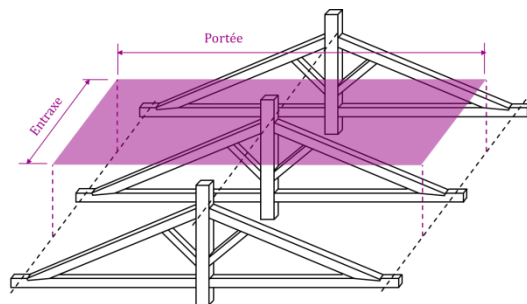
Bande de chargement couverture

c. Composante due à la neige

Chaque ferme supporte une bande de chargement de neige de largeur égale à l'entraxe des fermes, et de longueur égale à la portée.

$$F_{struct,neige} = q_{neige} \times Entraxe \times Portée$$

$$F_{struct,neige} = 50 \text{ daN} \times 3,5 \text{ m} \times 4,5 \text{ m} = 787 \text{ daN}$$

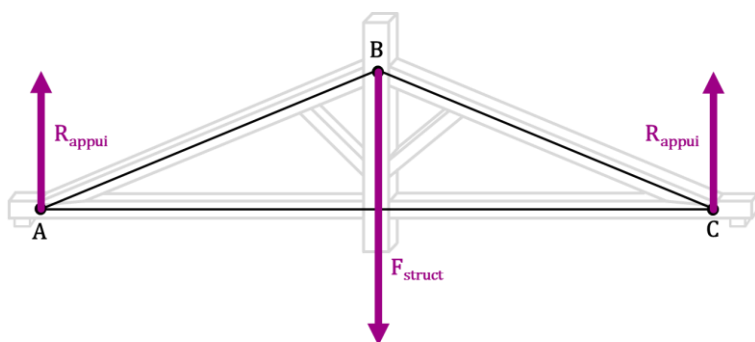


Bande de chargement neige

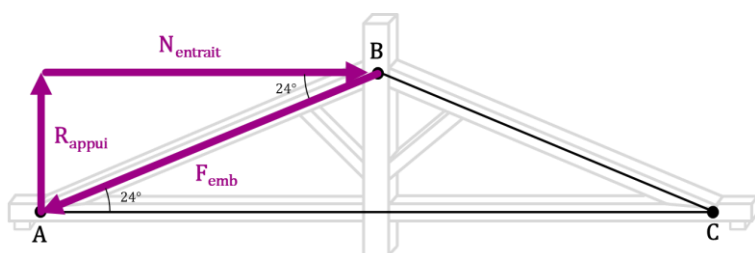
d. Effort total

$$F_{struct} = F_{struct,poids} + F_{struct,couv} + F_{struct,neige}$$

$$F_{struct} = 107 \text{ daN} + 517 \text{ daN} + 787 \text{ daN} = 1\,411 \text{ daN}$$

2. On en déduit l'effort F_{emb} appliqué à l'assemblage par emboîtement

Isolement global de la ferme



Isolement du pied de la ferme (point A)

On modélise la ferme comme un simple triangle composé de l'entrait et des arbalétriers.

L'isolement global de la ferme donne :

$$F_{struct} = 2 \times R_{appui}$$

$$\text{Donc : } R_{appui} = F_{struct}/2$$

L'isolement du pied de la ferme (point A) donne :

$$F_{emb} \times \sin 24^\circ = R_{appui}$$

$$\text{Donc : } F_{emb} = R_{appui}/\sin 24^\circ$$

$$\text{C'est-à-dire : } F_{emb} = \frac{F_{struct}}{2 \times \sin 24^\circ}$$

$$\text{Enfin : } F_{emb} = \frac{1\,411}{2 \times 0,407} = 1\,733 \text{ daN}$$

Dans le cas du calcul à la main, l'effort axial non pondéré F_{emb} appliqué à l'emboîtement vaut 1 733 daN.

CAS 2 – Détermination de l'effort à l'aide d'un logiciel

1. On modélise la ferme/charpente dans un logiciel dédié au calcul de structure bois

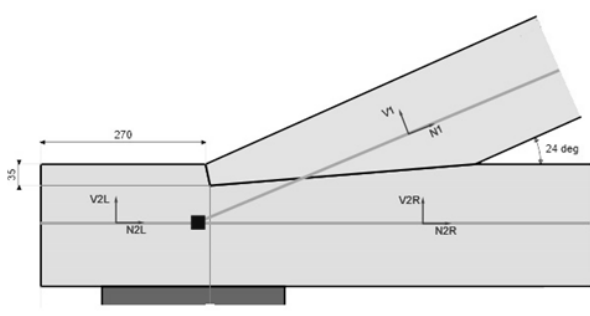
Doivent à minima être renseignés dans le modèle informatisé : l'épure, les sections, le matériau, les charges

2. On lance un calcul de combinaisons de charges aux Eurocodes

Les efforts fournis par les logiciels de calcul métier sont pondérés conformément aux Eurocodes, c'est-à-dire que dans le calcul de combinaisons de charges, chaque charge est pondérée par un coefficient défini par les Eurocodes, par exemple pour les Etats Limites Ultimes (ELU) qui nous intéressent ici :

- Combinaison 1 : 1,35 G
- Combinaison 2 : 1,35 G + 1,5 S

Assemblages Embrèvements entre deux pièces : Tableau des efforts (Combinaisons ELU-STR)



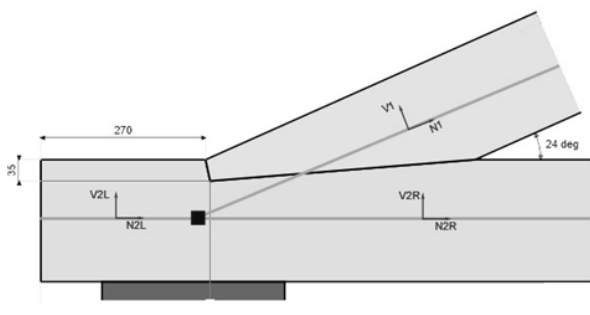
Nœud	Nom	Cas	N1	Vz1	N2L	Vz2L	N2R	Vz2R
-	-	-	daN	daN	daN	daN	daN	daN
ASS-EMB-G	Embrèvement	1: 1.35G	-1019.95	-	931.77	-	-	-
ASS-EMB-G	Embrèvement	2: 1.35G+1.5S	-2472.05	-	2258.33	-	-	-

Exemple n°1 de sortie d'un calcul de la ferme à l'aide d'un logiciel : Efforts pondérés conformément aux Eurocodes (ELU)

Il est également possible avec certains logiciels de générer des combinaisons non pondérées, c'est-à-dire dont tous les coefficients sont égaux à 1, de telle sorte que les efforts obtenus soient directement exploitables avec ce guide. Soit dans notre exemple :

- Combinaison 1 : 1 G
- Combinaison 2 : 1 G + 1 S

Assemblages Embrèvements entre deux pièces : Tableau des efforts (Combinaisons utilisateur)



Nœud	Nom	Cas	N1	Vz1	N2L	Vz2L	N2R	Vz2R
-	-	-	daN	daN	daN	daN	daN	daN
ASS-EMB-G	Embrèvement	1: G	-755.52	-	690.20	-	-	-
ASS-EMB-G	Embrèvement	2: G+S	-1723.58	-	1574.57	-	-	-

Exemple n°2 de sortie d'un calcul de la ferme à l'aide d'un logiciel : Efforts non pondérés (combinaisons créées spécifiquement)

3. On récupère les efforts calculés pour la combinaison la plus pénalisante

On voit sur les figures ci-avant que l'effort dans l'embrèvement F_{emb} est ici noté N1, et que sa valeur maximale vaut :

- 2 472 daN si l'on regarde les efforts pondérés (combinaisons Eurocodes ELU)
- 1 724 daN si l'on regarde les efforts non pondérés (combinaisons créées spécifiquement par l'utilisateur)

Or il est indiqué en introduction de la section « 1. Méthodes de dimensionnement simples » du présent guide, ainsi que dans toutes les pages de celle-ci, que si l'on dispose des efforts pondérés, ils doivent être divisés par 1,5 pour pouvoir être utilisés dans les formules. Par contre si l'on dispose d'efforts non pondérés, ils peuvent être utilisés tels quels dans les formules.

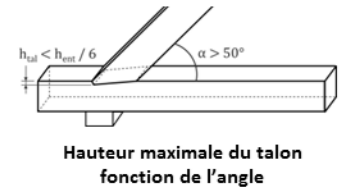
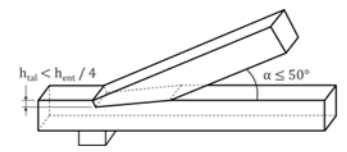
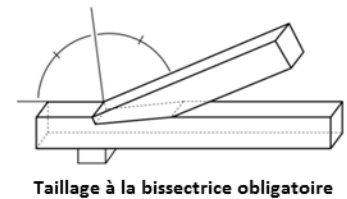
Ainsi dans notre exemple :

- Si l'on utilise les efforts non pondérés donnés par le logiciel, on a : $F_{emb} = 1\,724\text{ daN}$
- Si l'on utilise les efforts pondérés données par le logiciel, on a : $F_{emb} = 2\,472/1,5 = 1\,648\text{ daN}$

VERIFICATION DE LA VALIDITE DES METHODES SIMPLES

Avant d'utiliser les méthodes simples présentées en pages 8 et 9 du présent guide, vérifions que notre configuration entre bien dans le domaine de validité de celles-ci. Le domaine de validité présenté en page 8 est reproduit ci-dessous :

DOMAINE DE VALIDITÉ DE LA MÉTHODE SIMPLE	
▪ TYPE D'EMBRÈVEMENT	embrèvement simple sans tenon-mortaise <i>oui</i>
▪ NATURE DES BOIS UTILISÉS	même nature pour tous les éléments <i>oui</i>
- Massif/reconstitué	résineux C18 à C30, feuillus D18 à D30 <i>C24 ok</i>
- Lamellé collé	résineux GL20 à GL30
▪ SECTIONS DES ÉLÉMENTS	
- Largeur maximale	180 mm pour l'arbalétrier et 200 mm pour l'entrait <i>120 et 140 ok</i>
- Hauteur maximale	300 mm <i>180 et 200 ok</i>
- h_{arb}	$\geq 0,6 \times h_{ent} + 10\text{ mm}$ <i>180 \geq 130 ok</i>
- b_{arb}	$\leq b_{ent}$ <i>180 \leq 200 ok</i>
▪ ANGLE ENTRAIT/ARBALETRIER	de 17° à 60° (soit 30% à 175%) <i>24° ok</i>
▪ GEOMETRIE D'ENTAILLE	entaille taillée à la bissectrice <i>oui</i>
▪ HAUTEUR DU TALON	
- Si α inférieur à 50°	$h_{tal} \leq h_{ent} / 4$ <i>à vérifier plus tard</i>
- Si α supérieur à 50°	$h_{tal} \leq h_{ent} / 6$
▪ LONGUEUR DU TALON	$150\text{ mm} \leq l_{tal} \leq 8 \times h_{tal}$ <i>à vérifier plus tard</i>
▪ CONDITIONS D'APPUI	appui proche de l'aplomb du nœud de l'assemblage ($d_{app} \leq h_{ent}$) <i>oui</i>
▪ EXECUTION	les zones sollicitées de l'assemblage doivent être exemptes de défauts rédhibitoires <i>oui</i>



Domaine de validité reproduit de la page 8 – Les annotations en écriture cursive montrent les vérifications effectuées

On note de vérifier lorsque la profondeur d'entaille et la longueur de talon auront été dimensionnées qu'elles satisfont bien les conditions du domaine de validité encadrées ci-dessus.

PRÉ-DIMENSIONNEMENT RAPIDE DE L'EMBRÈVEMENT

Supposons ici que nous n'avons pas proposé à l'avance de profondeur d'entaille et de longueur de talon. Nous allons utiliser pour les déterminer les formules du paragraphe « Pré-dimensionnement rapide » de la page 8, reproduites ci-dessous. Sont reproduits également ci-après les tableaux 1 et 2 de la page 9 nécessaires pour l'application des formules.

PRÉ-DIMENSIONNEMENT RAPIDE

$$\text{Longueur minimale du talon} \quad l_{tal} = 48,6 \times \frac{F \times \cos \alpha \times k_{maj}}{b_{arb} \times R_v} \quad [\text{mm}]$$

$$\text{Hauteur minimale du talon} \quad h_{tal} = 32,5 \times \frac{F \times \cos^2(\alpha/2)}{b_{arb} \times R_c} \quad [\text{mm}]$$

k_{maj} vaut 1,25 pour le bois lamellé et le bois massif reconstitué et 1,65 pour le bois massif.

Retrouvez les valeurs courantes de $\cos \alpha$, $\cos^2(\alpha/2)$, R_v et R_c dans les tableaux 1 et 2 ci-après.

Paragraphe « Pré-dimensionnement rapide » reproduit de la page 9 – Le cadre montre la valeur de k_{maj} à utiliser dans notre exemple

Tableau 1 – Résistance à la compression oblique fonction de l'angle α

α [°]	α [%]	$\cos \alpha$	$\cos^2(\alpha/2)$	R_c [MPa]		
				Massif/BMR Résineux	Massif/BMR Feuillus	Lamellé Résineux
17	30%	0,96	0,98	16,40	17,43	18,55
20	35%	0,94	0,97	15,87	17,22	18,06
25	45%	0,91	0,96	14,89	16,82	17,13
30	60%	0,87	0,93	13,66	16,26	15,94
35	70%	0,82	0,91	12,83	15,85	15,12
40	85%	0,77	0,88	11,76	15,27	14,03
45	100%	0,71	0,85	10,89	14,76	13,13
50	120%	0,64	0,82	9,99	14,17	12,18
55	140%	0,58	0,79	9,23	13,64	11,35
60	175%	0,50	0,75	8,48	13,06	10,53

Tableau 2
Résistance au cisaillement

Classe de bois	R_v [Mpa]
C18	3,4
C24	4
C30	4
D18	3,5
D24	3,7
D30	3,9
GL20h	3,5
GL24h	3,5
GL28h	3,5
GL30h	3,5

Tableaux 1 et 2 reproduits de la page 9 – Les cadres montrent les parties des tableaux à utiliser dans notre exemple

1. Déterminons la longueur du talon l_{tal}

La première formule du paragraphe « Pré-dimensionnement rapide » donne : $l_{tal} = 48,6 \times \frac{F \times \cos \alpha \times k_{maj}}{b_{arb} \times R_v}$

Avec : F Effort non pondéré sur l'embrèvement en daN, déterminé par le calcul manuel à 1 733 daN
 $\cos \alpha$ Donné approximativement par le tableau 1 à 0,91
 k_{maj} Coefficient majorateur égal à 1,65 pour le bois massif
 b_{arb} Largeur de l'arbalétrier égale à 120 mm
 R_v Donné par le tableau 2 à 4 MPa

$$\text{Ce qui donne :} \quad l_{tal} = 48,6 \times \frac{1733 \times 0,91 \times 1,65}{120 \times 4} = 263 \text{ mm}$$

2. Déterminons la hauteur du talon h_{tal}

La seconde formule du paragraphe « Pré-dimensionnement rapide » donne : $h_{tal} = 32,5 \times \frac{F \times \cos^2(\alpha/2)}{b_{arb} \times R_c}$

Avec : F Effort non pondéré sur l'embrèvement en daN, déterminé par le calcul manuel à 1 733 daN
 $\cos^2(\alpha/2)$ Donné approximativement par le tableau 1 à 0,96
 b_{arb} Largeur de l'arbalétrier égale à 120 mm
 R_v Donné par le tableau 2 à 14,89 MPa

$$\text{Ce qui donne :} \quad h_{tal} = 32,5 \times \frac{1733 \times 0,96}{120 \times 14,89} = 30 \text{ mm}$$

3. Vérifions la validité des solutions trouvées

Hypothèse 1: On choisit $l_{tal} = 270 \text{ mm}$ et $h_{tal} = 30 \text{ mm}$

On a : $h_{ent}/4 = 200/4 = 50 \text{ mm}$

Et : $h_{tal} = 30 \text{ mm}$

Donc : $h_{tal} \leq h_{ent}/4$ *La solution est valide*

On a : $8 \times h_{tal} = 8 \times 30 = 240 \text{ mm}$

Et : $l_{tal} = 270 \text{ mm}$

Donc : $l_{tal} \geq 8 \times h_{tal}$ *La solution n'est pas valide*

Hypothèse 2: On augmente la hauteur du talon pour avoir $l_{tal} = 270 \text{ mm}$ et $h_{tal} = 35 \text{ mm}$

On a : $h_{ent}/4 = 200/4 = 50 \text{ mm}$

Et : $h_{tal} = 35 \text{ mm}$

Donc : $h_{tal} \leq h_{ent}/4$ *La solution est valide*

On a : $8 \times h_{tal} = 8 \times 35 = 280 \text{ mm}$

Et : $l_{tal} = 270 \text{ mm}$

Donc : $l_{tal} \leq 8 \times h_{tal}$ *La solution est valide*

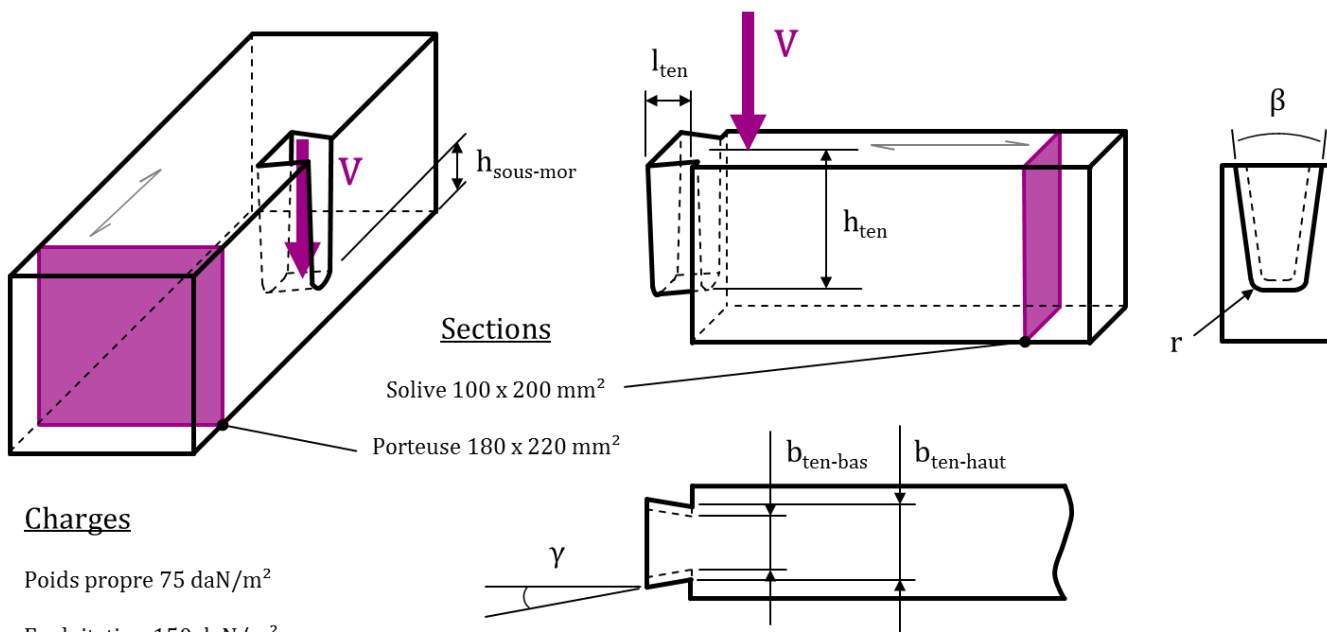
On peut donc dimensionner définitivement notre embrèvement avec $l_{tal} = 270 \text{ mm}$ et $h_{tal} = 35 \text{ mm}$

NOTE

En utilisant l'effort F pondéré déterminé par un logiciel et divisé par 1,5 (c'est-à-dire 1 648 daN), on aurait pu réaliser un embrèvement avec $l_{tal} = 250 \text{ mm}$ et $h_{tal} = 35 \text{ mm}$.

2.2. DIMENSIONNEMENT D'UNE QUEUE D'ARONDE EN PLANCHER

DONNÉES DE L'EXEMPLE



Charges

Poids propre 75 daN/m²

Exploitation 150 daN/m²

Portée des solives 4000 mm. Entraxe des solives 600 mm

Il s'agit d'un plancher en résineux massif C24 dont les solives de portée 4 m disposées à entraxe régulier de 60 cm. Les sections des éléments ont déjà été déterminées par ailleurs, et l'on cherche à dimensionner les queues d'arondes qui assemblent les solives aux porteuses.

DÉTERMINATION DE L'EFFORT APPLIQUÉ À L'ASSEMBLAGE

On cherche ici à déterminer l'effort axial V appliqué à l'assemblage par queue d'aronde.

CAS 1 – Détermination de l'effort à la main

1. On détermine l'effort F_{solive} appliqué à la solive

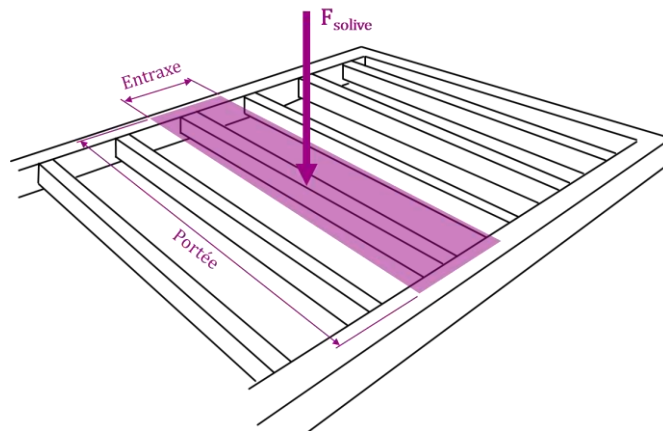
On somme tous les efforts appliqués à la solive sur sa bande de chargement (poids propre, charge d'exploitation).

Chaque solive supporte une bande de chargement de largeur égale à l'entraxe, et de longueur égale à la portée.

$$F_{solive} = (q_{poids} + q_{exploitation}) \times Entraxe \times Portée$$

$$F_{solive} = (750 \text{ N} + 1500 \text{ N}) \times 0,6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$$

$$F_{solive} = 5400 \text{ N} = 540 \text{ daN}$$



Bande de chargement de la solive

2. On en déduit l'effort V appliqué à l'assemblage

On suppose que l'effort F_{solive} s'applique au centre de la solive et est réparti équitablement entre les deux assemblages.

$$V = F_{solive}/2 = 540/2 = 270 \text{ daN}$$

Dans le cas du calcul à la main, l'effort non pondéré V appliqué à la queue d'aronde vaut 270 daN.

CAS 2 – Détermination de l'effort à l'aide d'un logiciel

1. On modélise la solive / le plancher dans un logiciel dédié au calcul de structure bois

Doivent à minima être renseignés dans le modèle informatisé : l'épure, les sections, le matériau, les charges

2. On lance un calcul de combinaisons de charges aux Eurocodes

RÉACTIONS NON PONDÉRÉES AUX APPUIS *									
RÉACTIONS : VERTICALES par type de charge									
Appui	Perm. Totale		Perm. Fragile		Neige		Expl. Plancher		Lg. Appui
	daN	daN/m	daN	daN/m	daN	daN/m	daN	daN/m	cm
1	90.0	150.0	20.4	34.0	0.0	0.0	180.0	300.0	2.00
2	90.0	150.0	20.4	34.0	0.0	0.0	180.0	300.0	2.00

* Réactions d'appuis pour descentes de charges sur la structure porteuse (Bois, Béton...)

Exemple de sortie d'un calcul de plancher à l'aide d'un logiciel – Les cadres montrent les efforts non pondérés à prendre en compte

3. On récupère directement les efforts calculés pour la combinaison la plus forte


On voit sur la figure ci-dessus que le logiciel présenté donne un effort non pondéré V appliqué à l'assemblage par queue d'aronde de $90 + 180 = 270$ daN.

Comme indiqué en introduction de la section « 1. Méthodes de dimensionnement simples » du présent guide, ainsi que dans toutes les pages de celle-ci, si l'on dispose des efforts non pondérés on peut les utiliser tels quels dans les formules.

VERIFICATION DE LA VALIDITE DES METHODES SIMPLES

Avant d'utiliser les méthodes simples présentées en pages 12 et 13 du présent guide, vérifions que notre configuration entre bien dans le domaine de validité de celles-ci. Le domaine de validité présenté en page 12 est reproduit ci-dessous :

DOMAINE DE VALIDITÉ DE LA MÉTHODE SIMPLE	
▪ TYPE DE QUEUE D'ARONDE	tenon centré sur sa largeur <i>oui</i>
▪ NATURE DES BOIS UTILISES	même nature pour tous les éléments <i>oui</i>
- Massif/reconstitué	résineux C18 à C30, feuillus D18 à D30 <i>C24 ok</i>
- Lamellé collé	résineux GL20 à GL30
▪ SECTIONS DES ELEMENTS	
- Largeur maximale	180 mm <i>100 et 180 ok</i>
- Hauteur maximale	240 mm <i>200 et 220 ok</i>
- Solive moins large que la poutre porteuse	<i>100 ≤ 180 ok</i>
▪ GEOMETRIE DE L'ASSEMBLAGE	
- Hauteur de bois sous la mortaise	$h_{\text{sous-mor}} \geq h_{\text{por}} / 4$
- Hauteur du tenon	$h_{\text{ten}} \geq 0,6 \times h_{\text{sol}}$ <i>à vérifier plus tard</i>
- Largeur du tenon	$b_{\text{ten-haut}} \geq 0,8 \times b_{\text{sol}}$ et $b_{\text{ten-bas}} \geq 0,75 \times b_{\text{sol}}$
- Longueur du tenon	$l_{\text{ten}} \geq 0,3 \times h_{\text{ten}}$ et $l_{\text{ten}} \geq 25$ mm et $l_{\text{ten}} \leq 80$ mm
- Rayon des congés du tenon	$10 \text{ mm} \leq r \leq 60 \text{ mm}$ <i>oui</i>
- Angle porteur/supporté	$45^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$ <i>oui</i>
- Angle des flancs de la queue d'aronde	$4^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$ <i>oui</i>
- Angle de taille de la queue d'aronde	$10^\circ \leq \gamma \leq 20^\circ$ <i>oui</i>
▪ EXECUTION	
- Les zones sollicitées de l'assemblage doivent être exemptes de défauts rédhibitoires	<i>oui</i>
- Il peut exister un jeu positif entre la partie inférieure du tenon et la mortaise	<i>oui</i>



Les méthodes présentées en page 13 ne sont valables que si le domaine de validité présenté ici est respecté

Domaine de validité reproduit de la page 12 – Les annotations en écriture cursive montrent les vérifications effectuées

On note de vérifier plus tard que la géométrie de l'assemblage (épaisseur de bois sous la mortaise, hauteur, largeur et longueur du tenon) satisfait bien les conditions du domaine de validité encadrés ci-avant.

DIMENSIONNEMENT SIMPLE DE L'EMBRÈVEMENT

Supposons ici que nous souhaitons proposer une géométrie d'assemblage pour la vérifier et éventuellement la corriger. C'est par exemple une géométrie que l'on a l'habitude de réaliser, ou qui convient bien aux machines dont l'on dispose... Dans cet objectif nous allons utiliser les formules du paragraphe « Dimensionnement simple » de la page 13, reproduites ci-dessous. Est reproduit également ci-dessous le tableau 4 de la page 13 nécessaire pour l'application des formules.

DIMENSIONNEMENT SIMPLE

1. Vérification du cisaillement du tenon : on doit avoir $R \geq C$

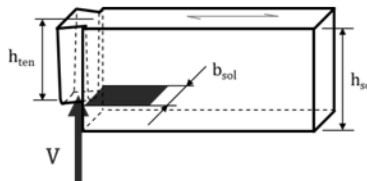
Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$C = 54,1 \times \frac{V \times h_{sol}}{b_{sol} \times h_{ten}^2}$$


Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$R = 0,46 \times R_v$$

Avec : R_v résistance caractéristique au cisaillement du bois utilisé [MPa]
à prendre dans le tableau 4 ci-après



La surface réellement sollicitée (en rose) est différente de celle utilisée pour le calcul ($b_{sol} \times h_{ten}$)



Dans toute la page V est l'effort non pondéré appliqué à l'assemblage.
Si vous disposez d'un effort V déjà pondéré, divisez-le par 1,5

2. Vérification du cisaillement de la mortaise : on doit avoir $R \geq C$

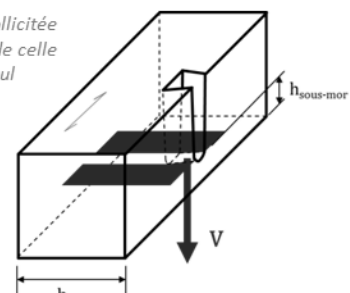
Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$C = 16,8 \times \frac{V}{b_{ef} \times h_{sous-mor}}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$R = 0,46 \times R_v$$

Avec : b_{ef} est la valeur la plus petite entre b_{por} [mm] et 100 [mm]
 R_v résistance caractéristique au cisaillement du bois utilisé [MPa]
à prendre dans le tableau 4 ci-après



La surface réellement sollicitée (en rose) est différente de celle utilisée pour le calcul ($b_{ef} \times h_{sous-mor}$)

Paragraphe « Dimensionnement simple » reproduit de la page 12

Tableau 4 – Résistance au cisaillement fonction de la classe de bois

Classe de bois	C18	C24	C30	D18	D24	D30	GL20h	GL24h	GL28h	GL30h
R_v [MPa]	3,4	4	4	3,5	3,7	3,9	3,5	3,5	3,5	3,5

Tableau 4 reproduit de la page 13 – Le cadre montre la valeur de R_v à utiliser dans notre exemple

1. Proposons une géométrie d'assemblage

Proposons une géométrie en ayant en tête les conditions à respecter pour être dans le domaine de validité des méthodes.

Hauteur du tenon

On doit avoir $h_{sous-mor} \geq h_{por}/4 = 220/4 = 55 \text{ mm}$ (1^{ère} condition restant à vérifier)

Autrement dit, l'épaisseur de bois sous-mortaise doit être supérieure à 55 mm.

Comme on a une porteuse de hauteur 220 mm, cela limite la hauteur de tenon à $220 - 55 = 165 \text{ mm}$

Proposons une hauteur de tenon $h_{ten} = 150 \text{ mm}$

Vérifions si l'on a $h_{ten} \geq 0,6 \times h_{sol}$ (2^{ème} condition restant à vérifier)

$0,6 \times h_{sol} = 0,6 \times 200 = 120 \text{ mm}$, la condition est bien vérifiée

Par conséquent on peut choisir une hauteur de tenon $h_{ten} = 150 \text{ mm}$

Largeur du tenon

On doit avoir $b_{ten-haut} \geq 0,8 \times b_{sol} = 0,8 \times 100 = 80 \text{ mm}$ (3^{ème} condition restant à vérifier)

Prenons une largeur du tenon en partie supérieure $b_{ten-haut} = 90 \text{ mm}$

Si l'on choisit un angle de taillage des flancs de la queue d'aronde $\beta = 5^\circ$

On aura une largeur de tenon en partie inférieure $b_{ten-bas} = 90 - 150 \times \tan 5^\circ = 90 - 13 = 77 \text{ mm}$

On a bien $b_{ten-bas} \geq 0,75 \times b_{sol} = 0,75 \times 100 = 75 \text{ mm}$ (4^{ème} condition restant à vérifier)

Longueur du tenon

Supposons une longueur de tenon (ou profondeur de mortaise) $l_{ten} = 45 \text{ mm}$

On a bien : $l_{ten} \geq 0,3 \times h_{ten} = 0,3 \times 150 = 45 \text{ mm}$ (5^{ème} condition restant à vérifier)

$l_{ten} \geq 20 \text{ mm}$ (6^{ème} condition restant à vérifier)

$l_{ten} \leq 80 \text{ mm}$ (7^{ème} condition restant à vérifier)

2. Vérifions la résistance en cisaillement du tenon

Calcul de la contrainte de cisaillement du tenon : $C = 54,1 \times \frac{V \times h_{sol}}{b_{sol} \times h_{ten}^2} = 54,1 \times \frac{270 \times 200}{100 \times 150^2} = 1,30 \text{ MPa}$

Calcul de la résistance au cisaillement du tenon : $R = 0,46 \times R_v = 0,46 \times 4 = 1,84 \text{ MPa}$

On a bien : $R \geq C$ la résistance au cisaillement du tenon est vérifiée

3. Vérifions la résistance en cisaillement de la mortaise

Calcul de la contrainte de cisaillement de la mortaise : $C = 16,8 \times \frac{V}{b_{ef} \times h_{sous-mor}}$

Avec : b_{ef} la plus petite valeur entre b_{por} et 100 mm, or $b_{por} = 180 \text{ mm}$ donc $b_{ef} = 100 \text{ mm}$

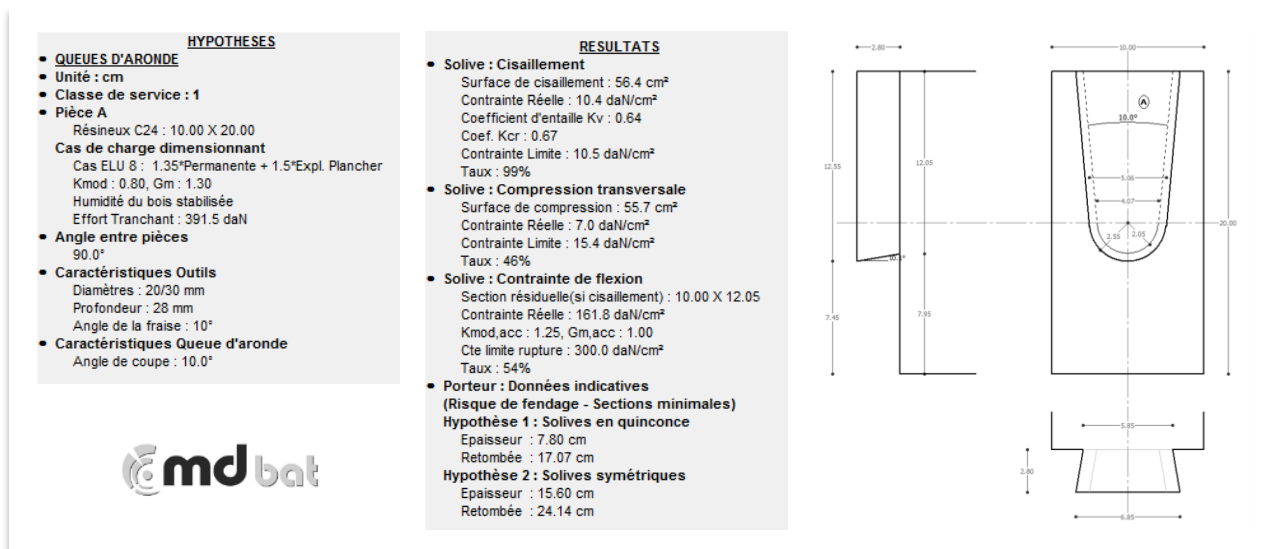
Et : $h_{sous-mor} = h_{por} - h_{ten} = 220 - 150 = 70 \text{ mm}$

Donc : $C = 16,8 \times \frac{270}{100 \times 70} = 0,65 \text{ MPa}$

Calcul de la résistance au cisaillement de la mortaise : $R = 0,46 \times R_v = 0,46 \times 4 = 1,84 \text{ MPa}$

On a bien : $R \geq C$ la résistance au cisaillement de la mortaise est vérifiée

La géométrie d'assemblage proposée est par conséquent valide et vérifiée.



TABLEAUX DE VALEURS BASÉS SUR LES MÉTHODES SIMPLES

INTRODUCTION

Les tableaux de valeurs présentés dans la section ci-après ont pour objectif de faciliter l'application des méthodes simples présentées plus tôt dans le présent guide.

Ainsi **ces tableaux ne sont valides que dans les limites des domaines de validité définis pour chaque technique d'assemblage dans la section « 1. Méthodes de dimensionnement simple » du présent document, et pour des structures bois couvertes (classes de service 1 et 2). Il est recommandé de lire cette section avant toute utilisation des tableaux de valeurs ci-après.** En cas de non-respect du domaine de validité, consulter la section « 4. Méthode de dimensionnement avancées ».

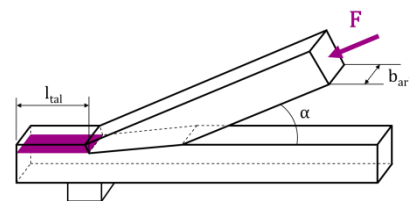
Pour chaque technique d'assemblage, et pour chaque mode de rupture à vérifier dans le cas d'utilisation des méthodes simples, un tableau donne l'effort maximal exprimé en Newtons et ramené à une unité de longueur ou de surface selon le cas. Cet effort maximal est donné en fonction du type et de la classe des bois utilisés, et éventuellement d'autres paramètres (pente de la toiture pour l'embranchement...). **Afin de valider un assemblage, tous les modes de rupture doivent être vérifiés.** Un exemple d'utilisation est présenté pour chaque tableau.

Les efforts mentionnés dans toute cette section sont des efforts réels. Ils sont issus directement de la descente de charges réelles appliquées sur la structure, **sans besoin de les pondérer par des coefficients complémentaires.** Les coefficients de sécurité sont déjà inclus dans les formules présentées. **Si vous ne disposez pas des efforts réels appliqués à votre structure mais uniquement des efforts pondérés,** divisez-les par 1,5 pour pouvoir utiliser les tableaux de cette section.

3.1. EMBREVEMENT SIMPLE EN CHARPENTE

CISAILLEMENT DU TALON

Afin de déterminer l'effort maximal non pondéré (F en Newtons) relatif au cisaillement du talon d'un embrèvement, on doit multiplier la valeur donnée par le tableau ci-dessous par la longueur du talon (l_{tal} en mm) et la largeur de l'arbalétrier (b_{arb} en mm). Si l'on veut déterminer cet effort en kg ou en daN, on divise ensuite le résultat par 10.



α	Massif résineux			Massif feuillus			Reconstitué résineux			Reconstitué feuillus			Lamellé collé résineux			
	C18	C24	C30	D18	D24	D30	C18	C24	C30	D18	D24	D30	GL20h	GL24h	GL28h	GL30h
17°	0,44	0,52	0,52	0,46	0,48	0,51	0,59	0,69	0,69	0,60	0,64	0,67	0,60	0,60	0,60	0,60
20°	0,45	0,53	0,53	0,47	0,49	0,52	0,60	0,70	0,70	0,61	0,65	0,68	0,61	0,61	0,61	0,61
25°	0,47	0,55	0,55	0,48	0,51	0,54	0,62	0,73	0,73	0,64	0,67	0,71	0,64	0,64	0,64	0,64
30°	0,49	0,58	0,58	0,50	0,53	0,56	0,65	0,76	0,76	0,67	0,70	0,74	0,67	0,67	0,67	0,67
35°	0,52	0,61	0,61	0,53	0,56	0,59	0,68	0,81	0,81	0,70	0,74	0,79	0,70	0,70	0,70	0,70
40°	0,55	0,65	0,65	0,57	0,60	0,64	0,73	0,86	0,86	0,75	0,80	0,84	0,75	0,75	0,75	0,75
45°	0,60	0,71	0,71	0,62	0,65	0,69	0,79	0,93	0,93	0,82	0,86	0,91	0,82	0,82	0,82	0,82
50°	0,66	0,78	0,78	0,68	0,72	0,76	0,87	1,03	1,03	0,90	0,95	1,00	0,90	0,90	0,90	0,90
55°	0,74	0,87	0,87	0,76	0,81	0,85	0,98	1,15	1,15	1,01	1,06	1,12	1,01	1,01	1,01	1,01
60°	0,85	1,00	1,00	0,87	0,92	0,97	1,12	1,32	1,32	1,15	1,22	1,29	1,15	1,15	1,15	1,15

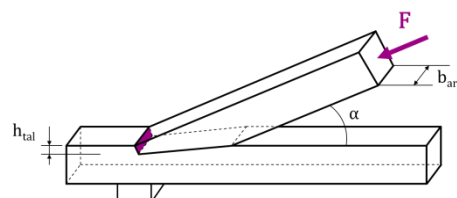
Tableau 6 – Effort maximal dans un embrèvement par millimètre carré de surface de talon cisailée (en N/mm²)

Exemple d'utilisation pour un embrèvement en C24 avec une pente de 35°, une longueur de talon de 20 cm et un arbalétrier en 10x15 :

Effort maximal dans l'embrèvement pour assurer la résistance en cisaillement de l'about : $F = 0,61 \times 200 \times 100 = 12\,200$ Newtons soit 1 220 daN

COMPRESSION OBLIQUE DE L'ABOUT

Afin de déterminer l'effort maximal non pondéré (F en Newtons) relatif à la compression oblique de l'about d'un embrèvement, on doit multiplier la valeur donnée par le tableau ci-dessous par la hauteur du talon (h_{tal} en mm) et la largeur de l'arbalétrier (b_{arb} en mm). Si l'on veut déterminer cet effort en kg ou en daN, on divise ensuite le résultat par 10.



α	Massif résineux			Massif feuillus			Reconstitué résineux			Reconstitué feuillus			Lamellé collé résineux			
	C18	C24	C30	D18	D24	D30	C18	C24	C30	D18	D24	D30	GL20h	GL24h	GL28h	GL30h
17°	5,16	6,00	6,56	5,48	6,35	6,95	5,24	6,10	6,67	5,52	6,40	7,01	5,84	6,88	7,88	8,37
20°	5,03	5,85	6,39	5,46	6,31	6,90	5,14	5,98	6,53	5,52	6,38	6,99	5,73	6,71	7,64	8,09
25°	4,81	5,58	6,09	5,43	6,24	6,82	4,96	5,75	6,29	5,52	6,35	6,94	5,53	6,40	7,21	7,60
30°	4,57	5,29	5,77	5,39	6,16	6,73	4,76	5,52	6,02	5,51	6,31	6,90	5,32	6,09	6,78	7,11
35°	4,34	5,02	5,47	5,36	6,08	6,64	4,57	5,29	5,76	5,52	6,28	6,86	5,11	5,78	6,36	6,63
40°	4,12	4,76	5,18	5,34	6,01	6,56	4,39	5,07	5,52	5,53	6,26	6,83	4,92	5,48	5,98	6,20
45°	3,93	4,52	4,92	5,32	5,95	6,49	4,22	4,86	5,29	5,56	6,24	6,81	4,73	5,22	5,64	5,82
50°	3,76	4,32	4,69	5,32	5,91	6,44	4,07	4,69	5,10	5,60	6,25	6,81	4,57	4,99	5,34	5,49
55°	3,61	4,15	4,50	5,33	5,88	6,41	3,95	4,54	4,93	5,66	6,27	6,84	4,44	4,80	5,09	5,22
60°	3,49	4,01	4,35	5,37	5,88	6,40	3,85	4,42	4,80	5,74	6,32	6,89	4,33	4,64	4,89	4,99

Tableau 7 – Effort maximal dans un embrèvement par millimètre carré de surface d'about comprimée (en N/mm²)

Exemple d'utilisation pour un embrèvement en C24 avec une pente de 35°, une hauteur de talon de 4 cm et un arbalétrier en 10x15 :

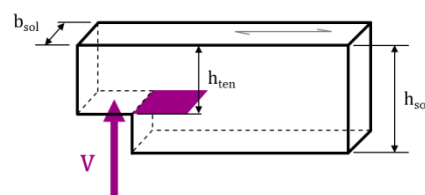
Effort maximal dans l'embrèvement pour assurer la résistance en compression oblique de l'about : $F = 5,02 \times 40 \times 100 = 20\,080$ Newtons soit 2 008 daN



3.2. TENON-MORTAISE EN PLANCHER

CISAILLEMENT DU TENON

Afin de déterminer l'effort tranchant maximal non pondéré (V en Newtons) relatif au cisaillement du tenon d'un tenon-mortaise en plancher, on doit multiplier la valeur donnée par le tableau ci-dessous par la largeur de la solive (b_{sol} en mm) et la hauteur du tenon (h_{ten} en mm). Si l'on veut déterminer cet effort en kg ou en daN, on divise ensuite le résultat par 10.



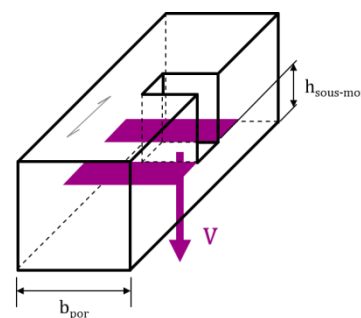
$\frac{h_{ten}}{h_{sol}}$	Massif résineux			Massif feuillus			Reconstitué résineux			Reconstitué feuillus			Lamellé collé résineux			
	C18	C24	C30	D18	D24	D30	C18	C24	C30	D18	D24	D30	GL20h	GL24h	GL28h	GL30h
0,33	0,12	0,14	0,14	0,12	0,13	0,14	0,12	0,14	0,14	0,12	0,13	0,14	0,12	0,12	0,12	0,12
0,40	0,14	0,17	0,17	0,15	0,16	0,17	0,14	0,17	0,17	0,15	0,16	0,17	0,15	0,15	0,15	0,15
0,50	0,18	0,21	0,21	0,19	0,20	0,21	0,18	0,21	0,21	0,19	0,20	0,21	0,19	0,19	0,19	0,19
0,60	0,22	0,26	0,26	0,22	0,24	0,25	0,22	0,26	0,26	0,22	0,24	0,25	0,22	0,22	0,22	0,22
0,66	0,24	0,28	0,28	0,25	0,26	0,27	0,24	0,28	0,28	0,25	0,26	0,27	0,25	0,25	0,25	0,25
0,70	0,25	0,30	0,30	0,26	0,28	0,29	0,25	0,30	0,30	0,26	0,28	0,29	0,26	0,26	0,26	0,26
0,75	0,27	0,32	0,32	0,28	0,30	0,31	0,27	0,32	0,32	0,28	0,30	0,31	0,28	0,28	0,28	0,28
0,80	0,29	0,34	0,34	0,30	0,32	0,33	0,29	0,34	0,34	0,30	0,32	0,33	0,30	0,30	0,30	0,30
0,90	0,33	0,38	0,38	0,34	0,35	0,37	0,33	0,38	0,38	0,34	0,35	0,37	0,34	0,34	0,34	0,34
1,00	0,36	0,43	0,43	0,37	0,39	0,42	0,36	0,43	0,43	0,37	0,39	0,42	0,37	0,37	0,37	0,37

Tableau 8 – Effort maximal dans un tenon-mortaise en plancher par millimètre carré de surface de tenon cisailée (en N/mm²)

Exemple d'utilisation pour un tenon-mortaise en plancher en C24 avec une solive en 10x15, et un tenon toute largeur de 7,5 cm de haut :
 $h_{ten}/h_{sol} = 7,5/15 = 0,5$ d'où un effort tranchant maximal dans le tenon-mortaise pour assurer la résistance en cisaillement du tenon :
 $V = 0,21 \times 100 \times 75 = 1\,575$ Newtons soit 158 daN

CISAILLEMENT DE LA MORTAISE

Afin de déterminer l'effort tranchant maximal non pondéré (V en Newtons) relatif au cisaillement du tenon d'un tenon-mortaise en plancher, on doit multiplier la valeur donnée par le tableau ci-dessous par la largeur de la poutre porteuse (b_{por} en mm) et l'épaisseur de bois sous mortaise ($h_{sous-mor}$ en mm). Si l'on veut déterminer cet effort en kg ou en daN, on divise ensuite le résultat par 10.



Massif résineux			Massif feuillus			Reconstitué résineux			Reconstitué feuillus			Lamellé collé résineux			
C18	C24	C30	D18	D24	D30	C18	C24	C30	D18	D24	D30	GL20h	GL24h	GL28h	GL30h
0,93	1,10	1,10	0,96	1,02	1,07	0,93	1,10	1,10	0,96	1,02	1,07	0,96	0,96	0,96	0,96

Tableau 9 – Effort maximal dans un tenon-mortaise en plancher par millimètre carré de surface de mortaise cisailée (en N/mm²)

Exemple d'utilisation pour un tenon-mortaise en plancher en C24 avec une poutre porteuse en 20x24, et une épaisseur de bois sous-mortaise de 6 cm :
 Effort tranchant maximal dans le tenon-mortaise pour assurer la résistance en cisaillement de la mortaise :
 $V = 1,10 \times 200 \times 60 = 13\,200$ Newtons soit 1 320 daN

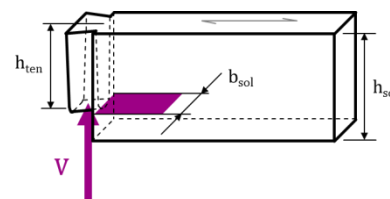


Les tableaux présentés sur cette page ne sont utilisables que si le domaine de validité présenté en page 10 est respecté

3.3. QUEUE D'ARONDE EN PLANCHER

CISAILLEMENT DU TENON

Afin de déterminer l'effort tranchant maximal non pondéré (V en Newtons) relatif au cisaillement du tenon d'une queue d'aronde en plancher, on doit multiplier la valeur donnée par le tableau ci-dessous par la largeur de la solive (b_{sol} en mm) et la hauteur du tenon (h_{ten} en mm). Si l'on veut déterminer cet effort en kg ou en daN, on divise ensuite le résultat par 10.



$\frac{h_{ten}}{h_{sol}}$	Massif résineux			Massif feuillus			Reconstitué résineux			Reconstitué feuillus			Lamellé collé résineux			
	C18	C24	C30	D18	D24	D30	C18	C24	C30	D18	D24	D30	GL20h	GL24h	GL28h	GL30h
0,60	0,17	0,20	0,20	0,18	0,19	0,20	0,17	0,20	0,20	0,18	0,19	0,20	0,18	0,18	0,18	0,18
0,65	0,19	0,22	0,22	0,19	0,21	0,22	0,19	0,22	0,22	0,19	0,21	0,22	0,19	0,19	0,19	0,19
0,70	0,20	0,24	0,24	0,21	0,22	0,23	0,20	0,24	0,24	0,21	0,22	0,23	0,21	0,21	0,21	0,21
0,75	0,22	0,26	0,26	0,22	0,24	0,25	0,22	0,26	0,26	0,22	0,24	0,25	0,22	0,22	0,22	0,22
0,80	0,23	0,27	0,27	0,24	0,25	0,27	0,23	0,27	0,27	0,24	0,25	0,27	0,24	0,24	0,24	0,24
0,85	0,25	0,29	0,29	0,25	0,27	0,28	0,25	0,29	0,29	0,25	0,27	0,28	0,25	0,25	0,25	0,25
0,90	0,26	0,31	0,31	0,27	0,28	0,30	0,26	0,31	0,31	0,27	0,28	0,30	0,27	0,27	0,27	0,27
0,95	0,28	0,32	0,32	0,28	0,30	0,32	0,28	0,32	0,32	0,28	0,30	0,32	0,28	0,28	0,28	0,28
1,00	0,29	0,34	0,34	0,30	0,32	0,33	0,29	0,34	0,34	0,30	0,32	0,33	0,30	0,30	0,30	0,30

Tableau 10 – Effort maximal dans une queue d'aronde en plancher par millimètre carré de surface de tenon cisailée (en N/mm²)

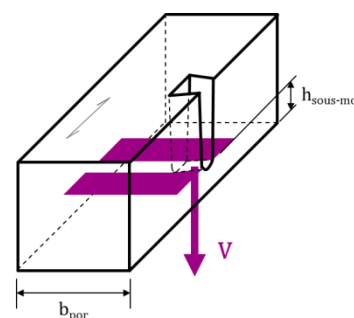
Exemple d'utilisation pour une queue d'aronde en plancher en C24 avec une solive en 10x15, et un tenon de 12 cm de haut :

$h_{ten}/h_{sol} = 12/15 = 0,8$ d'où un effort maximal dans la queue d'aronde pour assurer la résistance en cisaillement du tenon :

$V = 0,27 \times 100 \times 120 = 3\,240$ Newtons soit 324 daN

CISAILLEMENT DE LA MORTAISE

Afin de déterminer l'effort tranchant maximal non pondéré (V en Newtons) relatif au cisaillement du tenon d'une queue d'aronde en plancher, on doit multiplier la valeur donnée par le tableau ci-dessous par la largeur de la poutre porteuse (b_{por} en mm) et l'épaisseur de bois sous mortaise ($h_{sous-mor}$ en mm). Si l'on veut déterminer cet effort en kg ou en daN, on divise ensuite le résultat par 10.



Massif résineux			Massif feuillus			Reconstitué résineux			Reconstitué feuillus			Lamellé collé résineux			
C18	C24	C30	D18	D24	D30	C18	C24	C30	D18	D24	D30	GL20h	GL24h	GL28h	GL30h
0,93	1,10	1,10	0,96	1,02	1,07	0,93	1,10	1,10	0,96	1,02	1,07	0,96	0,96	0,96	0,96

Tableau 11 – Effort maximal dans une queue d'aronde en plancher par millimètre carré de surface de mortaise cisailée (en N/mm²)

Exemple d'utilisation pour une queue d'aronde en plancher en C24 avec une poutre porteuse en 10x18, et une épaisseur de bois sous-mortaise de 5 cm :

Effort maximal dans la queue d'aronde pour assurer la résistance en cisaillement de la mortaise : $V = 1,10 \times 100 \times 50 = 5\,500$ Newtons soit 550 daN

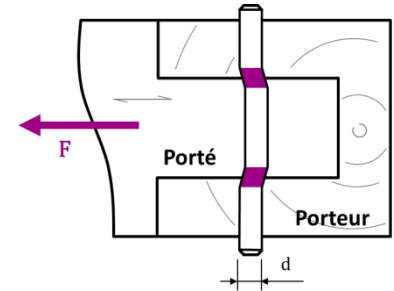


Les tableaux présentés sur cette page ne sont utilisables que si le domaine de validité présenté en page 12 est respecté

3.4. CHEVILLE EN DOUBLE CISAILLEMENT

CISAILLEMENT DES CHEVILLES

Afin de déterminer l'effort de traction maximal non pondéré (F en Newtons) relatif au double cisaillement des chevilles d'un assemblage tenon-mortaise chevillé, on lit directement la valeur donnée par le tableau ci-dessous en fonction du nombre des chevilles (n), et du diamètre de celles-ci (d en mm). Si l'on veut déterminer cet effort en kg ou en daN, on divise ensuite le résultat par 10.



n	d = 14	d = 16	d = 18	d = 20	d = 22	d = 24	d = 26	d = 28	d = 30
1	590	770	970	1200	1450	1730	2030	2350	2700
2	1180	1540	1940	2400	2900	3460	4060	4700	5400

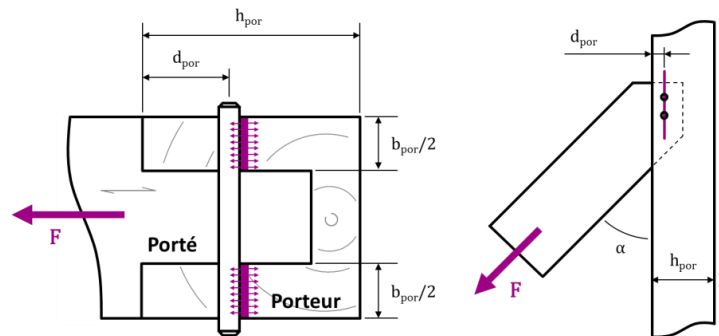
Tableau 12 - Effort maximal vis-à-vis du cisaillement des chevilles d'un assemblage chevillé (en N)

Exemple d'application pour un assemblage tenon-mortaise avec 2 chevilles de diamètre 20 mm

Effort maximal dans l'assemblage pour assurer la résistance au cisaillement des chevilles : $F = 2\,400$ Newtons soit 240 daN

TRACTION TRANSVERSALE DU PORTEUR

Afin de déterminer l'effort de traction maximal non pondéré (F en Newtons) relatif à la traction transversale du porteur d'un assemblage tenon-mortaise chevillé, on doit multiplier la valeur donnée par le tableau ci-dessous par la largeur du porteur réduite de celle du tenon (b_{por} en mm). Si l'on veut déterminer cet effort en kg ou en daN, on divise ensuite le résultat par 10.



α	$\frac{d_{por}}{h_{por}} = 0,1$	$\frac{d_{por}}{h_{por}} = 0,2$	$\frac{d_{por}}{h_{por}} = 0,3$	$\frac{d_{por}}{h_{por}} = 0,4$	$\frac{d_{por}}{h_{por}} = 0,5$	$\frac{d_{por}}{h_{por}} = 0,6$	$\frac{d_{por}}{h_{por}} = 0,7$	$\frac{d_{por}}{h_{por}} = 0,8$	$\frac{d_{por}}{h_{por}} = 0,9$
10°	49,5	99,1	148,6	198,1	247,6	297,2	346,7	396,2	445,7
20°	25,1	50,3	75,4	100,6	125,7	150,9	176,0	201,2	226,3
30°	17,2	34,4	51,6	68,8	86,0	103,2	120,4	137,6	154,8
40°	13,4	26,8	40,1	53,5	66,9	80,3	93,7	107,0	120,4
50°	11,2	22,5	33,7	44,9	56,1	67,4	78,6	89,8	101,0
60°	9,9	19,9	29,8	39,7	49,7	59,6	69,5	79,4	89,4
70°	9,2	18,3	27,5	36,6	45,8	54,9	64,1	73,2	82,4
80°	8,7	17,5	26,2	34,9	43,7	52,4	61,1	69,9	78,6
90°	8,6	17,2	25,8	34,4	43,0	51,6	60,2	68,8	77,4

Tableau 13 - Effort maximal vis-à-vis de la traction transversale d'un assemblage chevillé par millimètre de porteur (en N/mm²)

Exemple d'application pour un assemblage tenon-mortaise chevillé avec un porteur en 200 x 200, un tenon de 40 mm d'épaisseur et une distance au bord du porteur de 50 mm. La largeur du porteur réduite de celle du tenon est donc égale à (200 - 40) soit 160 mm. L'angle entre les deux éléments est de 60°.

On a ici : $\frac{d_{por}}{h_{por}} = \frac{50}{200} = 0,25$ par conséquent on utilisera la moyenne des valeurs données par le tableau pour $\frac{d_{por}}{h_{por}} = 0,20$ et $\frac{d_{por}}{h_{por}} = 0,30$

Cette moyenne vaut : $\frac{(19,9+29,8)}{2} = 24,85$ N/mm²

Effort maximal dans l'assemblage pour assurer la résistance à la traction transversale du porteur : $F = 24,85 \times 160 = 3\,976$ Newtons soit 398 daN



Les tableaux présentés sur cette page ne sont utilisables que si le domaine de validité présenté en page 14 est respecté

MÉTHODES DE DIMENSIONNEMENT AVANCÉES

INTRODUCTION

Les méthodes avancées présentées dans la section ci-après ont pour objectif de permettre un dimensionnement à froid optimisé des assemblages traditionnels de structures bois, 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).**

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

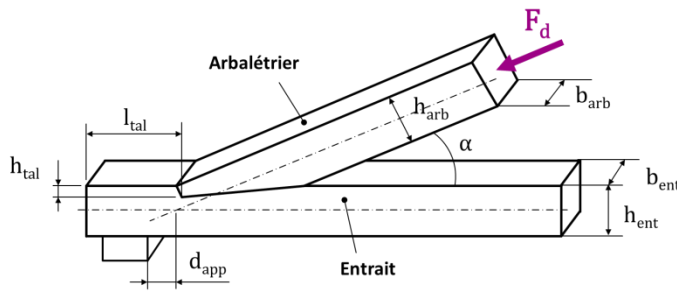
Le paragraphe « **Domaine de validité** » donne les exigences (pour la plupart géométriques) à respecter afin de pouvoir utiliser les méthodes de dimensionnement présentées. Des indications sont données en cas de non-respect strict du domaine de validité, mais le praticien est seul responsable de la 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. Ce paragraphe permet également le calcul du module de glissement de l'assemblage pour intégration dans un modèle de calcul. Une application numérique est donnée pour chaque formule présentée.

Les efforts mentionnés dans toute cette section sont des efforts de calcul. Ils sont à déterminer par combinaisons pondérées des efforts appliqués à la structure conformément aux principes de l'Eurocode 0.

4.1. 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'EMBRÈVEMENT : embrèvement simple sans tenon-mortaise
- NATURE DES BOIS UTILISÉS : bois classés mécaniquement, même nature pour tous les éléments
- SECTIONS DES ÉLÉMENTS
 - 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 réducteurs

DIMENSIONNEMENT AVANCÉ

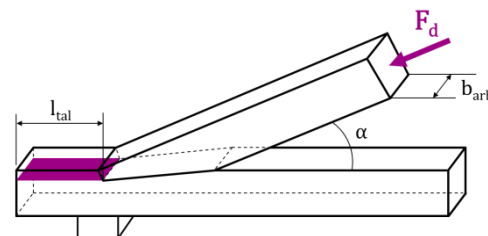
1. Vérification du cisaillement du talon : $f_{v,d} \geq \tau_d$

Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$\tau_d = \frac{F_d \times \cos \alpha \times k_{maj}}{b_{arb} \times k_{cr} \times l_{tal}}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$



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)
- k_{mod} coefficient de modification relatif à la durée de chargement et l'humidité
à prendre dans l'Eurocode 5 (§ 3.1.3)
- γ_M coefficient partiel pour les propriétés des matériaux
à prendre dans l'Eurocode 5 et son Annexe Nationale (§ 2.4.1)

Application Numérique :

Pour un entrait de section 160 x 160 et un arbalétrier de section 100 x 200 en résineux massif C24, en classe de service 2

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

Et un effort de calcul de 15 000 N issu de la combinaison 1,35 G

$$\tau_d = \frac{F_d \times \cos \alpha \times k_{maj}}{b_{arb} \times k_{cr} \times l_{tal}} = \frac{15\,000 \times 0,82 \times 1,65}{100 \times 0,67 \times 200} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = f_{v,k} \times k_{cr} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 4 \times \frac{0,6}{1,3} = 1,85 \text{ MPa}$$

D'où un taux de travail de $1,01/1,24 = 82\%$

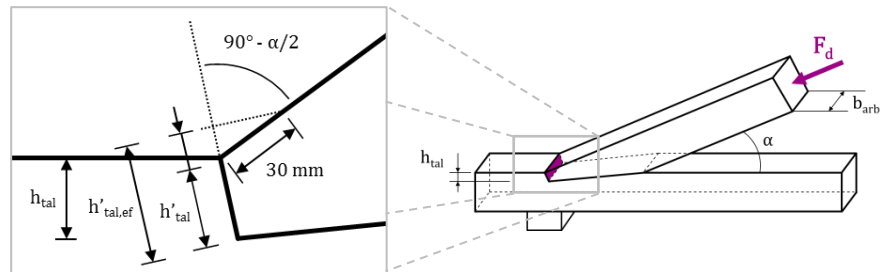
2. Vérification de la compression oblique l'about (côté arbalétrier) : $f_{c,\frac{\alpha}{2},d} \geq \sigma_{c,\frac{\alpha}{2},d}$

Calcul de la contrainte de compression [MPa]

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

Calcul de la résistance en compression [Mpa]

$$f_{c,\frac{\alpha}{2},d} = f_{c,\frac{\alpha}{2},k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$



Avec : $h'_{tal,ef}$ longueur efficace de compression oblique de l'about côté arbalétrier [mm]

$$h'_{tal,ef} = h'_{tal} + \min[30 \times \sin(\alpha/2); h'_{tal}] = \frac{h_{tal}}{\cos(\alpha/2)} + \min\left[30 \times \sin(\alpha/2); \frac{h_{tal}}{\cos(\alpha/2)}\right]$$

$f_{c,\frac{\alpha}{2},k}$ résistance caractéristique en compression oblique du bois utilisé à un angle de $\alpha/2$ [MPa]

$$f_{c,\frac{\alpha}{2},k} = \frac{f_{c,0,k} \times f_{c,90,k} \times k_{c,90}}{f_{c,0,k} \times \sin^2(\alpha/2) + k_{c,90} \times f_{c,90,k} \times \cos^2(\alpha/2)} \quad (\text{formule 6.16 de l'Eurocode 5 adaptée})$$

$f_{c,0,k}$ 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)

k_{mod} coefficient de modification relatif à la durée de chargement et l'humidité
à prendre dans l'Eurocode 5 (§ 3.1.3)

γ_M coefficient partiel pour les propriétés des matériaux
à prendre dans l'Eurocode 5 et son Annexe Nationale (§ 2.4.1)

Application Numérique :

Dans le même cas que l'application numérique précédente

$$h'_{tal,ef} = \frac{h_{tal}}{\cos(\alpha/2)} + \min\left[30 \times \sin(\alpha/2); \frac{h_{tal}}{\cos(\alpha/2)}\right] = \frac{40}{0,95} + \min\left[30 \times 0,3; \frac{40}{0,95}\right] = 42,1 + \min[9; 42,1] = 51,1 \text{ mm}$$

$$f_{c,\frac{\alpha}{2},k} = \frac{f_{c,0,k} \times f_{c,90,k} \times k_{c,90}}{f_{c,0,k} \times \sin^2(\alpha/2) + k_{c,90} \times f_{c,90,k} \times \cos^2(\alpha/2)} = \frac{21 \times 2,5 \times 1,5}{21 \times 0,09 + 1,5 \times 2,5 \times 0,91} = 14,85 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,\frac{\alpha}{2},d} = \frac{F_d \times \cos(\alpha/2)}{b_{arb} \times h'_{tal,ef}} = \frac{15\,000 \times 0,95}{100 \times 51,1} = 2,79 \text{ MPa}$$

$$f_{c,\frac{\alpha}{2},d} = f_{c,\frac{\alpha}{2},k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 14,85 \times \frac{0,6}{1,3} = 6,85 \text{ MPa}$$

D'où un taux de travail de $2,78/6,85 = 41\%$

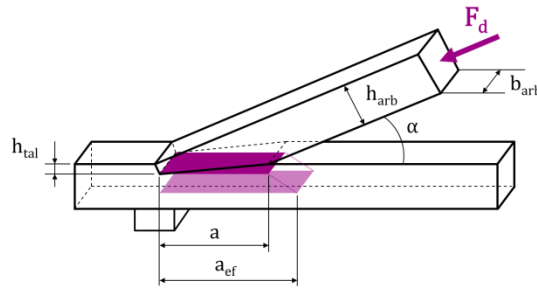
3. Vérification de la compression transversale de l'entrait : $k_{c,90} \times f_{c,90,d} \geq \sigma_{c,90,d}$

Calcul de la contrainte de compression [MPa]

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_d \times \sin \alpha}{b_{arb} \times a_{ef}}$$

Calcul de la résistance en compression [Mpa]

$$k_{c,90} \times f_{c,90,d} = k_{c,90} \times f_{c,90,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$



Avec : a_{ef} longueur efficace de compression transversale de l'entrait [mm]

$$a_{ef} = a + \min[30; a]$$

a longueur de compression transversale de l'entrait [mm]

$$a = \frac{h_{arb}}{\sin \alpha} - h_{tal} \times \cos(\alpha/2)$$

$k_{c,90}$ 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)

$f_{c,90,k}$ résistance caractéristique à la compression transversale du bois utilisé pour l'entrait [MPa] à prendre dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080)

k_{mod} coefficient de modification relatif à la durée de chargement et l'humidité à prendre dans l'Eurocode 5 (§ 3.1.3)

γ_M coefficient partiel pour les propriétés des matériaux à prendre dans l'Eurocode 5 et son Annexe Nationale (§ 2.4.1)

Application Numérique :

Dans le même cas que l'application numérique précédente

$$a = \frac{h_{arb}}{\sin \alpha} - h_{tal} \times \cos(\alpha/2) = \frac{200}{0,57} - 40 \times 0,95 = 313 \text{ mm}$$

$$a_{ef} = a + \min[30; a] = 312,9 + 30 = 343 \text{ mm}$$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_d \times \sin \alpha}{b_{arb} \times a_{ef}} = \frac{15\,000 \times 0,57}{100 \times 343} = 0,25 \text{ MPa}$$

$$k_{c,90} \times f_{c,90,d} = k_{c,90} \times f_{c,90,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 1,5 \times 2,5 \times \frac{0,6}{1,3} = 1,73 \text{ MPa}$$

D'où un taux de travail de $0,25/1,73 = 14\%$

4. Calcul du module de glissement de l'assemblage : k_{ser}

Module de glissement de l'assemblage [N/mm]

$$k_{ser} = \frac{1}{2} \times \frac{b_{arb} \times h'_{tal}}{l_{tal}} \times E_{\alpha,mean}$$

Avec : h'_{tal} longueur de compression oblique de l'about côté arbalétrier [mm]

$$h'_{tal} = \frac{h_{tal}}{\cos(\alpha/2)}$$

$E_{\alpha/2,mean}$ module moyen d'élasticité en compression oblique du bois utilisé à un angle de $\alpha/2$ [MPa]

$$E_{\alpha/2,mean} = \frac{E_{0,mean} \times E_{90,mean}}{E_{0,mean} \times \sin^2(\alpha/2) + E_{90,mean} \times \cos^2(\alpha/2)} \quad (\text{formule 6.16 de l'Eurocode 5 adaptée})$$

$E_{0,mean}$ module moyen d'élasticité axiale du bois utilisé [MPa] à prendre dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080)

$E_{90,mean}$ module moyen d'élasticité transversale du bois utilisé [MPa] à prendre dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080)

Application Numérique :

Dans le même cas que l'application numérique précédente

$$h'_{tal} = \frac{h_{tal}}{\cos(\alpha/2)} = \frac{40}{0,95} = 42,1 \text{ mm}$$

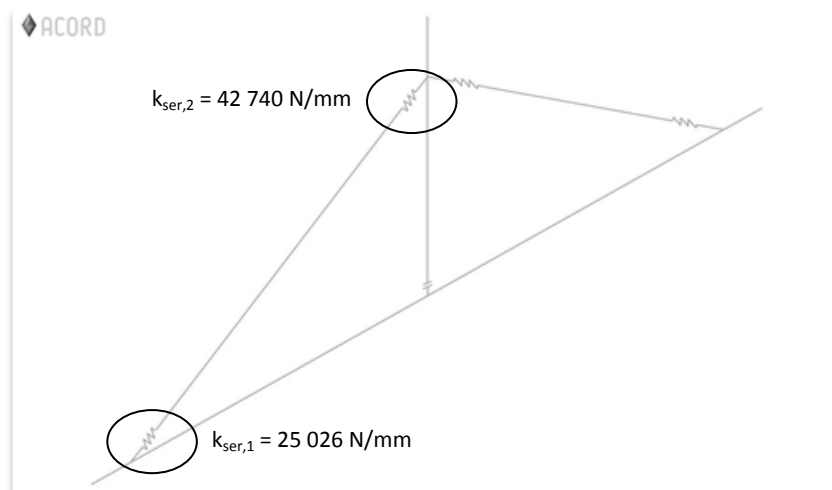
$$E_{\frac{\alpha}{2}}^{a,mean} = \frac{E_{0,mean} \times E_{90,mean}}{E_{0,mean} \times \sin^2(\alpha/2) + E_{90,mean} \times \cos^2(\alpha/2)} = \frac{11\,000 \times 370}{11\,000 \times 0,09 + 370 \times 0,91} = 3\,068 \text{ MPa}$$

$$k_{ser} = \frac{b_{arb} \times h'_{tal}}{2 \times l_{tal}} \times E_{\alpha,mean} = \frac{100 \times 42,1}{2 \times 200} \times 3\,068 = 32\,291 \text{ N/mm}$$

SORTIE DU DOMAINE DE VALIDITÉ ET AUTRES REMARQUES

- 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
- Le mode de rupture en compression transversale de l'entrait est rarement dimensionnant dans les charpentes traditionnelles courantes. Les facteurs favorisant ce mode de rupture sont une pente importante (supérieure à 50°) et une hauteur d'arbalétrier inférieure à celle de l'entrait.
- Le module de glissement est à utiliser conjointement à un jeu à déterminer par le concepteur (fonction du mode de taillage, de l'humidité des bois à la mise en œuvre...). Un module séquent équivalent peut être utilisé.
- Pour la ferme utilisée dans l'exemple de calcul de la section « **2. Exemples de calcul** » du présent guide, le calcul de la flèche en tête de poinçon à l'aide d'un logiciel intégrant le glissement d'assemblages montre la sensibilité importante des hypothèses de calcul :

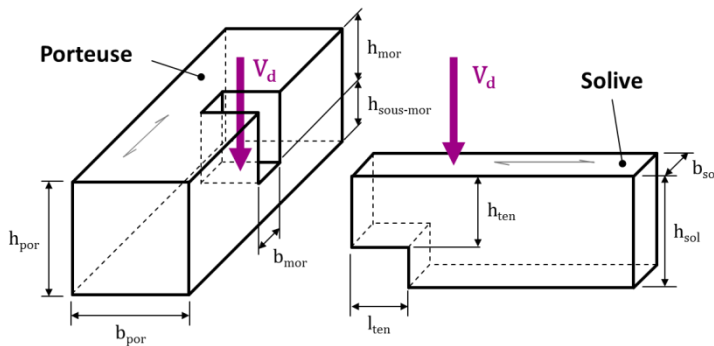
- Flèche en supposant des assemblages parfaitement rigides	0,86 mm
- Flèche en utilisant le glissement calculé suivant le présent guide	5,43 mm
- Flèche en utilisant le glissement calculé suivant le présent guide et un jeu de 2 mm	10,5 mm



Modélisation de la ferme de la section 2 à l'aide d'un logiciel intégrant le glissement d'assemblage

4.2. TENON-MORTAISE EN PLANCHER

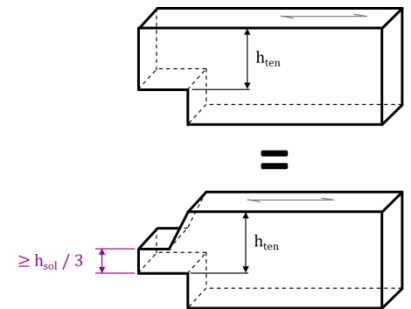
PRÉSENTATION DE L'ASSEMBLAGE



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 toute largeur et débouchant en partie supérieure ou avec mordâne
- NATURE DES BOIS UTILISES bois classés mécaniquement, même nature pour tous les éléments
- SECTIONS DES ELEMENTS
 - Largeur maximale 180 mm
 - Hauteur maximale 300 mm
 - Solive moins large que la porteuse
- GEOMETRIE DE L'ASSEMBLAGE
 - Angle porteur/supporté $45^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$
 - 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
 - Il doit exister un jeu entre l'extrémité du tenon et le fond d'une mortaise borgne



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

DIMENSIONNEMENT AVANCÉ

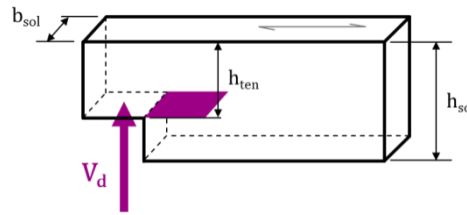
1. Vérification du cisaillement du tenon (cisaillement et traction transversale combinés) : $f_{v,d} \geq \tau_d$

Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times k_{cal} \times \frac{V_d \times h_{sol}}{b_{sol} \times k_{cr} \times h_{ten}^2}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$



- Avec :
- k_{cal} coefficient de calibration intégrant les incertitudes de modélisation égal à 1,29 (issu de l'étude de calibration cf. section 5. Méthodologie)
 - 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)
 - k_{mod} coefficient de modification relatif à la durée de chargement et l'humidité à prendre dans l'Eurocode 5 (§ 3.1.3)
 - γ_M coefficient partiel pour les propriétés des matériaux à prendre dans l'Eurocode 5 et son Annexe Nationale (§ 2.4.1)

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

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

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

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times k_{cal} \times \frac{V_d \times h_{sol}}{b_{sol} \times k_{cr} \times h_{ten}^2} = \frac{3}{2} \times 1,29 \times \frac{4\,500 \times 225}{75 \times 0,67 \times 150^2} = 1,73 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 4 \times \frac{0,8}{1,3} = 2,46 \text{ MPa}$$

D'où un taux de travail de $1,73/2,46 = 70\%$

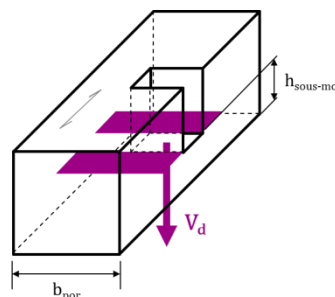
2. Vérification du cisaillement de la mortaise (cisaillement et traction transversale combinés) : $f_{v,d} \geq \tau_d$

Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$\tau_d = \frac{3}{4} \times \frac{V_d}{b_{por} \times k_{cr} \times h_{sous-mor}}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$



- 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)
 - k_{mod} coefficient de modification relatif à la durée de chargement et l'humidité à prendre dans l'Eurocode 5 (§ 3.1.3)
 - γ_M coefficient partiel pour les propriétés des matériaux à prendre dans l'Eurocode 5 et son Annexe Nationale (§ 2.4.1)

Application Numérique :

Dans le même cas que l'application numérique précédente

$$\tau_d = \frac{3}{4} \times \frac{V_d}{b_{por} \times k_{cr} \times h_{sous-mor}} = \frac{3}{4} \times \frac{6\,000}{75 \times 0,67 \times 60} = 1,49 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 4 \times \frac{0,8}{1,3} = 2,46 \text{ MPa}$$

D'où un taux de travail de $1,49/2,46 = 61\%$

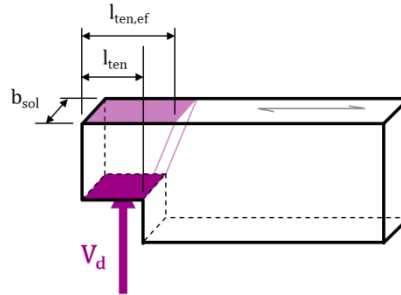
3. Vérification de la compression transversale du tenon : $k_{c,90} \times f_{c,90,d} \geq \sigma_{c,90,d}$

Calcul de la contrainte de compression [MPa]

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{V_d}{b_{sol} \times l_{ten,ef}}$$

Calcul de la résistance en compression [Mpa]

$$k_{c,90} \times f_{c,90,d} = k_{c,90} \times f_{c,90,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$



Avec : $l_{ten,ef}$ longueur efficace de compression transversale du tenon [mm]

$$l_{ten,ef} = l_{ten} + \min[30; l_{ten}]$$

$k_{c,90}$ 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)

$f_{c,90,k}$ résistance caractéristique à la compression transversale du bois utilisé pour la solive [MPa] à prendre dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080)

k_{mod} coefficient de modification relatif à la durée de chargement et l'humidité à prendre dans l'Eurocode 5 (§ 3.1.3)

γ_M coefficient partiel pour les propriétés des matériaux à prendre dans l'Eurocode 5 et son Annexe Nationale (§ 2.4.1)

Application Numérique :

Dans le même cas que l'application numérique précédente

$$l_{ten,ef} = l_{ten} + \min[30; l_{ten}] = 50 + 30 = 80 \text{ mm}$$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{V_d}{b_{sol} \times l_{ten,ef}} = \frac{6\,000}{75 \times 80} = 1,00 \text{ MPa}$$

$$k_{c,90} \times f_{c,90,d} = k_{c,90} \times f_{c,90,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 1,5 \times 2,5 \times \frac{0,8}{1,3} = 2,31 \text{ MPa}$$

D'où un taux de travail de $1,00/2,31 = 43\%$

4. Calcul du module de glissement de l'assemblage : k_{ser}

Module de glissement côté tenon [N/mm]

$$k_{ser,ten} = 2,5 \times \frac{b_{ten} \times l_{ten}}{h_{ten}} \times E_{90,mean}$$

Module de glissement côté mortaise [N/mm]

$$k_{ser,mor} = 3,5 \times \frac{b_{ten} \times l_{ten}}{h_{sous-mor}} \times E_{90,mean}$$

Module de glissement global de l'assemblage [N/mm]

$$k_{ser} = \frac{1}{1/k_{ser,ten} + 1/k_{ser,mor}}$$

Avec : $E_{90,mean}$ module moyen d'élasticité transversale du bois utilisé [MPa] à prendre dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080)

Application Numérique :

Dans le même cas que l'application numérique précédente

$$k_{ser,ten} = 2,5 \times \frac{b_{ten} \times l_{ten}}{h_{ten}} \times E_{90,mean} = 2,5 \times \frac{75 \times 50}{165} \times 370 = 21\,023 \text{ N/mm}$$

$$k_{ser,mor} = 3,5 \times \frac{b_{ten} \times l_{ten}}{h_{sous-mor}} \times E_{90,mean} = 3,5 \times \frac{75 \times 50}{60} \times 370 = 80\,938 \text{ N/mm}$$

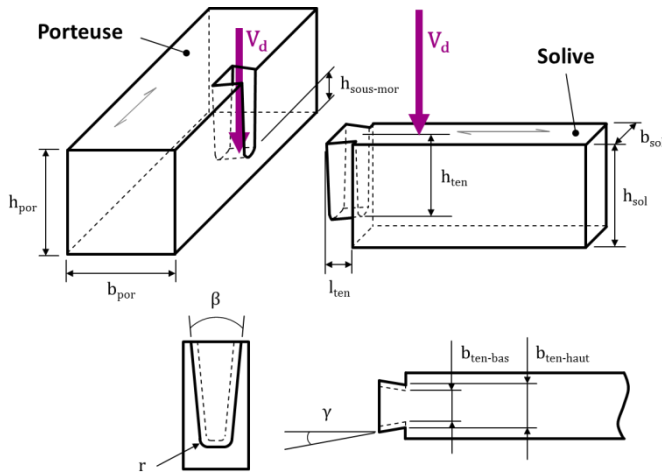
$$k_{ser} = \frac{1}{1/k_{ser,ten} + 1/k_{ser,mor}} = \frac{1}{1/21\,023 + 1/80\,938} = 16\,688 \text{ N/mm}$$

SORTIE DU DOMAINE DE VALIDITÉ ET AUTRES REMARQUES

- Si les matériaux des deux éléments sont différents, en particulier si de la poutre porteuse est moins résistant que celui de la solive, justifiez la résistance en compression transversale dans la mortaise. Le calcul se fait sur les mêmes principes que celui côté tenon, avec toutefois une surface efficace de compression transversale à adapter.
- La mortaise fragilise la poutre porteuse en réduisant sa section efficace. On doit veiller à ce que cette fragilisation ne soit pas préjudiciable au fonctionnement de celle-ci. En particulier, si cette poutre porteuse est soumise à la flexion, la réduction de section doit être prise en compte dans le calcul de l'inertie.
- Afin de justifier des tenon-mortaise utilisés en charpente (par exemple à la jonction arbalétrier-poinçon ou arbalétrier-jambe de force), on doit vérifier la compression de l'about du tenon et de la mortaise. Si l'about n'est pas assez résistant en compression au niveau du tenon ou de la mortaise, on le renforce par un embrèvement calculé comme présenté dans le présent Guide, et dont la géométrie de l'about doit être déterminée ainsi :
 - Si l'embrèvement est ouvert (about aussi large que l'élément embrevé), il doit être taillé à la bissectrice
 - Si l'embrèvement est fermé (about moins large que l'élément embrevé), il doit être taillé à angle droit
- Le mode de rupture en compression transversale du tenon est rarement dimensionnant dans les planchers courants. Les facteurs favorisant ce mode de rupture sont une hauteur de tenon importante (supérieure à 80% de celle de la solive) et une longueur de tenon faible en rapport à sa hauteur (moins de la moitié).
- Le module de glissement est à utiliser conjointement à un jeu à déterminer par le concepteur (fonction du mode de taillage, de l'humidité des bois à la mise en œuvre...). Un module séquent équivalent peut être utilisé.

4.3. 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]
$h_{sous-mor}$	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 UTILISÉS bois classés mécaniquement, même nature pour tous les éléments
- SECTIONS DES ELEMENTS
 - Largeur maximale 180 mm
 - Hauteur maximale 240 mm
 - Solive 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
 - Il peut exister un jeu positif entre la partie inférieure du tenon et la mortaise

DIMENSIONNEMENT AVANCÉ

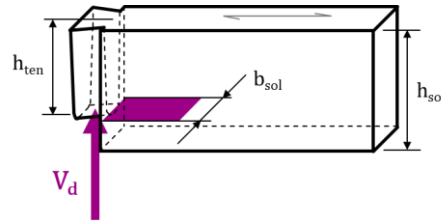
1. Vérification du cisaillement du tenon (cisaillement et traction transversale combinés) : $f_{v,d} \geq \tau_d$

Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times k_{cal} \times \frac{V_d \times h_{sol}}{b_{sol} \times k_{cr} \times h_{ten}^2}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$



- Avec :
- k_{cal} coefficient de calibration intégrant les incertitudes de modélisation égal à 1,61 (issu de l'étude de calibration cf. section 5. Méthodologie)
 - 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)
 - k_{mod} coefficient de modification relatif à la durée de chargement et l'humidité à prendre dans l'Eurocode 5 (§ 3.1.3)
 - γ_M coefficient partiel pour les propriétés des matériaux à prendre dans l'Eurocode 5 et son Annexe Nationale (§ 2.4.1)

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
Et un effort de calcul de 3 000 N issu de la combinaison 1,35 G + 1,5 Q

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

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times k_{cal} \times \frac{V_d \times h_{sol}}{b_{sol} \times k_{cr} \times h_{ten}^2} = \frac{3}{2} \times 1,61 \times \frac{3\,000 \times 160}{80 \times 0,67 \times 110^2} = 1,79 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 4 \times \frac{0,8}{1,3} = 2,46 \text{ MPa}$$

D'où un taux de travail de $1,79/2,46 = 73\%$

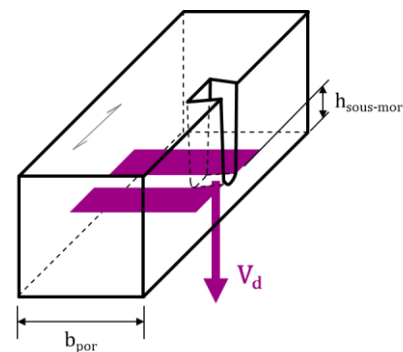
2. Vérification du cisaillement de la mortaise (cisaillement et traction transversale combinés) : $f_{v,d} \geq \tau_d$

Calcul de la contrainte de cisaillement [MPa]

$$\tau_d = \frac{3}{4} \times \frac{V_d}{b_{ef} \times k_{cr} \times h_{sous-mor}}$$

Calcul de la résistance au cisaillement [Mpa]

$$f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$



- Avec :
- b_{ef} largeur efficace de cisaillement de la porteuse [mm]
 $b_{ef} = \min[100; b_{por}]$
 - 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)
 - k_{mod} coefficient de modification relatif à la durée de chargement et l'humidité à prendre dans l'Eurocode 5 (§ 3.1.3)
 - γ_M coefficient partiel pour les propriétés des matériaux à prendre dans l'Eurocode 5 et son Annexe Nationale (§ 2.4.1)

Application Numérique :

Dans le même cas que l'application numérique précédente

$$b_{ef} = \min[100; b_{por}] = 100 \text{ mm}$$

$$\tau_d = \frac{3}{4} \times \frac{V_d}{b_{ef} \times k_{cr} \times h_{sous-mor}} = \frac{3}{4} \times \frac{3000}{100 \times 0,67 \times 60} = 0,56 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 4 \times \frac{0,8}{1,3} = 2,46 \text{ MPa}$$

D'où un taux de travail de $0,56/2,46 = 23\%$

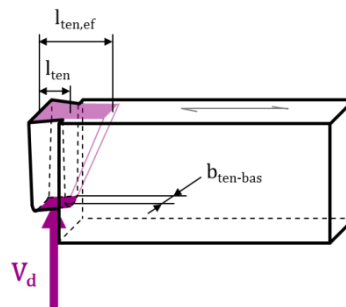
3. Vérification de la compression transversale du tenon : $k_{c,90} \times f_{c,90,d} \geq \sigma_{c,90,d}$

Calcul de la contrainte de compression [MPa]

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{V_d}{b_{ten-bas} \times l_{ten,ef}}$$

Calcul de la résistance en compression [Mpa]

$$k_{c,90} \times f_{c,90,d} = k_{c,90} \times f_{c,90,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$



Avec : $l_{ten,ef}$ longueur efficace de compression transversale du tenon [mm]

$$l_{ten,ef} = l_{ten} + \min[30; l_{ten}]$$

$k_{c,90}$ 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)

$f_{c,90,k}$ résistance caractéristique à la compression transversale du bois utilisé pour l'élément supporté [MPa] à prendre dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080)

k_{mod} coefficient de modification relatif à la durée de chargement et l'humidité à prendre dans l'Eurocode 5 (§ 3.1.3)

γ_M coefficient partiel pour les propriétés des matériaux à prendre dans l'Eurocode 5 et son Annexe Nationale (§ 2.4.1)

Application Numérique :

Dans le même cas que l'application numérique précédente

$$l_{ten,ef} = l_{ten} + \min[30; l_{ten}] = 30 + 30 = 60 \text{ mm}$$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{V_d}{b_{ten-bas} \times l_{ten,ef}} = \frac{3000}{70 \times 60} = 0,71 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad k_{c,90} \times f_{c,90,d} = k_{c,90} \times f_{c,90,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 2,5 \times 1,5 \times \frac{0,8}{1,3} = 2,31 \text{ MPa}$$

D'où un taux de travail de $0,71/2,31 = 31\%$

4. Calcul du module de glissement de l'assemblage : k_{ser}

Module de glissement côté tenon [N/mm]

$$k_{ser,ten} = 2,5 \times \frac{b_{ten-haut} \times l_{ten}}{h_{ten}} \times E_{90,mean}$$

Module de glissement côté mortaise [N/mm]

$$k_{ser,mor} = 3,5 \times \frac{b_{ten-haut} \times l_{ten}}{h_{sous-mor}} \times E_{90,mean}$$

Module de glissement global de l'assemblage [N/mm]

$$k_{ser} = \frac{1}{1/k_{ser,ten} + 1/k_{ser,mor}}$$

Avec : $E_{90,mean}$ module moyen d'élasticité transversale du bois utilisé [MPa] à prendre dans les normes de classement des produits (NF EN 338 ou NF EN 14080)

Application Numérique :

Dans le même cas que l'application numérique précédente

$$k_{ser,ten} = 2,5 \times \frac{b_{ten-haut} \times l_{ten}}{h_{ten}} \times E_{90,mean} = 2,5 \times \frac{70 \times 30}{120} \times 370 = 16\,188 \text{ N/mm}$$

$$k_{ser,mor} = 3,5 \times \frac{b_{ten-haut} \times l_{ten}}{h_{sous-mor}} \times E_{90,mean} = 3,5 \times \frac{70 \times 30}{60} \times 370 = 45\,325 \text{ N/mm}$$

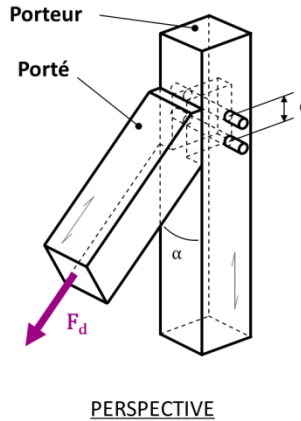
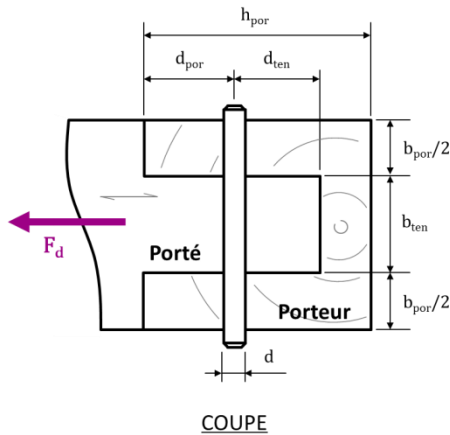
$$k_{ser} = \frac{1}{1/k_{ser,ten} + 1/k_{ser,mor}} = \frac{1}{1/16\,188 + 1/45\,325} = 11\,928 \text{ N/mm}$$

SORTIE DU DOMAINE DE VALIDITÉ ET AUTRES REMARQUES

- Si les matériaux des deux éléments sont différents, en particulier si celui de la poutre porteuse est moins résistant que celui de la solive, justifiez la résistance en compression transversale dans la mortaise. Le calcul se fait sur les mêmes principes que celui côté tenon, avec toutefois une surface efficace de compression transversale à adapter.
- La mortaise fragilise la poutre porteuse en réduisant sa section efficace. On doit veiller à ce que cette fragilisation ne soit pas préjudiciable au fonctionnement de celle-ci. En particulier, si cette poutre porteuse est soumise à la flexion, la réduction de section doit être prise en compte dans le calcul de l'inertie.
- Le mode de rupture en compression transversale du tenon est rarement dimensionnant dans les planchers courants. Les facteurs favorisant ce mode de rupture sont une hauteur de tenon importante (supérieure à 80% de celle de la solive) et une longueur de tenon faible en rapport à sa hauteur (moins de la moitié).
- Le module de glissement est à utiliser conjointement à un jeu à déterminer par le concepteur (fonction du mode de taillage, de l'humidité des bois à la mise en œuvre...). Un module séquent équivalent peut être utilisé.

4.4. CHEVILLE EN DOUBLE CISAILLEMENT

PRÉSENTATION DE L'ASSEMBLAGE



F_d	Effort de traction de calcul	[N]
α	Angle entre porteur et porté	[°]
n	Nombre de chevilles	
d	Diamètre des chevilles	[mm]
e	Entraxe entre chevilles	[mm]
d_{ten}	Distance au bord du tenon	[mm]
d_{por}	Distance au bord du porteur	[mm]
b_{ten}	Épaisseur du tenon	[mm]
h_{por}	Hauteur du porteur	[mm]
b_{por}	Épaisseur du porteur (réduite de celle du tenon)	[mm]

DOMAINE DE VALIDITÉ DE LA MÉTHODE AVANCÉE

- TYPE DE CHEVILLE : tronconique ou circulaire
- NATURE DES BOIS UTILISES : bois secs plus durs que les bois à assembler (ex : acacia, chêne, frêne)
- GEOMETRIE DE L'ASSEMBLAGE
 - Nombre de chevilles : $n = 1$ ou 2
 - Diamètre des chevilles : $14 \text{ mm} \leq d \leq 30 \text{ mm}$
 - Entraxe des chevilles : $e \geq 2 \times d$
 - Épaisseur du tenon : $b_{ten} \geq 2 \times d$
 - Distance au bord du tenon : $d_{ten} \geq 2 \times d$
 - Distance au bord du porteur : $d_{por} \geq d$
- EXECUTION
 - Les zones sollicitées de l'assemblage doivent être exemptes de défauts rédhibitoires

DIMENSIONNEMENT AVANCÉ

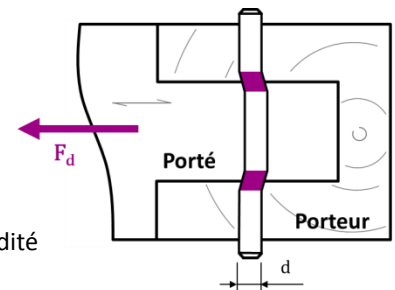
1. Vérification du cisaillement des chevilles : $R_{v,d} \geq F_d$

Calcul de la résistance de l'assemblage [N]

$$R_{v,d} = R_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 9,5 \times n \times d^2 \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

Avec : k_{mod} coefficient de modification relatif à la durée de chargement et l'humidité à prendre dans l'Eurocode 5 (§ 3.1.3)

γ_M coefficient partiel pour les propriétés des matériaux à prendre dans l'Eurocode 5 et son Annexe Nationale (§ 2.4.1)



Application Numérique :

Pour un assemblage tenon-mortaise avec 2 chevilles de diamètre 20 mm

En classe de service 2 avec un effort de traction de calcul de 3 000 N issu de la combinaison 1,35 G + 1,5 Q

$$F_d = 3\,000 \text{ N} \quad \text{et} \quad R_{v,d} = 9,5 \times n \times d^2 \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 9,5 \times 2 \times 20^2 \times \frac{0,6}{1,3} = 3\,508 \text{ N}$$

D'où un taux de travail de $3\,000 / 3\,508 = 86\%$

2. Vérification de la traction transversale du porteur : $F_{90,Rd} \geq F_d \times \sin \alpha$

Calcul de la résistance de l'assemblage [N]

$$F_{90,Rd} = F_{90,Rk} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

Avec : $F_{90,Rk}$ valeur caractéristique de la capacité au fendage [N]
à prendre dans l'Eurocode 5 (§ 8.1.4) formule (8.4)

$$F_{90,Rk} = 14 \times b_{por} \times \sqrt{\frac{d_{por}}{\left(1 - \frac{d_{por}}{h_{por}}\right)}}$$

k_{mod} coefficient de modification relatif à la durée de chargement et l'humidité
à prendre dans l'Eurocode 5 (§ 3.1.3)

γ_M coefficient partiel pour les propriétés des matériaux
à prendre dans l'Eurocode 5 et son Annexe Nationale (§ 2.4.1)

Application Numérique :

Dans le même cas que l'application numérique précédente

Avec un angle de 60° entre porteur et porté

Un porteur en 200×200

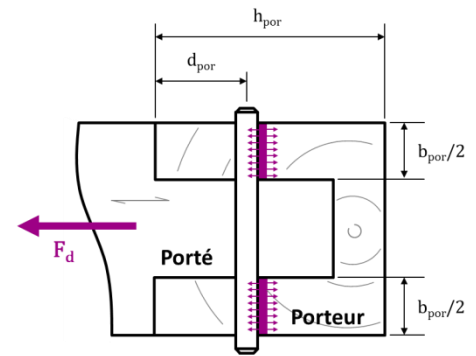
Un tenon de 40 mm d'épaisseur

Et une distance au bord du porteur de 50 mm

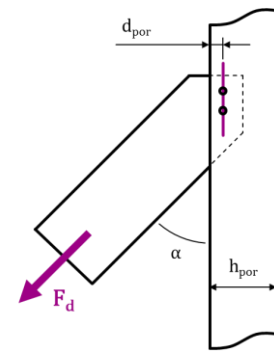
$$F_d \times \sin \alpha = 3\,000 \times \sin 60^\circ = 3\,000 \times 0,87 = 2\,610 \text{ N}$$

$$F_{90,Rd} = F_{90,Rk} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 14 \times b_{por} \times \sqrt{\frac{d_{por}}{\left(1 - \frac{d_{por}}{h_{por}}\right)}} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 14 \times (200 - 40) \times \sqrt{\frac{50}{\left(1 - \frac{50}{200}\right)}} \times \frac{0,6}{1,3} = 8\,441 \text{ N}$$

D'où un taux de travail de $2\,610 / 8\,441 = 31\%$



COUPE



ELEVATION

MÉTHODOLOGIE DE PROJET

INTRODUCTION

Le présent guide est le fruit des travaux de recherche menés en France sur les assemblages traditionnels entre 2004 et 2013, et d'un projet rédactionnel qui a couru sur la totalité de l'année 2014. 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 disponibles
3. la calibration des méthodes de calcul de résistance sur les données d'essais disponibles
4. la sélection des méthodes de calcul de résistance à utiliser
5. leur simplification
6. la proposition et la calibration des méthodes de calcul de rigidité
7. la rédaction du présent guide

La section ci-après présente de façon synthétique la méthodologie qui a été utilisée tout au long du 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.

5.1. RECEUIL ET ETUDE DES METHODES DE CALCUL EXISTANTES

SOURCES D'INFORMATION

Les méthodes de calcul et propositions de méthodes de calcul ont été collectées via 3 types de sources :

- Des rapports de recherche et publications scientifiques
- Des normes nationales
- Des guides et autres documents techniques

Le tableau ci-dessous présente les sources principales.

Type	Nom/description	Auteur(s)	Date
Rapports de recherche et publications scientifiques	Etude expérimentale et modélisation du comportement mécanique des assemblages bois/bois ¹	J.L. Coureau, C. Faye	2004
	Etude expérimentale et modélisation du comportement mécanique des assemblages bois/bois ²	J.L. Coureau, C. Faye	2007
	Projet Assemblage Bois sur Bois - Assemblages par Tenon-Mortaise en Chêne ²	J.L. Coureau	2007
	Assemblages traditionnels - Comportement des assemblages par queue d'aronde ²	P. Racher	2007
	Mechanical behaviour of Traditional Timber Connections Part I : Birdsmouth ³	C. Faye	2008
	Rapport sur les assemblages traditionnels bois/bois ⁴	J.F. Bocquet, C. Barthram	2009
	Capacity of Pegged Mortise and Tenon	J.F. Miller, R.J. Schmidt	2004
	Timber Pegs	R.J. Schmidt	2006
	New Yield Model for Wood Dowel Connections	J.F. Miller, R.J. Schmidt, W.M. Bulleit	2010
Normes nationales	EC5 - Eurocode 5 (+ A1 et A2)	-	2014
	EC5/AN FR - Annexe Nationale Française	-	2010
	EC5/AN DE - Annexe Nationale Allemande	-	2010
	EC5/AN AU - Annexe Nationale Autrichienne	-	2010
	EC5/AN NL - Annexe Nationale Hollandaise	-	2011
	EC5/AN EN - Annexe Nationale Anglaise	-	2013
	CB-71 - Ancienne norme Française	-	1991
	SIA 164 - Ancienne norme Suisse	-	1992
	SIA 265 - Norme Suisse	-	2003
	DIN 1052 - Norme Allemande	-	2008
	AS 1720 - Norme Australienne	-	
	CAN/CSA-O86-01 - Norme Canadienne	-	2006
	NDS:2005 - Norme des Etats-Unis	-	2005
Guides et autres documents techniques	STEP I	-	1996
	LIGNUM	-	
	Calcul des Structures Bois aux Eurocodes (cours ENSAM)	E. Sauvignet	2014
	Zulassung (Verband High-Tech-Abbund)	DIBt	
	Guide AQCEN - Charpente traditionnelle	FCBA	2009
	Guide AQCEN - Assemblages	FCBA	2009
	Charpente en bois lamellé collé	SNCCBLC	1990

¹ Rapport CTBA-LRBB-FIBC ² Rapport CTBA-LRBB-FIBC-CAPEB-IRABOIS ³ Article FCBA ⁴ Rapport ENSTIB-IRABOIS

Tableau 13 – Principales sources documentaires pour les méthodes de calcul existantes

MODES DE RUPTURE ET APPROCHES DE DIMENSIONNEMENT IDENTIFIÉS

Les sources documentaires ont permis d'identifier pour chaque technique d'assemblage les différents modes de rupture possibles, et les diverses approches de dimensionnement envisageables pour les traiter. Le tableau ci-dessous en présente une synthèse.

Assemblage	Modes de rupture	Variantes dans les approches de dimensionnement
Embrèvement simple en charpente	Cisaillement du talon	Prise en compte du contact en partie inférieure / non prise en compte Hypothèse d'une contrainte de cisaillement homogène / non homogène Prise en compte de la fissuration / non prise en compte Prise en compte du frottement / non prise en compte Vérification du cisaillement seul / combiné à la compression transversale
	Compression de l'about	Compression longitudinale pure / compression oblique Surface de contact réelle / surface efficace Prise en compte du frottement / non prise en compte Fonctionnement au-delà de la rupture / non prise en compte
	Compression de l'entrait (surface quasi verticale)	Idem compression de l'about, avec en complément : Vérification de la compression seule / combinée au cisaillement
	Compression de l'entrait (surface quasi horizontale)	Compression transversale pure / compression oblique Surface de contact réelle / surface efficace Fonctionnement au-delà de la rupture / non prise en compte
	Cisaillement de la section réduite de l'entrait	Une seule approche : cisaillement transversale pur sur section réduite
Tenon-mortaise en plancher	Cisaillement / traction transversale du tenon	Comme une poutre entaillée / avec la mécanique de la rupture Prise en compte de la fissuration / non prise en compte Divers coefficients complémentaires pour prise en compte de la géométrie
	Compression transversale du tenon	Surface de contact réelle / surface efficace Fonctionnement au-delà de la rupture / non prise en compte
	Cisaillement / traction transversale de la mortaise	Comme une poutre entaillée / comme un assemblage en traction transversale Prise en compte de la fissuration / non prise en compte Divers coefficients complémentaires pour prise en compte de la géométrie
	Compression transversale de la mortaise	Surface de contact réelle / surface efficace Fonctionnement au-delà de la rupture / non prise en compte
Queue d'aronde en plancher	Cisaillement / traction transversale du tenon	Comme une poutre entaillée Diverses méthodes de détermination de la section cisailée Prise en compte de la fissuration / non prise en compte Divers coefficients complémentaires pour prise en compte de la géométrie
	Compression transversale de la partie basse du tenon	Surface de contact réelle / surface efficace Fonctionnement au-delà de la rupture / non prise en compte
	Compression des flancs du tenon	Prise en compte du frottement
	Cisaillement / traction transversale de la mortaise	Formule empirique / formule basée sur assemblage en traction transversale Prise en compte de la fissuration / non prise en compte Mobilisation partielle / totale de la largeur de la porteuse Divers coefficients complémentaires pour prise en compte de la géométrie
	Compression transversale de la mortaise	Surface de contact réelle / surface efficace Fonctionnement au-delà de la rupture / non prise en compte
Cheville en double cisaillement	Cisaillement de la cheville	Approche de cisaillement simplifiée / approche empirique Formule unique / formules multiples fonction des épaisseurs des éléments
	Flexion de la cheville	Approche empirique
	Traction transversale ou rupture de bloc des éléments assemblés	Sur base des règles existantes dans l'Eurocode 5

Tableau 14 – Modes de rupture et approches de dimensionnement identifiés par technique d'assemblage

5.2. RECEUIL DES DONNEES D'ESSAI DISPONIBLES

SOURCES D'INFORMATION

La majorité des résultats d'essais est issue des travaux de recherche réalisés en France entre 2004 et 2013 pour le compte des membres du CODIFAB (pour l'embrèvement, le tenon-mortaise et la queue d'aronde). Ils ont été complétés par des résultats transmis par R.J. Schmidt (pour les chevilles). Le tableau ci-dessous synthétise les données disponibles.

Assemblage	Source des données	Précisions sur les données disponibles
Embrèvement simple en charpente	Etude expérimentale et modélisation du comportement mécanique des assemblages bois/bois (J.L. Coureau, C. Faye)	Configuration : embrèvement simple Bois testés : C24 et GL24 Section des bois : 90 x 225 et 160 x 225 mm ² , entrain et arbalétrier de même section Angle de pente : 25° et 55° Hauteur du talon : 30 à 45 mm Longueur du talon : 150 à 200 mm Quantité de données : 12 lots de 3 à 6 éprouvettes Données disponibles : <ul style="list-style-type: none"> - Paramètres géométriques théoriques - Classe des bois, humidité relative et masse volumique - Courbes d'essai pour chaque éprouvette - Mode(s) de rupture observé(s)
Tenon-mortaise en plancher	Etude expérimentale et modélisation du comportement mécanique des assemblages bois/bois (J.L. Coureau, C. Faye) <i>Pour les bois résineux</i> Projet Assemblage Bois sur Bois - Assemblages par Tenon-Mortaise en Chêne (J.L. Coureau) <i>Pour les bois feuillus</i>	Configuration : tenon toute largeur débouchant en partie haute Bois testés : GL24 et D50 Section des bois : 65 x 120 à 140 x 225 mm ² , porteuse et solive de même section Longueur du tenon : 32,5 à 60 mm Hauteur du tenon : de 1/2 à 3/4 de la hauteur de la solive Quantité de données : 7 lots de 3 à 8 éprouvettes Données disponibles : <ul style="list-style-type: none"> - Paramètres géométriques théoriques - Classe des bois, humidité relative et masse volumique (partiellement) - Mode(s) de rupture observé(s) et valeur de l'effort à rupture
Queue d'aronde en plancher	Rapport sur les assemblages traditionnels bois/bois (J.F. Bocquet, C. Barthram)	Bois testés : C24, C27, et C30 Section des bois : 80 x 160 à 100 x 200 mm ² Profondeur de mortaise : 28 à 30 mm Hauteur de la queue d'aronde : de 65% à 95% de la hauteur de la solive Angle porteuse / solive : 90° Angle des flancs : de 0° à 29° Angle de taille : de 10° à 20° Quantité de données : 13 lots, nombre d'éprouvettes par lot inconnu Données disponibles : <ul style="list-style-type: none"> - Paramètres géométriques théoriques - Classe des bois - Mode(s) de rupture observé(s) imprécis et valeur de l'effort à rupture
	Assemblages traditionnels - Comportement des assemblages par queue d'aronde (P. Racher)	Bois testés : inconnu Section des bois : 87 x 160 à 87 x 205 mm ² Profondeur de mortaise : inconnue Hauteur de la queue d'aronde : de 67% à 89% de la hauteur de la solive Angle porteuse / solive : 45°, 60° et 90° Angle des flancs : inconnu (environ 25°) Angle de taille : inconnu sauf pour un essai (égal à 0) Jeu sous le tenon : nul ou positif selon éprouvettes Quantité de données : 7 lots de 2 éprouvettes Données disponibles : <ul style="list-style-type: none"> - Paramètres géométriques théoriques - Masse volumique - Mode(s) de rupture observé(s) et valeur de l'effort à rupture
Cheville en double cisaillement	Capacity of Pegged Mortise and Tenon (J.F. Miller, R.J. Schmidt)	Configuration : paire de chevilles dans un assemblage tenon-mortaise Bois testés : peuplier, chêne, frêne, érable, bouleau Diamètre des chevilles : 25,4 mm Epaisseur du tenon : 38,1 et 50,8 mm Quantité de données : 32 éprouvettes Données disponibles : <ul style="list-style-type: none"> - Paramètres géométriques théoriques (sauf dimension pièce mortaisée) - Humidité relative des chevilles et du tenon - Mode(s) de rupture observé(s) et valeur de l'effort à rupture

Tableau 15 – Données d'essais collectées par technique d'assemblage

QUALITÉ DES DONNÉES COLLECTÉES ET CONSÉQUENCES

La qualité et la complétude des données collectées est variable au sein des diverses campagnes d'essais, avec pour conséquence des difficultés dans la valorisation de ces données pour la phase suivante de calibration des méthodes de calcul.

En particulier, **pour aucune des campagnes d'essais les propriétés réelles des matériaux mises en jeu dans les modes de ruptures observés n'ont été mesurées**. Lorsque l'on cherche par exemple à calibrer une formule de calcul de la résistance au cisaillement du talon d'un emboîtement, la résistance au cisaillement réelle des bois testés est une information cruciale. En effet, sans cette information il est impossible pour un essai donné de savoir si l'erreur entre la prédiction et la réalité est due à la formule de calcul ou à une propriété du matériau éloignée de sa valeur théorique. Par conséquent, ces propriétés réelles ont dû être estimées.

Aussi, **les dimensions réelles des éprouvettes n'ont été mesurées dans aucune des campagnes d'essais**. Tout comme pour les propriétés réelles des matériaux, cette information est à prendre en compte pour la calibration des formules de calcul, avec toutefois une importance moindre car sujette à une variabilité moindre. L'incertitude sur la dimension réelle a également dû être estimée.

5.3. CALIBRATION DES METHODES DE CALCUL DE RESISTANCE

Le principe de cette phase est de réaliser, pour chaque technique d'assemblage et chaque mode de rupture, une étude statistique sur l'application des différentes méthodes de calcul identifiées aux données d'essais collectées, afin de les comparer et de les calibrer.

Cette étude statistique est réalisée suivant la méthode de « Dimensionnement assisté par l'expérimentation » définie à l'Annexe D de l'Eurocode 0 (NF EN 1990). En accord avec le comité de pilotage du projet, pour chaque mode de rupture étudié la calibration des méthodes de calcul étudiées est réalisée par la détermination d'un coefficient k_{cal} à intégrer la formule de calcul de la contrainte (ce qui équivaut à $1/k_{cal}$ intégré dans la formule de calcul de la résistance).

Les principes de la méthode de l'Eurocode 0 et de la calibration au moyen du coefficient k_{cal} , ainsi que les choix effectués par le comité de pilotage pour les appliquer aux cas rencontrés sont présentés de façon synthétique dans les paragraphes ci-après.

PRINCIPES DE LA MÉTHODE DE L'EUROCODE

La méthode définie à l'Annexe D de l'Eurocode 0 consiste en 3 étapes :

1. Proposition d'un modèle théorique initial fonction des paramètres d'entrée moyens
2. Correction de la réponse moyenne du modèle par la méthode des moindres carrés
3. Correction de la réponse caractéristique du modèle grâce à la variation statistique des différents paramètres

Cette méthode se résume par la formule (D.17) de l'Eurocode 0 :

$$r_k = b \cdot g_{rt}(X_m) \cdot e^{-k_{\infty} \cdot \alpha_{rt} \cdot Q_{rt} - k_n \cdot \alpha_{\delta} \cdot Q_{\delta} - 0.5 \cdot Q^2}$$

Avec :

$g_{rt}(X_m)$ le modèle théorique initial fonction des paramètres d'entrée moyens

r_k le modèle théorique corrigé donnant la résistance caractéristique à partir des paramètres d'entrée moyens

b le terme de correction de la réponse moyenne du modèle théorique

$e^{-k_{\infty} \cdot \alpha_{rt} \cdot Q_{rt} - k_n \cdot \alpha_{\delta} \cdot Q_{\delta} - 0.5 \cdot Q^2}$ le terme de correction relatif à la variation des paramètres d'entrée

On notera par la suite K le produit $b \times e^{-k_{\infty} \cdot \alpha_{rt} \cdot Q_{rt} - k_n \cdot \alpha_{\delta} \cdot Q_{\delta} - 0.5 \cdot Q^2}$

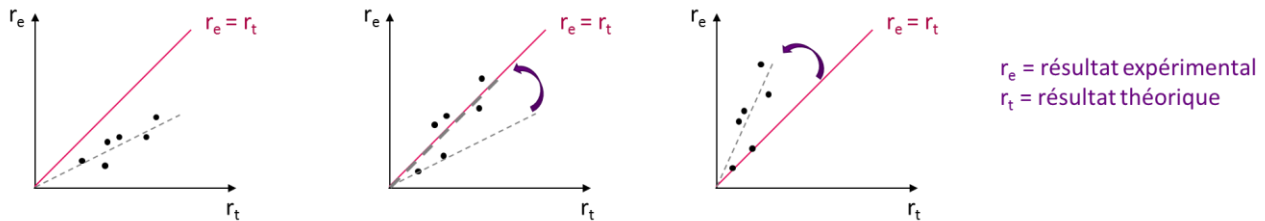
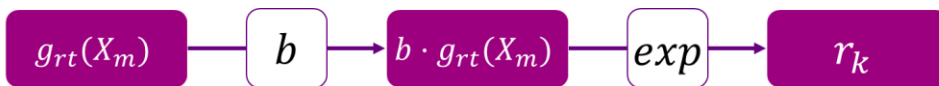


Schéma synthétique et conceptuel de la méthode de « dimensionnement assisté par l'expérimentation » de l'Eurocode 0

CALIBRATION VIA LE COEFFICIENT k_{cal}

Pour chaque formule de calcul, on cherche le coefficient $1/k_{cal}$ tel que l'on puisse par les pratiques habituelles de dimensionnement de l'Eurocode 5 obtenir le même résultat que la formule corrigée suivant la méthode de l'Annexe D de l'Eurocode 0.

La pratique habituelle peut s'écrire ainsi :

$$r_d(d_m, f_k) = r_k(d_m, f_k) \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = g_{rt}'(d_m) \times \frac{f_k}{k_{cal}} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

Avec :

- $r_d(d_m, f_k)$ résistance de calcul fonction des dimensions moyennes d_m et de la résistance caractéristique f_k
- $r_k(d_m, f_k)$ résistance caractéristique fonction des dimensions moyennes d_m et de la résistance caractéristique f_k
- k_{cal} coefficient de calibration à déterminer
- k_{mod} facteur de modification (influence de l'humidité et de la durée de chargement)
- γ_M coefficient partiel pour les propriétés des matériaux
- $g_{rt}'(d_m)$ une fonction des dimensions moyennes d_m

La pratique sur la base de la méthode de l'Annexe D de l'Eurocode 0 peut quant à elle s'écrire ainsi :

$$r_d(d_m, f_m) = r_k(d_m, f_m) \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = K \times g_{rt}(d_m, f_m) \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = K \times g_{rt}'(d_m) \times f_m \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

Avec :

- $r_d(d_m, f_m)$ résistance de calcul fonction des dimensions moyennes d_m et de la résistance moyenne f_m
- $r_k(d_m, f_m)$ résistance caractéristique fonction des dimensions moyennes d_m et de la résistance moyenne f_m
- k_{mod} facteur de modification (influence de l'humidité et de la durée de chargement)
- γ_M coefficient partiel pour les propriétés des matériaux
- $g_{rt}(d_m, f_m)$ une fonction des dimensions moyennes d_m et de la résistance moyenne f_m
- $g_{rt}'(d_m)$ une fonction des dimensions moyennes d_m

On peut déterminer k_{cal} en écrivant et réduisant l'égalité entre les deux expressions :

$$k_{cal} = \frac{f_k}{f_m} \times \frac{1}{K}$$

Dans le cas d'une population infinie, et pour une distribution suivant une loi normale (qui ne diffère que marginalement d'une loi log-normale souvent utilisée dans les normes des matériaux à base de bois), avec un intervalle de confiance de 75% pour un fractile à 5% d'exclusion inférieure, la relation entre la résistance moyenne et la résistance caractéristique peut s'écrire :

$$f_k = (1 - 1,65 \times COV) \times f_m$$

En substituant, on en déduit :

$$k_{cal} = (1 - 1,65 \times COV) \times \frac{1}{K}$$

CHOIX EFFECTUÉS PAR LE COMITÉ DE PILOTAGE

Afin de calculer le terme de correction relatif à la variation des paramètres d'entrée, et en l'absence de mesures des dimensions et des propriétés de matériau réelles des éprouvettes, ils ont dû être estimés.

- DIMENSIONS
 - Les dimensions moyennes ont été prises égales aux dimensions théoriques
 - La variation des dimensions a été déterminée sur la base des tolérances dimensionnelles des sciages
- PROPRIETES DE MATERIAU
 - Les propriétés moyennes sont tirées de la bibliographie ou estimées grâce au coefficient de variation
 - Le coefficient de variation (COV) des propriétés est supposé égal à 10% ou 20% (choix le plus sécuritaire)

Propriété	Notation	Lamellé-collé et reconstitué	Massif résineux	Massif feuillus
Traction transversale	$f_{t,90,m}$	1,6 MPa (bibliographie)	1,6 MPa (bibliographie)	4,4 MPa (biblio)
Compression longitudinale	$f_{c,0,m}$	36 MPa (bibliographie)	36,9 MPa (bibliographie)	$1,5 \times f_{c,0,k}$ (cov 20%)
Compression transversale	$f_{c,90,m}$	3,4 MPa (bibliographie)	2,8 MPa (bibliographie)	$1,5 \times f_{c,90,k}$ (cov 20%)
Cisaillement longitudinal	$f_{v,0,m}$	4,3 MPa (bibliographie)	5,4 MPa (bibliographie)	$1,5 \times f_{v,0,k}$ (cov 20%)

Tableau 16 – Propriétés moyennes estimées et origine

5.4. SELECTION DES METHODES DE CALCUL DE RESISTANCE

Les méthodes sélectionnées sont présentées en détail dans la section « 4. Méthodes Avancées » du présent guide. Les paragraphes suivant donnent les éléments de décision qui permet d'aboutir à celles-ci.

SÉLECTION DES MÉTHODES ET MODES DE RUPTURE A VÉRIFIER

A l'issue de la calibration de l'ensemble des formules identifiées, la sélection des méthodes de calcul s'est faite sur les critères suivants :

- Conformité de l'approche avec les **mécanismes physiques mis en jeu**
- **Maturité et crédit** de l'approche utilisée
- **Justesse** des formules (déterminée grâce coefficient de corrélation)
- **Facilité** de compréhension et d'utilisation

Par exemple, l'approche de vérification combinée de la compression transversale et du cisaillement dans le talon d'un embrèvement, bien que très prometteuse n'a pourtant pas été retenue. D'une part la compréhension d'une vérification combinée n'est pas aisée même si déjà présente dans l'Eurocode 5. D'autre part au sein de la formule proposée le coefficient traitant de l'interaction entre les deux modes de rupture a été calibré pour être conforme aux résultats d'essais disponibles mais sans étude spécifique.

Tous les modes de rupture identifiés ne font pas l'objet d'une proposition de méthode de vérification. En effet, certains modes de rupture sont peu probables et évitables moyennant le respect de certaines prescriptions constructives.

Assemblage	Modes de rupture	Approche de dimensionnement sélectionnée et formules
Embrèvement simple en charpente	Cisaillement du talon	Approche du SIA modifiée : <ul style="list-style-type: none"> - Vérification en cisaillement seul - Non prise en compte du contact en partie inférieure de l'embrèvement - Non prise en compte du frottement - Prise en compte de la non homogénéité par un coefficient de majoration - Prise en compte de la fissuration via le coefficient de l'Eurocode 5 $\tau_d = \frac{F_d \times \cos \alpha \times k_{maj}}{b_{arb} \times k_{cr} \times l_{tal}} \quad f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$

Assemblage	Modes de rupture	Approche de dimensionnement sélectionnée et formules
	Compression de l'about	Approche de J.F. Bocquet et C. Barthram modifiée : <ul style="list-style-type: none"> - Vérification en compression oblique - Non prise en compte du contact en partie inférieure de l'embranchement - Non prise en compte du frottement - Prise en compte de la surface de contact efficace - Prise en compte du fonctionnement au-delà de la rupture $\sigma_{c,\frac{\alpha}{2},d} = \frac{F_d \times \cos(\alpha/2)}{b_{arb} \times h'_{tal,ef}} \quad f_{c,\frac{\alpha}{2},d} = f_{c,\frac{\alpha}{2},k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$
	Compression de l'entrait (surface quasi verticale)	Non vérifiée car intervient toujours après celle de l'about si éléments assemblés réalisés avec le même matériau (exigé par le domaine de validité)
	Compression de l'entrait (surface quasi horizontale)	Approche CB 71 modifiée : <ul style="list-style-type: none"> - Vérification en compression transversale - Non prise en compte du contact sur l'about - Prise en compte de la surface de contact efficace - Prise en compte du fonctionnement au-delà de la rupture $\sigma_{c,90,d} = \frac{F_d \times \sin \alpha}{b_{arb} \times a_{ef}} \quad k_{c,90} \times f_{c,90,d} = k_{c,90} \times f_{c,90,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$
	Cisaillement de la section réduite de l'entrait	Non vérifié car n'intervient pas dans le cas du respect de la hauteur maximale de l'about (exigé par le domaine de validité)
Tenon-mortaise en plancher	Cisaillement / traction transversale du tenon	Approche C. Faye & J.L. Coureau modifiée : <ul style="list-style-type: none"> - Vérification comme une poutre entaillée - Coefficient simple pour tenir compte de la géométrie - Prise en compte de la fissuration via le coefficient de l'Eurocode 5 $\tau_d = \frac{3}{2} \times k_{cal} \times \frac{V_d \times h_{sol}}{b_{sol} \times k_{cr} \times h_{ten}^2} \quad f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$
	Compression transversale du tenon	Approche STEP modifiée : <ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte de la surface de contact efficace - Prise en compte du fonctionnement au-delà de la rupture $\sigma_{c,90,d} = \frac{V_d}{b_{sol} \times l_{ten,ef}} \quad k_{c,90} \times f_{c,90,d} = k_{c,90} \times f_{c,90,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$
	Cisaillement / traction transversale de la mortaise	Approche LIGNUM modifiée : <ul style="list-style-type: none"> - Vérification comme une poutre entaillée - Prise en compte de la fissuration via le coefficient de l'Eurocode 5 $\tau_d = \frac{3}{4} \times \frac{V_d}{b_{por} \times k_{cr} \times h_{sous-mor}} \quad f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$
	Compression transversale de la mortaise	Non vérifiée car intervient toujours après celle du tenon si éléments assemblés réalisés avec le même matériau (exigé par le domaine de validité)
Queue d'aronde en plancher	Cisaillement / traction transversale du tenon	Approche DIBt modifiée (similaire à celle du tenon-mortaise) : <ul style="list-style-type: none"> - Vérification comme une poutre entaillée - Coefficient simple pour tenir compte de la géométrie - Prise en compte de la fissuration via le coefficient de l'Eurocode 5 $\tau_d = \frac{3}{2} \times k_{cal} \times \frac{V_d \times h_{sol}}{b_{sol} \times k_{cr} \times h_{ten}^2} \quad f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$
	Compression transversale de la partie basse du tenon	Approche STEP modifiée (similaire à celle du tenon-mortaise) : <ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte de la surface de contact efficace - Prise en compte du fonctionnement au-delà de la rupture $\sigma_{c,90,d} = \frac{V_d}{b_{ten-bas} \times l_{ten,ef}} \quad k_{c,90} \times f_{c,90,d} = k_{c,90} \times f_{c,90,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$
	Compression des flancs du tenon	Non vérifié
	Cisaillement / traction transversale de la mortaise	Approche LIGNUM modifiée : <ul style="list-style-type: none"> - Vérification comme une poutre entaillée - Prise en compte de la fissuration via le coefficient de l'Eurocode 5 - Prise en compte de la profondeur du porteur réellement sollicitée $\tau_d = \frac{3}{4} \times \frac{V_d}{b_{ef} \times k_{cr} \times h_{sous-mor}} \quad f_{v,d} = f_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$
	Compression transversale de la mortaise	Non vérifiée car intervient toujours après celle du tenon si éléments assemblés réalisés avec le même matériau (exigé par le domaine de validité)
Cheville en double cisaillement	Cisaillement de la cheville	Approche R.J. Schmidt & J.F. Miller modifiée (approche semi-empirique basée sur contrainte de cisaillement) $R_{v,d} = R_{v,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 9,5 \times n \times d^2 \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$

Assemblage	Modes de rupture	Approche de dimensionnement sélectionnée et formules
	Traction transversale ou rupture de bloc des éléments assemblés	Approche Eurocode 5 $F_{90,Rd} = F_{90,Rk} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 14 \times b_{por} \times \sqrt{\frac{d_{por}}{\left(1 - \frac{d_{por}}{h_{por}}\right)}} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$
	Flexion de la cheville	Non vérifiée car les dispositions du domaine de validité (épaisseur minimale du tenon et diamètres des chevilles) imposent la rupture en cisaillement

Tableau 17 – Modes de rupture, approches de dimensionnement et formules sélectionnées par technique d'assemblage

DÉFINITION DES DOMAINES DE VALIDITÉ

Les domaines de validité ont été définis afin de réaliser un compromis raisonnable entre les divers objectifs suivants :

- Respecter le domaine sur lequel chaque méthode a été **testée et calibrée**
- Tenir compte des domaines proposés par les auteurs des diverses règles et de leur **justification physique**
- Couvrir les **pratiques les plus courantes** des entreprises Françaises de charpente

Pour l'ensemble des techniques d'assemblage, les méthodes sélectionnées ne s'appliquent que pour des structures en bois couvertes (classes de service 1 et 2 de l'Eurocode 5), et les éléments assemblés doivent être réalisés avec les mêmes bois, ceux-ci étant classés pour leur performance mécanique

Pour chaque technique d'assemblage les prescriptions complémentaires sont précisées dans le tableau ci-après.

Assemblage	Objet	Prescription	Commentaire
Embrèvement simple en charpente	Type d'embrèvement	Embrèvement simple sans tenon-mortaise	Configuration testée
	Sections des éléments	Section maximale 200 x 300 mm ² pour l'entrait Section maximale 180 x 300 mm ² pour l'arbalétrier	Domaine testé étendu pour couvrir les pratiques courantes
	Géométrie d'entaille	Entaille taillée à la bissectrice	Configuration testée. Validité de la formule pour le calcul de la compression de l'about
	Profondeur d'entaille	Si α inférieur à 50 : $h_{tal} \leq h_{ent} / 4$ Si α supérieur à 50 : $h_{tal} \leq h_{ent} / 6$	Afin d'écarter le mode de rupture en cisaillement de la section résiduelle de l'entrait
	Longueur du talon	$l_{tal} \geq 150$ mm	Minimum des pratiques courantes
		$l_{tal} \leq 8 h_{tal}$	Domaine testé et répartition de la contrainte
	Conditions d'appui	Appui proche de l'aplomb du nœud de l'assemblage $d_{app} \leq h_{ent}$	Configuration testée. Efforts et contraintes parasites si non respecté (cisaillement entrait)
Exécution	Les zones sollicitées de l'assemblage doivent être exemptes de défauts rédhibitoires	Variabilité des propriétés de matériau non maîtrisée	
Tenon-mortaise en plancher	Type de tenon-mortaise	Tenon toute largeur et débouchant sur le dessus	Configuration testée
		Effort transversal au fil du bois de la porteuse	Configuration testée
	Sections des éléments	Section maximale 180 x 300 mm ²	Domaine testé étendu pour couvrir les pratiques courantes
		Solive moins large que porteuse	Domaine testé et prescriptions bibliographie
	Angle porteuse/solive	$30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	Domaine testé étendu par prescriptions issues de la bibliographie
	Longueur du tenon	$l_{ten} \geq 40$ mm	Longueur suffisante pour emporter l'ensemble de l'épaisseur de la porteuse en cas de rupture de la mortaise par cisaillement / traction transversale
		$l_{ten} \geq b_{por} / 3$	
		$l_{ten} \leq 80$ mm	Afin d'éviter la flexion du tenon et les effets parasites associés
	Hauteur du tenon	$h_{ten} \geq h_{sol} / 2$	Domaine testé et prescriptions bibliographie
	Hauteur de bois sous la mortaise	$h_{sous-mor} \geq h_{por} / 4$	Domaine testé et hauteur suffisante pour emporter l'ensemble de l'épaisseur de la porteuse en cas de rupture de la mortaise par cisaillement / traction transversale

Assemblage	Objet	Prescription	Commentaire
	Exécution	Les zones sollicitées de l'assemblage doivent être exemptes de défauts rédhibitoires	Variabilité des propriétés de matériau non maîtrisée
		Il doit exister un jeu entre l'extrémité du tenon et le fond d'une mortaise borgne	Contacts
Queue d'aronde en plancher	Type de queue d'aronde	Tenon centré sur sa largeur	Configuration testée
		Effort transversal au fil du bois de l'élément porteur	Configuration testée
	Sections des éléments	Section maximale 180 x 240 mm ²	Domaine testé étendu pour couvrir les pratiques courantes
		Solive moins large que la porteuse	Domaine testé et prescriptions bibliographie
	Hauteur de bois sous la mortaise	$h_{\text{sous-mor}} \geq h_{\text{por}} / 4$	Domaine testé et conformité aux dispositions permettant le calcul de l'épaisseur de la porteuse réellement mise en jeu lors de la rupture en cisaillement de la mortaise
	Hauteur du tenon	$h_{\text{ten}} \geq 0,6 \times h_{\text{sol}}$	Domaine testé et prescriptions bibliographie
	Largeur du tenon	$b_{\text{ten-haut}} \geq 0,8 \times b_{\text{sol}}$	Domaine testé et pratiques courantes
		$b_{\text{ten-bas}} \geq 0,5 \times b_{\text{sol}}$	Domaine testé et pratiques courantes
	Longueur du tenon	$l_{\text{ten}} \geq 25 \text{ mm}$	Domaine testé et pratiques courantes
		$l_{\text{ten}} \leq 80 \text{ mm}$	Afin d'éviter la flexion du tenon et les effets parasites associés
	Rayon de congés tenon	$10 \text{ mm} \leq r \leq 60 \text{ mm}$	Domaine testé et pratiques courantes
	Angle porteuse/solive	$45^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$	Domaine testé et pratiques courantes
	Angle des flancs	$4^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	Domaine testé et pratiques courantes
	Angle de taille	$10^\circ \leq \gamma \leq 20^\circ$	Domaine testé et pratiques courantes
Exécution	Les zones sollicitées de l'assemblage doivent être exemptes de défauts rédhibitoires	Variabilité des propriétés de matériau non maîtrisée	
	Il peut exister un jeu positif entre la partie inférieure du tenon et la mortaise	Domaine testés inclus les deux possibilités, et influence peu perceptible	
Cheville en double cisaillement	Type de cheville	Tronconique ou circulaire	Domaine testé et pratiques courantes
	Nature des bois	Bois secs plus dur que bois assemblés	Domaine testé et pratiques courantes
	Nombre de chevilles	$n = 1$ ou 2	Domaine testé et pratiques courantes
	Diamètre des chevilles	$14 \text{ mm} \leq d \leq 30 \text{ mm}$	Domaine testé et pratiques courantes
	Entraxe des chevilles	$e \geq 2 \times d$	Domaine testé, pratiques courantes et limitation du risque de fissuration / traction transversale
	Epaisseur du tenon	$b_t \geq 2 \times d$	Domaine testé, pratiques courantes et favorise rupture par cisaillement des chevilles
	Distance bord tenon	$d_{\text{ten}} \geq 2 \times d$	Domaine testé, pratiques courantes et limitation du risque de rupture de bloc
	Distance bord porteur	$d_{\text{por}} \geq d$	Domaine testé, pratiques courantes et limitation du risque de traction transversale
	Exécution	Les zones sollicitées de l'assemblage doivent être exemptes de défauts rédhibitoires	Variabilité des propriétés de matériau non maîtrisée

Tableau 18 – Prescriptions complémentaires du domaine de validité par technique d'assemblage

5.5. SIMPLIFICATION DES METHODES DE CALCUL DE RESISTANCE

OBJECTIFS DE LA SIMPLIFICATION

Une fois les méthodes de calcul avancées sélectionnées et leur domaine de validité défini, leur simplification a pu être réalisée. Cette simplification a été menée pour répondre aux objectifs suivants :

- Proposer des **méthodes facilement abordables**, avec des notations simples
- Permettre tant que possible l'utilisation de celles-ci de façon **autoportante**, sans document complémentaire
- **Limiter le temps d'étude** pour les structures simples et courantes
- Garantir un **maintien du niveau de sécurité** par rapport aux règles complètes

MÉTHODE DE SIMPLIFICATION

La simplification des méthodes avancées a été permise par les démarches suivantes :

- On a ajouté des **prescriptions complémentaires dans le domaine de validité afin d'éliminer un mode de rupture** rarement dimensionnant, qui n'est ainsi plus à vérifier. Ces prescriptions ont été définies par la résolution des inéquations garantissant un taux de travail inférieur pour le mode de rupture à éliminer que pour les autres modes de rupture à vérifier.
 - On a imposé une hauteur minimale d'arbalétrier (fonction de la hauteur de l'entrait) afin d'éliminer le mode de rupture en compression transversale de l'entrait des embrèvements.
 - On a imposé une longueur minimale de tenon (fonction de la hauteur du tenon) afin d'éliminer le mode de rupture en compression transversale du tenon des assemblages par tenon-mortaise
 - On a imposé une longueur minimale de tenon et augmenter la largeur minimale du tenon à sa base afin d'éliminer le mode de rupture en compression transversale du tenon des assemblages par queue d'aronde
- On fait **référence aux efforts réels et non aux efforts de calculs** de l'Eurocode. Ainsi les utilisateurs n'ont pas besoin de combiner leurs charges comme prévu par l'Eurocode 0. Il a été supposé un ratio sécuritaire de 1,5 entre les efforts de calculs et les efforts réels, et ce facteur a été intégré directement dans les constantes des formules présentées. Si les utilisateurs disposent d'efforts pondérés, ils doivent les diviser par 1,5 pour utiliser les méthodes simplifiées.
- On a **limité les classes de bois utilisables** aux classes de bois couramment utilisées (massif et reconstitué résineux de C18 à C30, feuillus D18 à D30, et lamellé collé résineux GL20 à GL30), **et les angles possibles pour l'embrèvement** aux angles courants (de 17° à 60°). Cette limitation a permis de déterminer les prescriptions complémentaires pour l'élimination de certains modes de rupture (cf. plus haut) et de réaliser les tableaux de valeurs présentés dans les méthodes simples.
- On a **utilisé des notations simples**, non inspirées des notations des Eurocodes (contraintes notées C et résistances notées R, indépendamment du type de sollicitation).
- On a **supprimé les références aux facteurs et coefficients partiels de l'Eurocode 5** (k_{cr} , k_{mod} et γ_M), ils ont été intégrés comme des constantes dans les formules ($k_{cr} = 0,67$, $k_{mod} = 0,6$ et $\gamma_M = 1,3$).
- On a **approximé certains termes complexes** par des termes plus simples. Par exemple, pour la compression oblique de l'about d'un embrèvement, on a approximé la longueur de contact efficace $h'_{tal,ef}$ par la longueur de contact réelle projetée h'_{tal} .
- On a présenté les méthodes simplifiées de deux façons :
 - La première nommée « **Dimensionnement simple** » permet de vérifier un assemblage dont on connaît le matériau et les dimensions, en calculant la contrainte d'une part, la résistance d'autre part et en vérifiant que l'une est inférieure à l'autre.
 - La seconde nommée « **Pré-dimensionnement** » permet à partir d'un assemblage dont on connaît le matériau et la plupart des dimensions de trouver les dimensions manquantes par une formule unique.
- On a présenté les formules des méthodes simplifiées pour des **efforts exprimés en daN**.

5.6. PROPOSITION/CALIBRATION DES METHODES DE CALCUL DE RIGIDITE

ORIGINE DES PROPOSITIONS

Lors de la phase de recueil et d'étude des méthodes de calcul existantes, **une seule méthode de calcul de la rigidité a été identifiée** pour les assemblages par embrèvement (dans le rapport « Assemblages traditionnels - Comportement des assemblages par queue d'aronde » de P. Racher). Toutefois cette méthode ne repose que sur une hypothèse simplificatrice (le déplacement à rupture vaut 1,5 mm).

Or le rapport « Etude expérimentale et modélisation du comportement mécanique des assemblages bois/bois » présente les **mesures de la rigidité réelle des assemblages** par embrèvement et par tenon-mortaise testés lors de cette étude.

Il a donc été entrepris un travail de proposition de méthodes de calcul simples, basées sur les phénomènes physiques en jeu, et calibrées grâce aux mesures réalisées sur les assemblages testés en laboratoire.

PROPOSITION ET CALIBRATION

Les principes suivants ont gouverné la mise au point des méthodes de calcul de rigidité :

- Le jeu observé lors des essais en laboratoire varie entre 0 et 1 mm (en moyenne 0,5 mm)
- Une fois le jeu d'assemblage consommé le glissement relatif des pièces assemblées est dû à **l'écrasement en série des deux pièces** sous l'effet des contraintes de compression
- On peut ainsi calculer l'inverse de la rigidité de l'assemblage comme la **somme des inverses des rigidités** des deux pièces assemblées
- La rigidité apparente en compression **d'une des deux pièces** est :
 - Proportionnelle au module moyen d'élasticité en compression à l'angle du fil rencontré
 - Proportionnelle à la surface comprimée (avec éventuelle prise en compte d'une surface effective majorée)
 - Inversement proportionnelle à la hauteur de bois comprimée

Ainsi on peut écrire de façon générale : $\frac{1}{k_{ser,assemblage}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{ser,pièce 1}} + \frac{1}{k_{ser,pièce 2}}}$ Et : $k_{ser,pièce} = k \times \frac{S}{h} \times E_{\alpha,mean}$

Avec : $k_{ser,pièce}$ Rigidité apparente en compression d'une pièce
 $E_{\alpha,mean}$ Module moyen d'élasticité en compression à l'angle du fil rencontré [MPa]
 S Surface comprimée [mm²]
 h Hauteur comprimée [mm]
 k Eventuel coefficient de calibration et de prise en compte d'une surface effective majorée

En adaptant ces écritures générales aux assemblages par embrèvement, tenon-mortaise et queue d'aronde, on a abouti aux formules présentées dans la section « 4. Méthodes de dimensionnement avancées » du présent Guide. En confrontant ces formules aux mesures effectuées en laboratoire, on obtient les comparaisons suivantes.

Résultat	Unité	Embrèvement								Tenon-mortaise			
		Série 1	Série 5	Série 6	Série 7	Série 17	Série 9	Série 13	Série 14	M17550	M22550	M22575	E17575
Calcul	kN/mm	32,4	48,6	86,5	38,9	43,2	47,6	53,5	95,2	13,0	13,5	12,4	12,3
Mesure	kN/mm	42,2	45,5	77,2	52,0	39,7	68,3	63,9	78,1	10,4	11,5	15,6	8,9
Calcul/mesure	%	77%	107%	112%	75%	109%	70%	84%	122%	125%	117%	80%	138%

Tableau 19 – Comparaison des rigidités calculées et mesurées des assemblages par embrèvement et tenon-mortaise

Selon le calcul de structure réalisé (résistance ou déformation) une faible rigidité est optimisante ou pénalisante. Ainsi il n'y a pas nécessairement d'intérêt à calibrer les formules pour tenter de se mettre « du côté de la sécurité » et l'on peut considérer que les formules proposées suffisent à une estimation raisonnable de celle-ci.



DIMENSIONNEMENT A FROID DES ASSEMBLAGES TRADITIONNELS 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 dimensionnement à froid des assemblages traditionnels de structures bois (embrèvements, queues d'arondes, tenon-mortaise, chevilles).

Pour chaque technique d'assemblage, le lecteur trouvera dans les différentes parties de ce guide des méthodes de dimensionnement simples, des exemples de calcul complets et des tableaux de valeurs basés sur ces méthodes simples, ainsi que des méthodes de dimensionnement avancées. 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 :

