LES ENCASTREMENTS DANS LES STRUCTURES EN BOIS LAMELLÉ

Recommandations pour la conception, le calcul et la réalisation

Note N° 11
Février 2016

Fédération de l'Industrie Bois Construction
SNBL - Commission technique
Document professionnel

Les assemblages encastrés sont très utilisés depuis l'apparition du bois lamellé collé et son emploi dans les structures de bâtiment. Constamment, cette technique d'assemblage s'est améliorée et ce grâce aux retours d'expérience, à l'évolution des règles de calcul et aux progrès dans la fabrication et l'usinage. Aujourd'hui, plusieurs dizaines de milliers d'ouvrages tant en France qu'à l'étranger ont été réalisés sans aucuns problèmes avec des encastrements. On retrouve principalement ce type d'assemblage dans :

- Les reins de portiques
- Les joints de continuité
- Les pieds de poteaux

Structure en portique

Rein de portique encastré

Le changement récent de code de calcul (passage des CB71 à l'Eurocode 5 aux états limites) pour dimensionner les ouvrages bois et les assemblages, modifie profondément les pratiques. En effet, l'Eurocode 5 introduit des rigidités jusqu'alors peu utilisées pour calculer les contraintes et les déformations des structures. La notion d'encastrement est donc surfaite et on parle d'assemblages semi-rigides dans la mesure où il existe dans tous les cas une rotation relative des deux éléments bois.

C'est pourquoi le SNBL avec sa commission technique a pris l'initiative d'élaborer cette note afin de donner des outils aux concepteurs, bureaux d'études et entreprises concernées permettant de réaliser des encastrements de bonne facture dans les structures en bois lamellé.

FIBC
L'Industrie Bois Construction

Note N° 11
Février 2016

SOMMAIRE

I. CONCEPTION DES ASSEMBLAGES 3
I. 1. Choix d'un assemblage 3
I. 2. Les assemblages encastrés en construction bois 5
I. 3. Caractéristiques des matériaux, normes 6

II. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES DES ENCASTREMENTS 7
II. 1. Les précautions à prendre 7
II. 2. Usinage et mise en œuvre 14
II. 3. Serrage des boulons dans un assemblage encastré 14
II. 4. Protection des assemblages 15

III. CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN ENCASTREMENT 16
III. 1. Principes de fonctionnement de quelques encastrements 16
III. 1. a. Principe de fonctionnement d'un assemblage de rein de portique 16
III. 1. b. Principe de fonctionnement d'un assemblage de continuité 17
III. 1. c. Principe de fonctionnement d'un assemblage de pied de poteau 18
III. 2. Vérification des sections 19
III. 2. a. Vérification du cisaillement dans la zone d'assemblage 19
III. 2. b. Vérification du fendage engendré par l'effort tranchant dans l'assemblage 19
III. 3. Calcul des modules de glissement 20
III. 3. a. Module de glissement des organes de fixation 20
III. 3. b. La rigidité de rotation K_w 20
III. 3. c. Le module de glissement angulaire sécant 21
III. 3. d. Rigidité d'un assemblage 23
III. 4. Répartition des efforts 24
III. 5. Vérification des fixations 25
III. 5. a. Vérification de la résistance des organes 25
III. 5. b. Vérifier la résistance de bloc suivant l'Eurocode 5 26
III. 5. c. Vérifier la résistance au feu de l'assemblage suivant la NF EN 1995-1-2 si nécessaire 26

ANNEXE A: VÉRIFICATION D'UN ASSEMBLAGE SELON L'EUROCODE 5 27

ANNEXE B: BIBLIOGRAPHIE 37

I. CONCEPTION DES ASSEMBLAGES

I. 1. Choix d'un assemblage

Lors de la création d'une structure, le concepteur doit faire des choix quant au fonctionnement mécanique du système porteur et donc sur la nature des liaisons. Alors encastrement, appui simple ou articulation ? Quels sont les critères de choix ?

De manière impérative, il faut veiller aux points suivants :

1. **La structure doit être stable dans ses différents plans** (pas de mécanisme) : un portique ou un arc par exemple ne doivent pas comporter plus de 3 articulations pour assurer la stabilité.
2. **La structure doit être transportable** : au delà de 35 à 40 mètres, les éléments doivent être fractionnés et des encastrements de type joint de continuité sont généralement à prévoir.
3. **La hauteur dépend du type d'assemblage** : Les efforts influent sur la hauteur mais aussi la taille et le nombre d'organes que comporte la liaison. Ainsi un encastrement qui demande plus de boulons qu'une articulation augmentera la quantité de bois pour respecter les règles de pinces minimales.
4. **L'équilibre des pièces doit être assuré** : on préférera un double cisaillement n'engendrant aucune rotation perpendiculaire au plan des portiques.

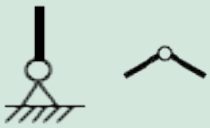
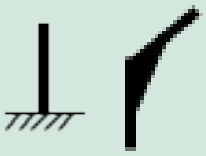
Type de liaison	Caractéristiques de la liaison
Appui simple ou glissant	• **Principe de fonctionnement :** Un élément reporte sa charge perpendiculairement (appui libre) • **Modélisation en 2 dimensions :** Suppression d'un degré de liberté en translation (perpendiculaire à l'appui) - 1 force (perpendiculaire à l'appui) - 1 inconnue dans les équations d'équilibre • **Avantage :** Évite des efforts de poussée.
Liaison articulée 	• **Principe de fonctionnement :** Le mouvement angulaire d'une pièce par rapport à une autre est permis. • **Modélisation en 2 dimensions :** Suppression de deux degrés de liberté en translation - 2 efforts à reprendre : • 1 effort de traction ou de compression : $\mathbf{N_d}$, • 1 effort tranchant : $\mathbf{V_d}$, - 2 inconnues dans les équations d'équilibre • **Avantage / inconvénient :** Amincissement local possible lié à l'absence de moment à transmettre
Liaison encastrée 	• **Principe de fonctionnement :** Rotation empêchée entre deux éléments : le moment se transmet intégralement de l'un à l'autre. • **Modélisation en 2 dimensions :** Suppression des trois degrés de liberté - 2 Efforts et 1 Moment à reprendre : • 1 effort de traction ou de compression : $\mathbf{N_d}$, • 1 effort tranchant : $\mathbf{V_d}$, • 1 moment fléchissant : $\mathbf{M_d}$ - 3 Inconnues dans les équations d'équilibre • **Avantage :** Possibilité de transmettre les moments. • **Inconvénient** Ajout local de matière pour disposer les organes d'assemblage et reprendre le cisaillement.
Assemblages semi-rigides	Le comportement réel des assemblages bois est en réalité intermédiaire entre les deux comportements extrêmes supposés, à savoir articulations et encastrements. Ce caractère intermédiaire du comportement des assemblages est appelé « **semi-rigidité** ». Lors de la modélisation de la structure ces assemblages sont représentés par des ressorts qui associent une rigidité de translation et une rigidité rotationnelle. Les Eurocodes en ont introduit le concept. ***Remarque :*** Ce concept ne peut être appliqué qu'après un calcul au 1er ordre (liaison articulée ou encastrée). Voir chapitre III.

Tableau 1 : Rappel des différents principes d'assemblages possibles

I. 2. Les assemblages encastrés en construction bois

Le tableau ci-dessous présente les principaux types d'assemblages encastrés rencontrés en construction bois.

Type d'encastrement	Description	Traditionalité et méthode de dimensionnement
Les encastrements par tiges (boulons, broches, pointes…)	Constitués généralement par deux éléments en lamellé collé moisant un élément central. Cas courant : poteau moisant la traverse ou l'arbalétrier. Organes d'assemblages : broches ou boulons travaillant en cisaillement.	Technique courante utilisée depuis des décennies. Dimensionnement prévu dans les codes de calcul actuels.
Les encastrements par goussets en contreplaqué, LVL ou métalliques	Goussets latéraux assurant la transmission des efforts et du moment entre les éléments assemblés. Assemblage : collé, vissé, riveté ou cloué, ou encore collé-cloué, collé-vissé…	Technique utilisée par le passé pour les structures de faibles portées. Dimensionnement fait dans les CB71 pour certains matériaux sur la base d'essais et de calculs complémentaires. L'Eurocode 5 n'envisage pas la vérification des flasques collés qui doivent faire l'objet d'une évaluation technique au cas par cas. **NON traitée par ce document.**
Les encastrements par goujons collés	Tiges de grandes longueurs insérées et collées à l'intérieure des poutres. Assemblage : par tiges filetées ou fer à béton disposés de manière à travailler à la traction ou à la compression.	Technique non traditionnelle et qui a fait et fait toujours l'objet de recherches. Relève de l'Avis Technique définissant le dimensionnement et l'usage. **NON traitée par ce document.**
Les encastrements par entures de grande dimension	Les entures intéressent toute la section transversale des pièces à assembler. La réalisation de reins de portiques est souvent réalisée avec une pièce d'angle intermédiaire et enturée reliant le poteau avec la traverse.	Technique normalisée par la norme EN14080 mais rare en France car demandant des outils spécifiques et ayant des capacités limitées. En pratique cette technique relève d'une évaluation technique (AT, ETE). **NON traitée par ce document.**

Tableau 2 : principaux types d'encastrement rencontrés en construction bois

Dans tous les cas de figure, ces assemblages sensibles aux variations dimensionnelles ne doivent être utilisés qu'en classe de service 1 ou 2 dont la définition est rappelée ci-dessous.

Classe de service 1 : caractérisée par une teneur en humidité dans les matériaux qui correspond à une température de 20 °C et à une humidité relative de l'air ambiant ne dépassant 65 % que quelques semaines par an (7 %<H<13%).

Classe de service 2 : caractérisée par une teneur en humidité dans les matériaux qui correspond à une température de 20 °C et à une humidité relative de l'air ambiant ne dépassant 85 % que quelques semaines par an (13 %<H<20%).

Pour les bâtiments dont l'humidité moyenne stabilisée est inférieure à 7 %, il conviendra de mener une étude particulière.

I. 3. Caractéristiques des matériaux, normes

Les matériaux utilisés doivent impérativement être conformes aux normes et réglementations en vigueur. L'utilisation d'essences peu nerveuses (à faible taux de rétractibilité) est recommandée.

Matériaux / Produits		Normes et certifications associées
Lamellé collé		NF EN 14080 (CE) ACERBOIS GLULAM (certification de qualité)
Assemblages	Tiges	NF EN 14592
	Rondelles	NF EN 1995-1-1 §10.4.3(2)
	Anneaux et crampons	NF EN 912 et NF EN 14545
Matériaux de renfort	Contreplaqué	NF EN 13986 (CE) et NF EN 12369-2 (résistance) CTBX (certification de qualité)
	LVL	NF EN 14374 (CE). Résistances données par les fabricants

Tableau 3 : Normes et certifications de référence des matériaux utilisés

Le concepteur se reportera aussi aux propriétés des matériaux décrites dans la Section 3 de l'Eurocode 5.

II. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES DES ENCASTREMENTS

II. 1. Les précautions à prendre

II. 1. a. En rein de portique

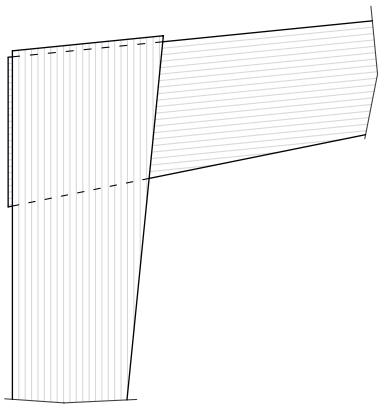


Figure 1 : Orientation du fil du bois

L'encastrement poteau-traverse est l'un des plus délicats à réaliser car il assemble des pièces de bois dont les fils sont croisés.

Puisque l'on bloque le retrait-gonflement avec les boulons, il faut que les variations dimensionnelles des pièces soient compatibles entre elles. Or le coefficient de rétractabilité du bois pour une variation de 1 % d'humidité du bois est :

- 0,25 % dans le sens transversal
- 0,01 % dans le sens longitudinal

On essaiera donc de limiter les dimensions des pièces et les variations du taux d'humidité des bois.

	Couronne **SANS** système de répartition et /ou de frettage	Couronne **AVEC** système de répartition et /ou de frettage
Bâtiments non chauffés *(13 %<H<20%)*	Diamètre maximal de Couronne D < 0,90 m	Diamètre maximal de Couronne D < 1,30 m
Bâtiments chauffés *(10 %<H<13%)*	Diamètre maximal de Couronne D < 0,80 m	Diamètre maximal de Couronne D < 1,20 m

Tableau 4 : Recommandations de diamètre maximaux des couronnes

Pour les bâtiments très secs, (H<10%), des dispositions spécifiques sont nécessaires. Elles devront être définies par une étude adaptée (par exemple : frettage, épaisseur des lamelles, humidité de fabrication et de mise en œuvre, etc.)
Pour les couronnes sans frettage, il conviendra de se limiter à un ratio h/b ≤ 11, notamment pour les moises.
Pour les couronnes avec frettage, il conviendra de se limiter à un ratio h/b ≤ 15, notamment pour les moises. En cas de frettage par vis, l'épaisseur des moises devra être suffisante.
h = hauteur de la poutre (moise ou arbalétrier)
b = épaisseur de la poutre (moise ou arbalétrier)

Les dispositions courantes d'organes sont présentées sur les figures ci-dessous :
Le type « a » présente plus de risque de fendage du bois à cause de la combinaison de cisaillement et de traction transversale qui se crée sur la ligne de boulons.
Le type « b » est très fréquemment utilisé et peut contenir deux couronnes de boulons selon les efforts à transmettre.

Au niveau des plans de cisaillement, à l'intérieur de l'assemblage, les boulons peuvent être combinés avec des crampons (2 x simple face) qui accroissent considérablement la résistance en cisaillement.

Le détail des calculs est présenté ultérieurement.

Lors de l'utilisation de broches, on veillera à associer un système de serrage (boulons passifs, vis, etc.) afin d'éviter une éventuelle ouverture latérale.

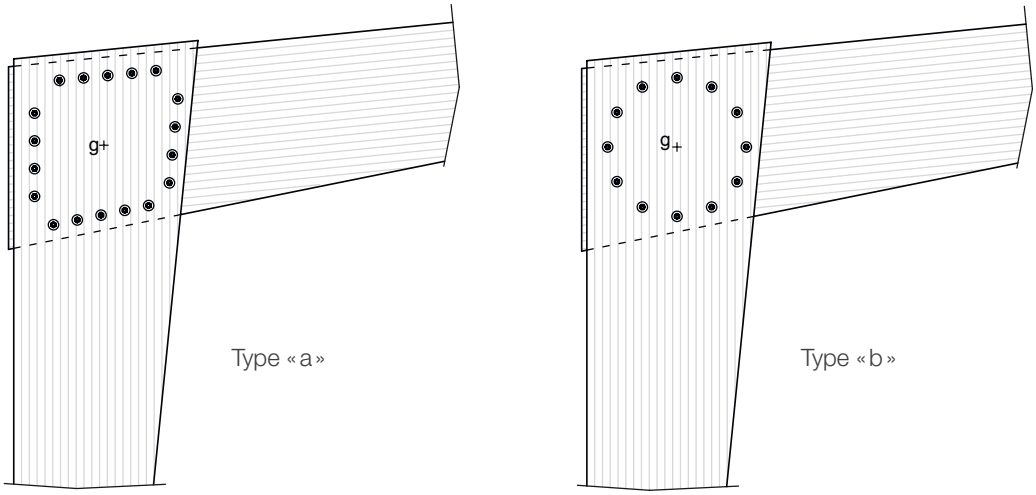


Figure 2 : Différents types de couronnes de boulons

II. 1. b. Couronnes avec système de répartition des contraintes et/ou de frettage

Le risque de fendage des assemblages en rein de portique peut être limité par un frettage qui assure la cohésion de la matière au niveau de l'assemblage et contribue ainsi à éviter la fissuration sous l'influence de la rétractibilité. Dans l'état actuel des règles de dimensionnement, la contribution des dispositifs de frettage sur le comportement individuel des tiges n'est pas prise en compte (gain…). En 2012, le SNBL a confié une étude sur le sujet à l'I2M (Université de Bordeaux 1) qui a mis en évidence un possible gain.

Les plaques de répartition contribuent à distribuer de manière plus homogène les contraintes et il en est de même de l'ajout de pointes torsadées disposées autour des boulons (satellites).

Système de répartition	Matériaux et dimensions	Avantages et inconvénients
Frettage par vis totalement filetée	Vis conformes à la norme NF EN 14592 avec filetage total et 6≤d≤12 mm.	***Avantages :*** - Dimensionnement couvert par l'Eurocode 5 §8.7.2. - Économique. ***Inconvénient :*** - La piece frettee devra avoir une epaisseur minimale suffisante.
Frettage par tige vissée de grande longueur	Vis ou tige simple ou à double pas, auto-serrante ou non, nécessitant ou pas de pré-perçage.	***Avantages :*** - Dimensionnement selon évaluation technique (ETE ou AT par exemple). - Économique. ***Inconvénient :*** - La piece frettee devra avoir une epaisseur minimale suffisante.
Plaque de répartition	Contreplaqué structural ou LVL Épaisseur mini 18 mm. Surface complète.	Usinage simple et débouchant par engravure. Renforcement invisible contrairement à des flasques en contreplaqué.
Frettage par bande	Contreplaqué structural ou LVL Épaisseur mini 18 mm. Largeur minimale de la bande 200 mm.	Usinage simple et débouchant par rainure ou engravure.
Frettage par tige collées	Tiges filetées métalliques ou fers à béton f12 à f20 minimum dans percement ou gorge. Colle : époxy ou PU	Des précautions sont à prendre pour la fabrication : dégraissage des tiges, bois sec, trou d'échappement de la colle pour un bon remplissage, etc. Dans le cas de perçage, la longueur est limitée.

Tableau 5 : Différents systèmes de répartition

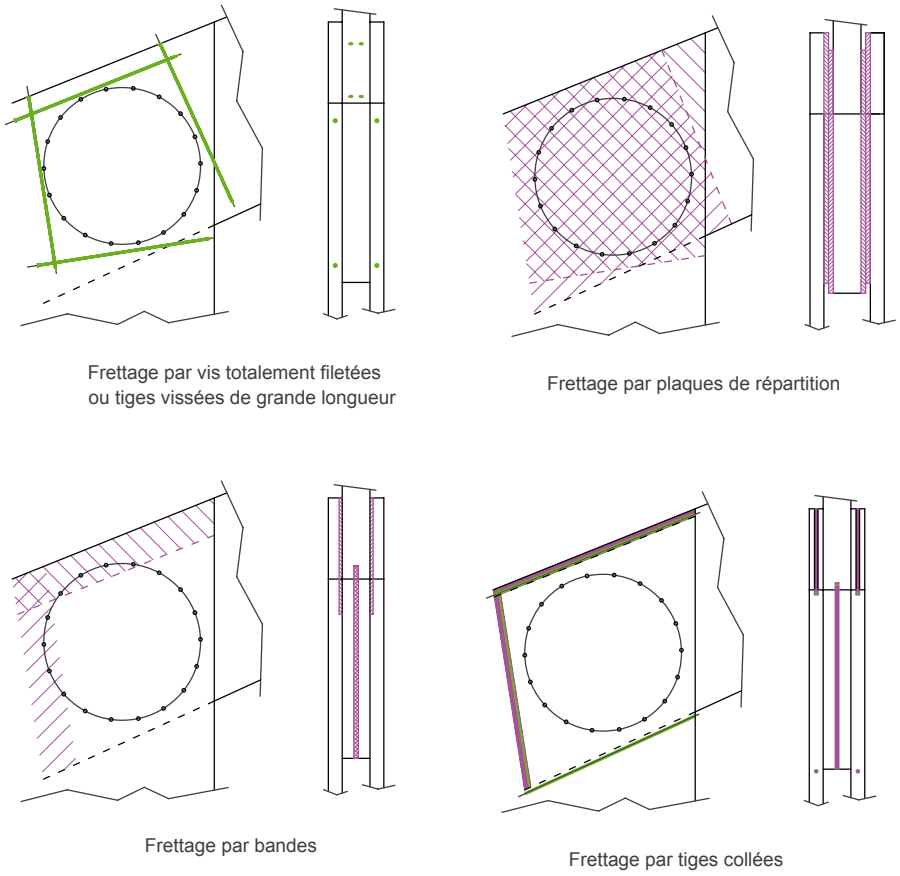


Figure 3 : Différents systèmes de répartition

La combinaison de 2 types de renforts peut être mise en œuvre (simultanément) : plaque de répartition et frettage. Mais il faut veiller, dans tous les cas à conserver la symétrie de l'assemblage pour un bon équilibre mécanique.
Dans tous les cas, il faut s'assurer que l'humidité de fabrication du bois lamellé soit le plus proche possible de l'humidité d'équilibre en exploitation et qu'elle soit maintenue tout le long de la phase chantier.

Ces dispositions de frettage et de répartition des contraintes, si elles ne réduisent pas la fissure à néant, autorisent le développement de fissures superficielles.

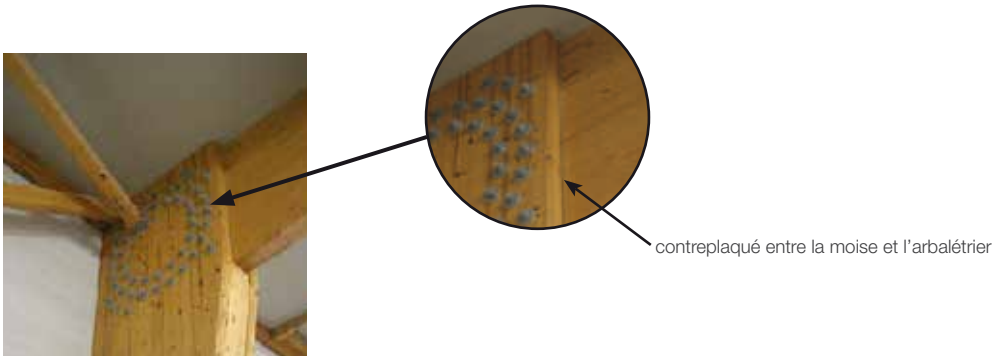


Figure 4 : Exemple de plaque de répartition

II. 1. c. En joint de continuité

Le joint de continuité peut être réalisé de nombreuses manières, les plaques pouvant être situées à l'extérieur du bois (comme sur les schémas ci-dessous) ou à l'intérieur (disposition analogue mais la ferrure est en âme). Les assemblages à plans de cisaillement multiples (plus d'une plaque en âme) ne sont pas traités dans ce document. On se reportera au chapitre 8.1.3 de l'Eurocode 5.

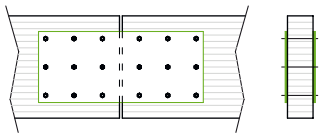


Figure 5 : Joints de continuité par plaque toute hauteur

Les plaques métalliques toute hauteur conviennent dans le cas de bois ne dépassant pas 500 mm de haut car cela pose un problème de retraits différentiels entre acier et bois.

On préférera les configurations en deux parties utilisant deux plaques métalliques basses et hautes intérieures ou extérieures.

Dans ce cas, une variante est possible pour dissocier la transmission des efforts internes dans l'assemblage (figure 5 droite). Les deux plats précédemment évoqués doivent voir leur inertie diminuée au niveau des coupes de bois et il faut leur adjoindre une plaque centrée en hauteur sur la poutre destinée à transmettre l'effort tranchant.

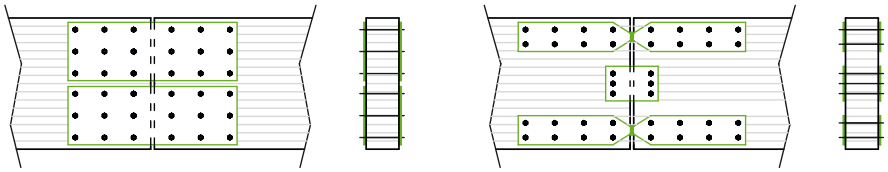


Figure 6 : Joints de continuité en deux parties

Ce dispositif fonctionne aussi bien en âme que sur les flancs de la poutre.
Voir aussi la note n°12 du SNBL «Les charpentes en bois lamellé - Recommandations Professionnelles» (2016) pour les dispositions constructives et la vérification de la section nette du bois.

Dans la pratique, le joint de continuité doit être prévu, dès que cela est possible, dans la zone de moment nul (ou faible). Son dimensionnement doit être réalisé suivant les différents cas de charges (symétriques ou non) pour résister à un certain niveau de sollicitations (moment, efforts tranchant et normal). Il y a deux approches pour fixer les niveaux de sollicitation :

- La première approche est de dimensionner l'assemblage en capacité pour privilégier la rigidité de l'assemblage. Cette méthode a été développée au début des années 1970 [Guide Pratique des Charpentes en Bois Lamellé Collé], lorsque les moyens de calculs étaient limités. Elle a l'avantage de converger, le plus souvent, à la première itération. Elle se base sur le moment résistant théorique de la section M_r, le moment et l'effort normal résultat du modèle mécanique M_d et N_d, pour déterminer le moment minimum à reprendre par l'assemblage M_e.

$$Mr = \frac{k_{mod}}{\gamma_m} \cdot f_{m,k} \cdot \frac{b.h^2}{6}$$

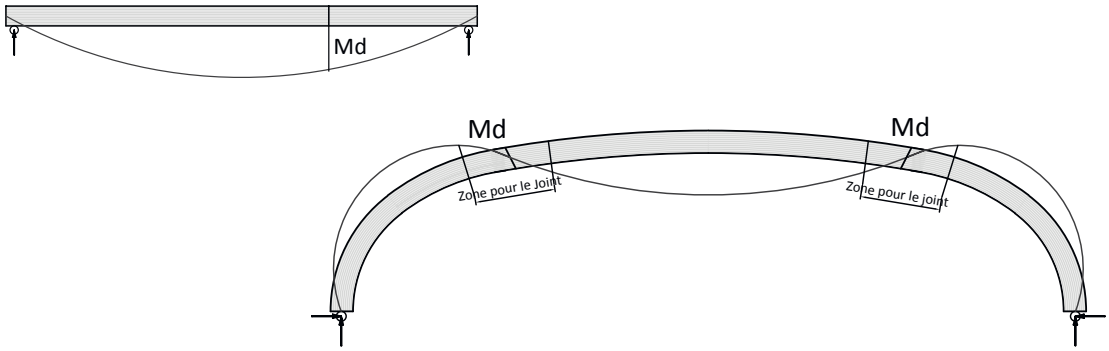


Figure 7 : Exemples d'emplacements du joint de continuité

Configuration	valeurs limites de M_d	valeurs de M_e
Poutres et arcs isostatiques	Si $M_d<0,8.M_r$	$M_e=0,8.M_r$
	Si $M_d\geq0,8.M_r$	$M_e=M_d$
Poutres et arcs hyperstatiques N_d=0 ou de traction	Si $M_d<0,5.M_r$	$M_e=0,5.M_r$
	Si $M_d\geq0,5.M_r$	$M_e=M_d$
Poutres et arcs hyperstatiques N_d de compression	***Cas où M_d < 0,5.Mr :*** si $0,5.M_r/N_d < h/6$ ----------→ si $h/6\leq0,5.M_r/N_d \leq h/3$ ----------→ si $0,5.M_r/N_d > h/3$ ----------→	 $M_e=\min(0,2.M_r ;M_d)$ $M_e=\min(0,4.M_r ;M_d)$ $M_e=0,5.M_r$
Poutres et arcs hyperstatiques N_d de compression	***Cas où $M_d \geq 0,5.Mr$:*** si $0,5.M_r/Nd < h/6$ ----------→ si $h/6 \leq 0,5.M_r/N_d \leq h/3$ ----------→ si $0,5.M_r/N_d > h/3$ ----------→	 $M_e=\min(0,6.M_r ;M_d)$ $M_e=\min(0,8.M_r ;M_d)$ $M_e=M_d$

Tableau 6 : Valeurs limites de M_d et valeurs de M_e

Les moments ci-dessus doivent être majorés de 25 % s'il existe 2 joints dans le même élément.

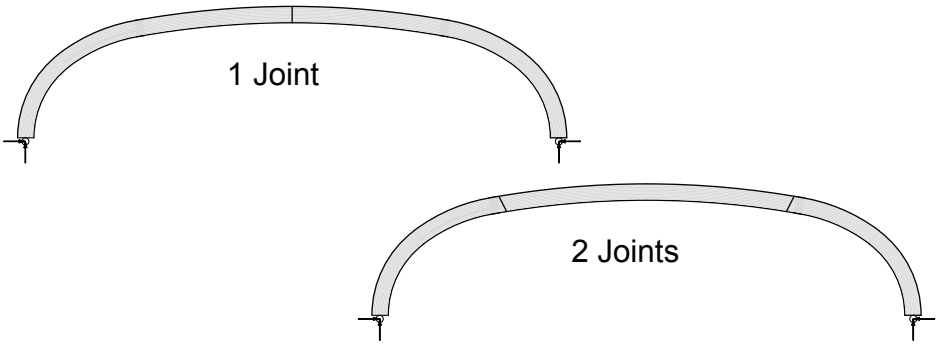


Figure 8 : Configurations à 1 joint et à 2 joints

- La deuxième approche est d'utiliser directement les valeurs de sollicitations données par le modèle mécanique de la structure pour dimensionner le joint (calcul en résistance). Il conviendra de réaliser 2 modèles mécaniques en ELU pour déterminer les sollicitations maximum générées au niveau de l'assemblage. Un premier modèle avec la raideur du joint calculée conformément à l'Eurocode 5 (K_u=2/3.K_{ser}) « joint souple », et un second modèle avec la raideur K_u pris égal à K_{ser}.

II. 1. d. En pied de poteau encastré

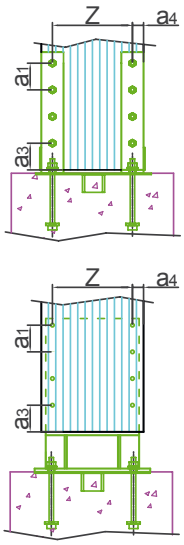


Figure 9 : Pieds de poteaux encastrés

Un assemblage encastré en pied de poteau demande des attentions particulières. Lorsqu'il est prévu en extérieur, il doit être conçu de manière à rester en classe de service 2 (capotage, etc.).

Comme pour les joints de continuité, il est préférable de mettre en œuvre deux plaques (figure du haut) plutôt qu'une plaque unique (figure du bas) dans la mesure où la liaison avec le béton bloque les déplacements des plaques et donc empêche le retrait ou le gonflement de la pièce de bois.
Sa dimension doit être limitée de la même manière que pour un joint de continuité.

II. 2. Usinage et mise en œuvre

Pour que les assemblages fonctionnent de manière satisfaisante et que le montage sur chantier reste possible, on prévoit les diamètres de trous dans les éléments à assembler comme dans le tableau ci-dessous (d étant le diamètre de l'organe).

	Assemblage BOIS/BOIS	Assemblage BOIS/METAL	
		Perçage dans le bois	Perçage dans le métal
BOULONS	d+1 mm	d+1 mm	d+1 mm
BROCHES	≤ d	≤ d	d+1 mm

Tableau 7 : Diamètres de perçages

Voir chapitre 10.4 de l'Eurocode 5. Notons que ce jeu correspond au Δu_f expliqué au chapitre III.3.3.

Du côté du bois, les rondelles mise en œuvre doivent avoir les dimensions minimales suivantes en mm :

Boulons	Diamètre	12	16	18	20
Rondelles	Diamètre	36	48	54	60
	Épaisseur	3,6	4,8	5,4	6,0

Tableau 8 : Diamètres des rondelles

II. 3. Serrage des boulons dans un assemblage encastré

Figure 10 : Exemple de couronne de boulons

En règle générale, des boulons sont utilisés dans ce type d'assemblages en complément de broches ou d'anneaux et ce afin d'éviter un éventuel problème d'ouverture (séparation latérale des éléments assemblés).

Les boulons utilisés sont des boulons courants pour charpentes et peu souvent des boulons HR qui exigent des couples de serrage spécifiques. Il est important de noter que le serrage contrôlé n'est pas applicable du fait des variations dimensionnelles du bois. Ces boulons sont généralement montés avec des rondelles plates ou grower et parfois avec contre-écrou.

La méthode classique de serrage est celle dite du « tour d'écrou », c'est à dire un tour supplémentaire après établissement du contact.

Après un premier serrage de tous les boulons, on doit procéder à une vérification de l'ensemble.
Dans les bâtiments à atmosphère sèche, il convient de conseiller au maître d'ouvrage ou à son utilisateur de faire procéder à une vérification après la première année et de façon régulière.

II. 4. Protection des assemblages

Les précautions à prendre en phase montage

Toutes les précautions doivent être prises au transport, au stockage sur chantier et au levage afin d'éviter les détériorations et la reprise d'humidité des éléments en bois lamellé.

Une attention particulière est à apporter à la protection des parties à encastrer (par exemple bâchage localisé).

On veillera également à ne pas assembler des pièces présentant des écarts d'humidité trop importants ($\Delta H \leq 5\%$).

Voir les chapitres 10.2 et 10.3 de l'Eurocode 5.

III. CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN ENCASTREMENT

III. 1. Principes de fonctionnement de quelques encastrements

III. 1. a. Principe de fonctionnement d'un assemblage de rein de portique

Une couronne fonctionne et son intégrité ne peut être assurée que si les espacements minimum et les distances minimum aux bords sont respectés. Les pinces (a1, a3 et a4) indiquées ci-dessous sont les minima préconisés par l'Eurocode et peuvent être augmentées en fonction de l'étude et de la modélisation.

	Boulons Broches	Anneaux	Crampons C1 à C9	Crampons C10 à C11
a_1	5d	2d	1,5d	2d
a_3	max (7d, 80 mm)	2d	1,5d	2d
a_4	4d	0,8d	0,8d	0,8d
a_{corde}	6d	2d	1,5d	2d
a_r	5d	2d	1,5d	2d

Tableau 9 : Espacements et distances aux bords minimaux

Le schéma de répartition des efforts de flexion sur chaque organe est présenté ci-dessous, quelque soit la forme de l'assemblage : circulaire ou en parallélogramme

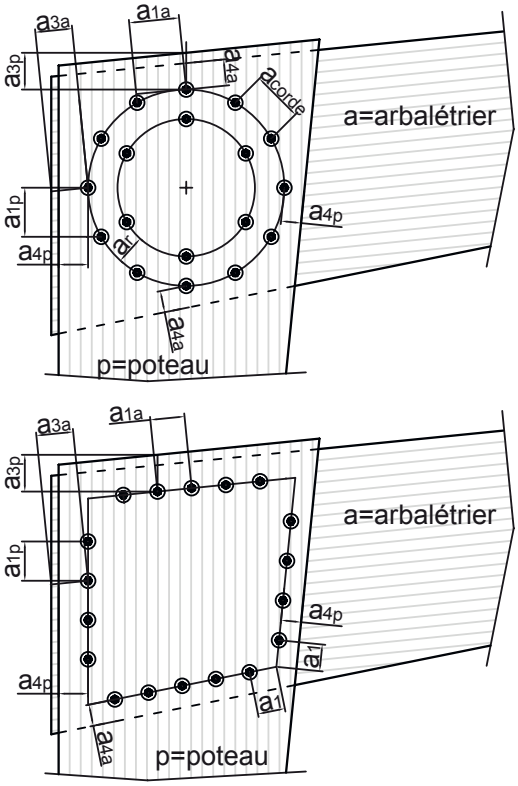


Figure 10 : Espacements et distances aux bords minimaux

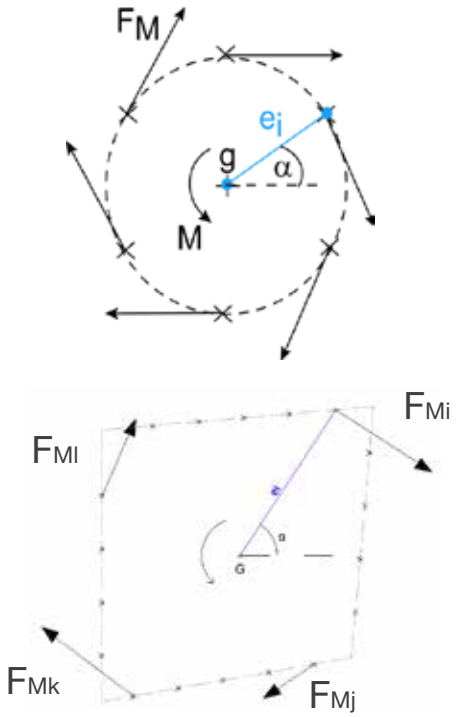


Figure 11 : Exemples de représentation vectorielle des efforts dus au moment fléchissant

III. 1. b. Principe de fonctionnement d'un assemblage de continuité

Dans le cas d'un assemblage de continuité, les espacements minimum et les distances minimum aux bords doivent être respectés comme le paragraphe précédent pour assurer un bon fonctionnement. Une condition supplémentaire apparaît : la distance a_2, entre deux files d'organes (perpendiculairement au fil du bois).

	Boulons	Broches	Anneaux	Crampons C1 à C9	Crampons C10 à C11
a_2	4d	3d	1,2d	1,2d	1,2d

Tableau 10 : Distances entre 2 files d'organes (perpendiculairement au fil du bois)

Lors de la conception, et dès que ceci est possible, le joint de continuité doit se trouver préférablement dans une zone de moment nul ou le plus faible pour le cas de charge retenu. Il convient de prendre en compte les efforts tranchants.

- Continuité par flasques bois ou métalliques extérieures ou par flasque métallique intérieure :

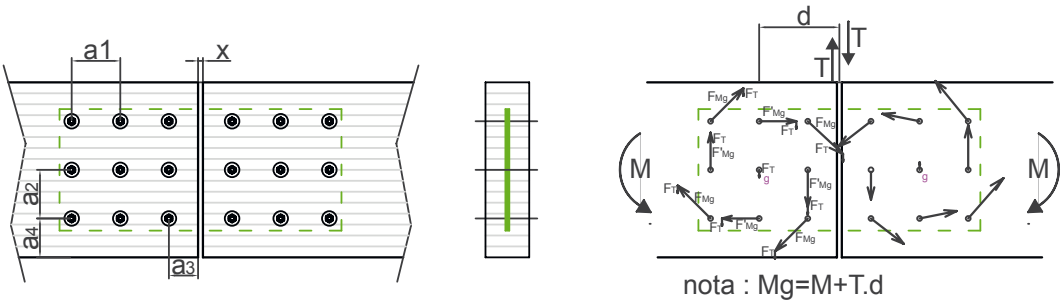


Figure 12 : Exemple de représentation vectorielle des efforts dus au moment fléchissant

Chaque partie (gauche ou droite) transmet l'intégralité du moment augmenté du moment d'excentrement. Ce moment d'excentrement est égal au produit de l'effort tranchant par la distance entre le centre de gravité et l'axe de l'attache.

- Continuité par profilés métalliques extérieurs ou intérieurs (plats ou ferrures en U) sur fibres extrêmes :

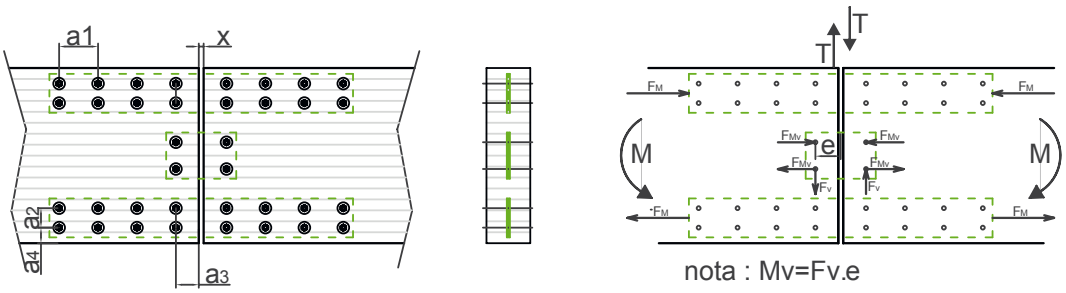


Figure 13 : Exemple de représentation vectorielle des efforts dus au moment fléchissant

Chaque partie (gauche ou droite) transmet l'intégralité du moment.

C'est la distance entre les centres de gravité des liaisons supérieures et inférieures qui détermine la part de moment à reprendre par la file.

Cette solution peut être déclinée avec les plaques en âme et une plaque aux environs de l'axe neutre destinée à transmettre l'effort tranchant.

III. 1. c. Principe de fonctionnement d'un assemblage de pied de poteau

Comme dans les cas précédents, l'assemblage de pied de poteau nécessite de respecter les espacements minimum et les distances minimum aux bords pour assurer un bon fonctionnement.

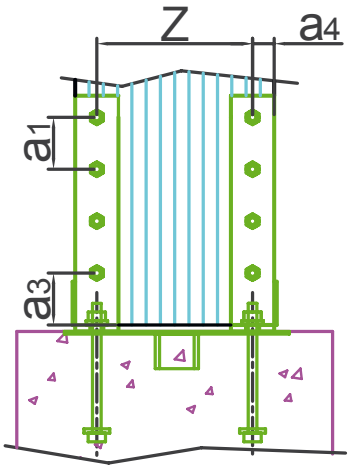


Figure 14 : Espacements et distances aux bords minimaux

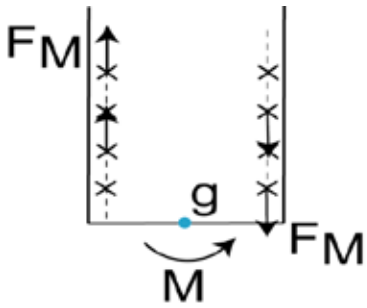


Figure 15 : Exemple de répartition vectorielle des efforts

Les efforts normaux et tranchants sont transmis aux fondations par les pièces métalliques.

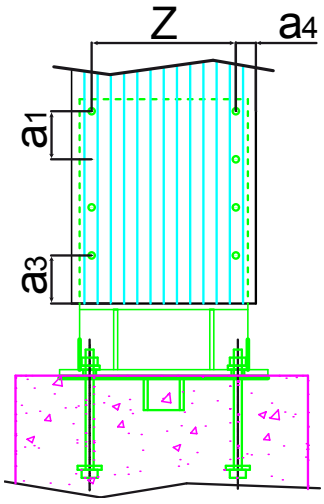


Figure 16 : Espacements et distances aux bords minimaux

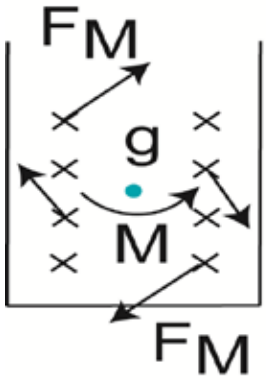


Figure 17 : Répartition vectorielle des efforts

Les efforts normaux et tranchants sont transmis aux fondations par la pièce métallique.

III. 2. Vérification des sections

III. 2. a. Vérification du cisaillement dans la zone d'assemblage

Il faut s'assurer que la contrainte de cisaillement peut bien être reprise par le bois :

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

τ_d = Contrainte de cisaillement (en MPa)
$f_{v,d}$ = Résistance de cisaillement (en MPa)

Pour une couronne de boulon, la contrainte de cisaillement induite par la combinaison d'action est selon l'article d'Heimeshoff(1977) égale à :

$$\tau_d = 3/2 \times \frac{\left(V_M - V_d/2\right)}{b_{ef} h}$$

V_M = Effort tranchant dû au moment de flexion
V_d = Effort tranchant dû à F_d
b_{ef} = épaisseur efficace de l'élément (k_{cr}.b)
h = largeur de l'élément au niveau de l'effort tranchant maxi (V_M - $V_{d/2}$)

Pour le cas d'un encastrement réalisé par 2 couronnes inscrites de rayon r1 et r2, composées respectivement de nombre n1 et n2 de fixations identiques, l'effort tranchant maximum dû au moment M_d peut-être pris égal à :

$$V_M = \frac{M_d}{\pi} \cdot \left(\frac{n_1 . r_1 + n_2 . r_2}{n_1 . r_1^2 + n_2 . r_2^2}\right)$$

III. 2. b. Vérification du fendage engendré par l'effort tranchant dans l'assemblage

Cette vérification s'effectue suivant le chapitre 8.1.4 de l'EC5.

Il convient de vérifier que :

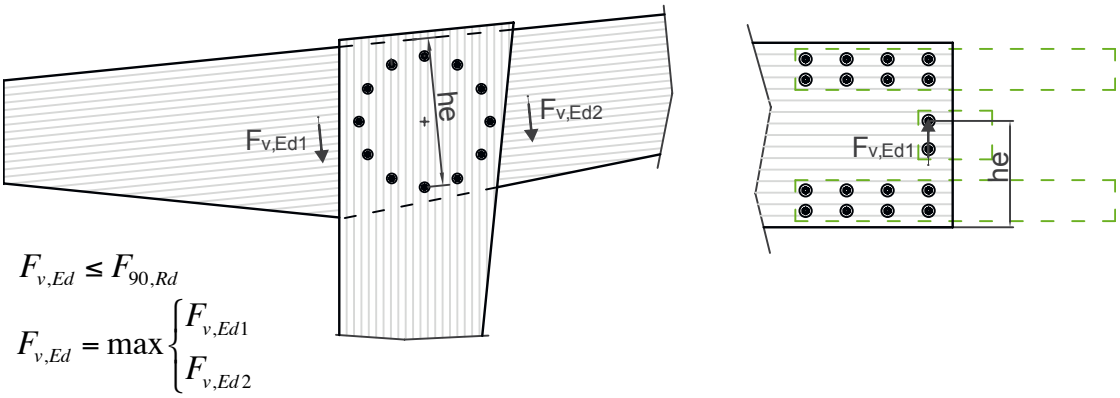


Figure 18 : Vérification du fendage

III. 3. Calcul des modules de glissement

III. 3. a. Module de glissement des organes de fixation

Pour prendre en compte le glissement des assemblages, on pourra utiliser les modules de glissement K_{ser} précisés dans le paragraphe 7.1 de la NF EN 1995-1-1.

Les modules de glissement K_{ser} dépendent du type d'organe utilisé et des masses volumiques des matériaux constitutifs de l'assemblage (voir tableau).

	Boulons sans jeu Broches	Anneaux	Crampons C1 à C9 (selon EN 912 et EN 14545)	Crampons C10 et C11 (selon EN 912 et EN 14545)
K_{ser} (en N/mm)	$\rho_m^{1,5} \times d / 23$	$\rho_m \times d_c / 2$	$1,5 \times \rho_m \times d_c / 4$	$\rho_m \times d_c / 2$

Tableau 11 : Modules de glissements en fonction du type d'assemblage

Si les matériaux assemblés n'ont pas la même masse volumique, on prendra :

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m1} \times \rho_{m2}}$$

Pour les assemblages bois/métal, **prendre $2K_{ser}$**

III. 3. b. Rigidité de rotation K_w

Couramment la modélisation des structures s'effectue en considérant les éléments ou barres encastrés ou articulés et le chapitre III.3.4 en détermine les conditions.

Toutefois, les rotations induites par la semi-rigidité des liaisons modifient le comportement de la structure et les longueurs de flambement. Si deux barres sont reliées entre-elles par un nœud semi-rigide, cela veut dire que le moment est transmis de la poutre au poteau selon une certaine **rigidité** qui sera associée (N x mm / rad).

Dans le cas d'une liaison semi-rigide, la **rigidité de rotation Kw** est définie comme le couple nécessaire pour engendrer une rotation de un radian :

$$K_{\omega,ser} = \sum_i K_{ser,i} . e_i^2$$

où e_i est le rayon entre le centre de rotation de l'assemblage et l'organe *i*

Bon nombre de logiciels de modélisation intègrent cette possibilité de rigidité rotationnelle dans les assemblages.

III. 3. c. Module de glissement angulaire sécant

Afin de prendre en compte les jeux initiaux dans les modélisations, on peut utiliser le module sécant de glissement **K'$_{ser}$**.

K'ser,i tient compte du jeu initial. Il est défini à partir de **K$_{ser,i}$** et du moment maxi des combinaisons ELS qui donne une rotation (Δ = Δui/ei) identique à celle d'un organe de fixation sans jeu.

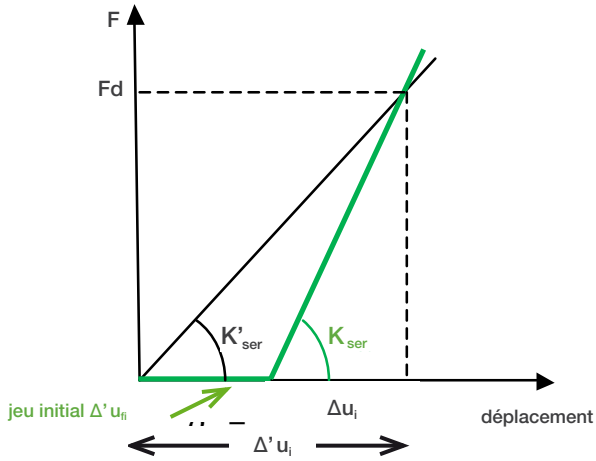


Figure 19 : Prise en compte du jeu initial

Pour un effort de service Fd,i et jeu initial Δu$_{f,i,}$ **K'$_{ser,\,i}$** est alors défini par :

$$K'_{ser,i} = \frac{F_{d,i} \cdot K_{ser,i}}{F_{d,i} + \Delta u_{fi} \cdot K_{ser,i}}$$

On peut alors déterminer les **modules de glissement angulaire sécant** de l'assemblage K'$_{w,u}$ et K'$_{w,ser}$ qui doivent être pris en compte respectivement pour le calcul aux ELU et aux ELS.

- **Aux ELU**

$$K'_{\omega,u} = \frac{2}{3} K'_{w,ser}$$

NF EN 1995-1-1 § 2.2.2. éq.2.1.

- **Aux ELS**

$$K'_{\omega,ser} = \sum_i K'_{ser,i} . e_i^2$$

Avec :
- e_i est la distance entre le centre de gravité de l'assemblage et l'organe de fixation i (en mm)
- K'$_{w,ser}$ est le module de glissement angulaire sécant de l'assemblage (en N.mm/rad). Il prend en compte le jeu initial.

Pour un assemblage sollicité par un moment M_d, on obtient donc :

$$K'_{w,ser} = \frac{M_d \cdot K_{w,ser}}{M_d + \sum(\Delta u_{fi} \cdot K_{ser,i} \cdot e_i)}$$

Compte tenu des tolérances d'usinage et de mise en œuvre des assemblages encastrés, le jeu initial n'est pas égal au jeu théorique. **Le jeu initial d'un organe de fixation peut être pris égal à la moyenne des jeux théoriques de chaque plan de cisaillement.**

Par exemple dans le cas d'un assemblage encastré boulonné d'un poteau moisé et d'un arbalétrier simple avec des boulons de diamètre 16 mm pour des perçages de diamètre 17 mm, on a :

- **Jeu théorique par plan de cisaillement** :
  jeu moise / boulon = 0,5 mm
  + jeu boulon / arbalétrier = 0,5mm, } soit un jeu théorique de 1 mm
- **Jeu initial par plan de cisaillement** : (0,5+0,5)/2 = **0,5 mm**
  Le jeu initial de l'organe d'assemblage est la moyenne des jeux initiaux des plans de cisaillement, soit Δ_{uf} **= 0,5 mm**.

Note 1: Pour les couronnes circulaires à organes de fixation identiques (Extrait AQCEN article 3.7.2.2), par simplification, on pourra directement considérer un jeu fonctionnel en rotation $\Delta_{\alpha f}$ défini à partir du **jeu fonctionnel** Δ_{uf} par :

$$\Delta_{\alpha f} \approx \frac{\Delta_{uf}}{e_{moy}} \quad \text{(en radians)}$$

e_{moy} étant le rayon moyen :

$$e_{moy} \approx \frac{\sum_i^n e_i}{n}$$

Et en déduire le module de glissement angulaire sécant :

$$K'_{w,ser} = \frac{M_d \cdot K_{w,ser}}{M_d + \Delta\alpha_f \cdot K_{w,ser}}$$

$K_{w,ser}$ est le **module de glissement angulaire <u>sans jeu</u>** (en N.mm)

Note 2: Dans le cas des arcs à trois articulations, il est important de prendre en compte l'incidence du glissement angulaire dont le Δ_{uf} sur les flèches au faîtage

Note 3 A partir de la raideur $K_{ser,i}$ de l'organe de fixation « i » et de la rigidité en rotation $K'_{w,ser}$ de l'assemblage, définies ci-dessus, on peut déterminer l'effort en service $F_{d,i}$ qui s'applique à l'organe « i » sous l'effet du moment M_d :

$$F_{d,i} = \left(\frac{M_d}{K'_{w,ser}} \cdot e_i - \Delta_{ufi} \right) \cdot K_{ser,i}$$

Il convient alors de vérifier pour chaque organe si $\mathbf{F_{d,i} \geq 0}$

Si Fd,i < 0 : l'organe « i » doit être considéré comme **non agissant** dans l'encastrement. **Il doit être supprimé de tous les calculs de rigidité**.

III. 3. d. Rigidité d'un assemblage

Suivant les points principaux précédemment cités, l'encastrement peut être subi ou choisi, reste ensuite à le modéliser.

Ce qui distingue une liaison encastrée d'une articulation, outre les aspects technologiques, c'est la rigidité rotationnelle $\mathbf{K'_{w,ser}}$ de l'assemblage (voir le chapitre II.3.b).

On admettra donc l'hypothèse* que le rapport entre cette rigidité rotationnelle et la rigidité en flexion des éléments assemblés caractérise l'assemblage, on l'appelle β, coefficient de rigidité :

$$\beta = \frac{K'_{w,ser}}{\left(E_{0,moy} I\right)/L}$$

avec : $\beta \leq 0{,}5$ → liaison articulée
$\beta \geq 8$ → liaison encastrée

** Clause 5.1 (4) P de l'Annexe Nationale de l'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-1/NA)*

Avec I, l'inertie « efficace » de la barre.

Ainsi, dans une modélisation simplifiée d'une structure filaire, ce critère permet de modéliser simplement les assemblages, rotule ou encastrement, afin de vérifier la structure.

Notons que les assemblages collés qui permettent de grandes rigidités sont non traditionnels et relèvent de l'Avis Technique. Il en est de même pour les poteaux encastrés directement dans le sol.

III. 4. Répartition des efforts

Les efforts à véhiculer sont de trois natures différentes :

- Effort de traction ou de compression : $\mathbf{N_d}$ (en N)
- Effort tranchant : $\mathbf{V_d}$ (en N)
- Moment fléchissant $\mathbf{M_d}$ (en N.m)

Pour les transmettre, les organes de liaison travaillent en cisaillement. Ce peut être des boulons, des broches, des anneaux ou encore des crampons.

Le moment de flexion qui passe dans l'assemblage induit un effort $\mathbf{F_M}$ perpendiculaire au rayon polaire $\mathbf{e_i}$ de l'organe i. On le calcule ainsi :

$$F_M = \frac{K_{u,i} \times e_i}{K_{w,u}} M_d$$

Avec :

$$K_{u,i} = \frac{2}{3} K_{ser,i}$$ est la rigidité de l'organe en N/mm (ELU)

$$K_{\omega,u} = \frac{2}{3} K_{w,ser}$$ est la rigidité de l'assemblage en N.mm

Attention : si l'assemblage comporte un jeu initial, il faut alors utiliser les modules **sécants**

$$K'_{u,i} = \frac{2}{3} K'_{ser,i} \quad \text{et} \quad K'_{\omega,u} = \frac{2}{3} K'_{w,ser}$$ à la place de $K_{u,i}$ et $K_{w,u}$.

Ces éléments sont détaillés ci-dessus.

Par ailleurs, lorsqu'il n'y a qu'**un seul type d'organe et sans jeu**, les efforts sont calculés comme suit :

$$F_M = \frac{M_d \times e_i}{I_p}$$ I_p est l'inertie polaire (mm²)

$$I_p = \sum_n e_i^2$$ e_i est défini ci-après (mm)

L'effort normal N_d et l'effort tranchant V_d sont supposés uniformément répartis entre les organes.

$$F_N = \frac{N_d}{n} \qquad F_V = \frac{V_d}{n}$$

On peut enfin, par projection et donc sommation vectorielle, calculer l'effort global qu'aura à reprendre chaque organe de la liaison.

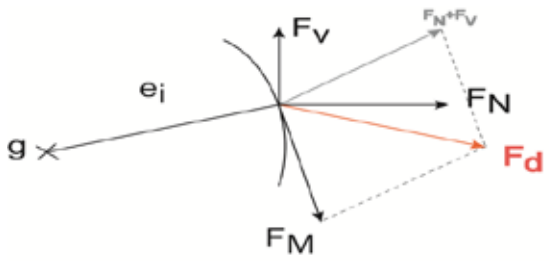


Figure 20 : Représentation Vectorielle de F_d

NB : Lorsqu'il y a plusieurs types d'organes d'assemblages «i» et «j», les équations générales suivantes sont à prendre en compte :

$$F_{N,j} = \frac{K_{u,j} \times N_d}{\sum K_{u,i} + \sum K_{u,j}} \qquad F_{V,j} = \frac{K_{u,j} \times V_d}{\sum K_{u,i} + \sum K_{u,j}}$$

Remarque : Ces solutions peuvent être simplifiées pour certaines configurations (couronnes circulaires et rectangles à entraxes réguliers) par celles proposées dans le STEP volume 1 - 1996 (sujet C16)

III. 5. Vérification des fixations

III. 5. a. Vérification de la résistance des organes

Pour chaque organe, on doit ensuite vérifier que l'effort appliqué F_d est moindre que la valeur de calcul de la résistance au cisaillement d'un organe. Notons que l'organe le plus sollicité est généralement dans un coin et le plus éloigné du centre de gravité de l'assemblage.

$$F_d \leq F_{v,Rd} = \frac{k_{mod} \times F_{v,Rk}}{\gamma_M}$$

K_{mod} est fonction de la durée de chargement de la classe de service

γ_M = 1,3 pour les assemblages

La vérification d'un assemblage par tige suivant l'Eurocode 5 est rappelée en Annexe.

III. 5. b. Vérifier la résistance de bloc suivant l'Eurocode 5

Il convient de vérifier le cisaillement de bloc suivant l'Annexe A de la NF EN 1995-1-1.

Conformément à l'Annexe Nationale Française, cette Annexe s'applique aux assemblages **bois-métal, bois-bois et bois panneaux** comprenant des organes de type tige multiples et ayant une composante de l'effort parallèle au fil et localisé à proximité de l'extrémité du bois.

La vérification du cisaillement de bloc est détaillée au point 4. de l'Annexe A de la présente note.

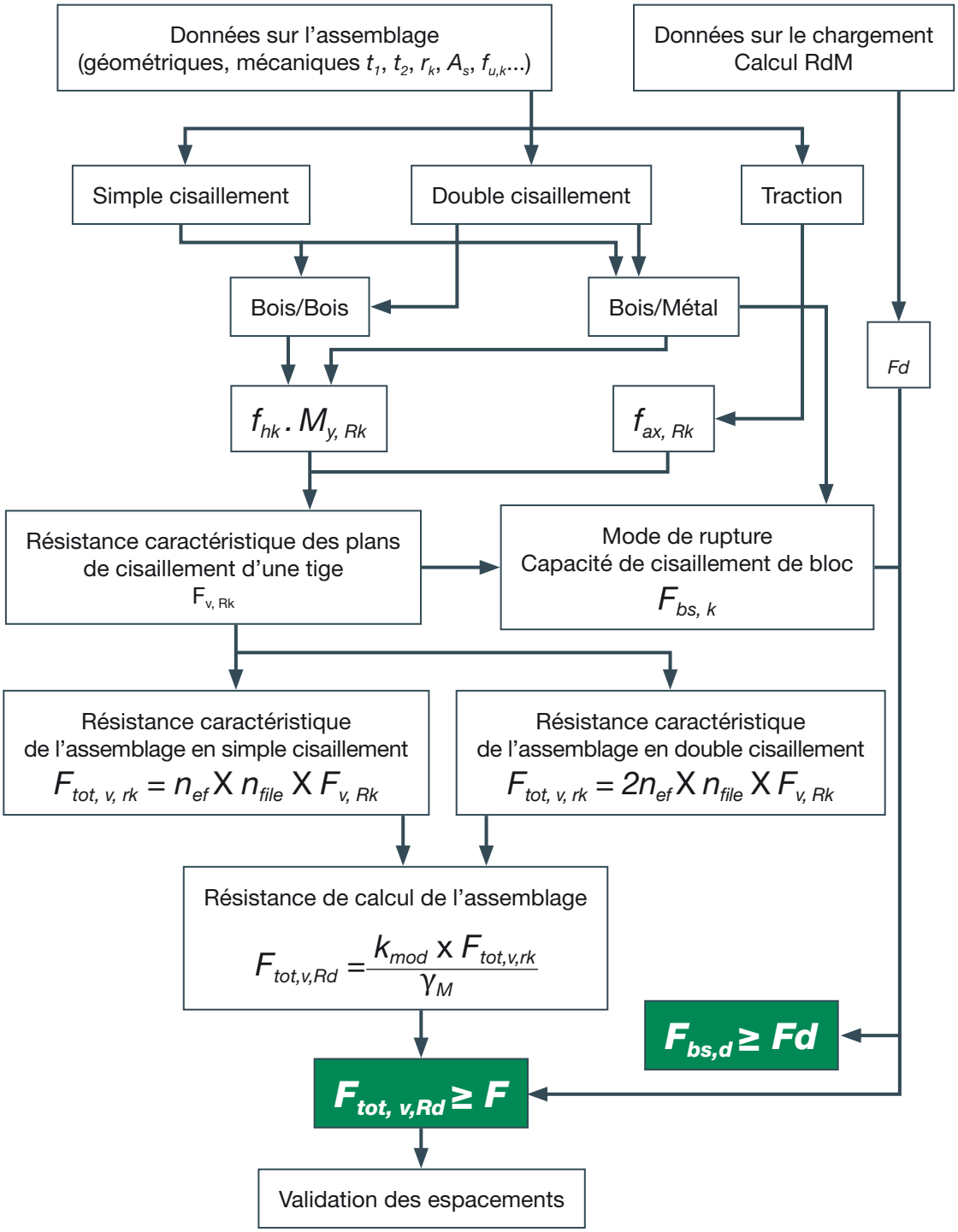
III. 5. c. Vérifier la résistance au feu de l'assemblage suivant la NF EN 1995-1-2 si nécessaire

Les encastrements doivent être vérifiés en situation d'incendie au même titre que le reste de la structure.

Cette vérification s'effectue suivant la NF EN 1995-1-2 et l'Annexe Nationale Française. Des principes généraux de vérification des assemblages non protégés en situation d'incendie sont proposés au point 5 de l'Annexe A de la présente note.

ANNEXE A
VÉRIFICATION D'UN ASSEMBLAGE SELON L'EUROCODE 5

1. Organigramme de calcul d'un boulon ou d'une tige en cisaillement (EC5)



2. Résistance au cisaillement d'un boulon ou d'une tige (EC5)

Cette résistance caractéristique est fonction de plusieurs propriétés intrinsèques aux matériaux qu'il faut déterminer afin de connaître le mode de rupture de l'assemblage. Pour des boulons en double cisaillement, il existe 3 modes de rupture différents qui sont détaillés dans le tableau ci-après.

Ces trois modes peuvent être déclinés selon que l'assemblage est bois/bois ou bois/métal.

Lors du calcul, c'est le mode donnant la plus faible résistance qui est retenu.

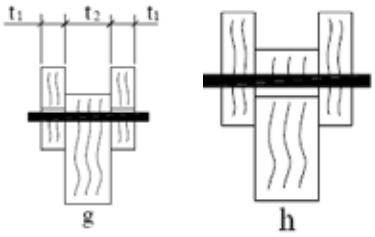
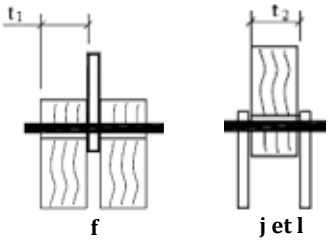
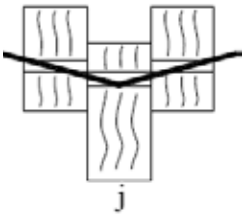
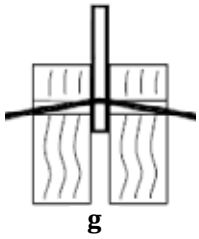
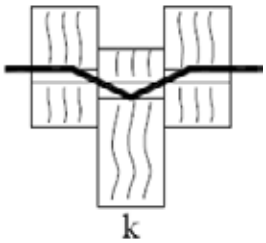
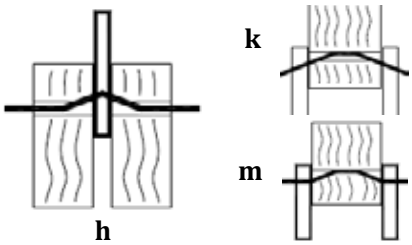
	Assemblage bois/bois	Assemblage bois/métal
Mode 1 par rupture du bois en portance locale		
Mode 2 par création d'une rotule plastique dans le boulon		
Mode 3 par création de plusieurs rotules plastiques dans le boulon		

Tableau 12 : Mode de rupture (EC5 - fig.8.2 et 8.3)

Afin d'obtenir la résistance au cisaillement d'un boulon, il faut déterminer la valeur de 3 éléments : le moment d'écoulement plastique, la portance locale et la résistance à l'arrachement. Les calculs sont détaillés ci-après.

■ Calcul de la portance local dans le bois en MPa :

$$f_{h,0,k} = 0{,}082 \times (1 - 0{,}01d) \times \rho_k$$

Elle peut être corrigée en fonction de l'angle α entre l'effort et le fil du bois :

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90}(\sin\alpha)^2 + (\cos\alpha)^2} \qquad k_{90} = \begin{cases} 1{,}35 + 0{,}015d \text{ pour les résineux} \\ 1{,}30 + 0{,}015d \text{ pour le LVL} \\ 0{,}90 + 0{,}015d \text{ pour les feuillus} \end{cases}$$

■ Calcul du moment d'écoulement plastique (formation d'une rotule plastique) $M_{y,Rk}$ (en N.mm) :

$$M_{y,Rk} = 0{,}3 f_{u,k} \times d^{2,6}$$

Type de boulon	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
$f_{u,k}$ (MPa) EN 1993-1-8 §3.1.1	400	500	600	800	1000

Tableau 13 : Valeur caractéristique de la résistance en traction

■ Résistance axiale d'un boulon $F_{ax,Rk}$ en N :

- Assemblage bois/bois :

C'est la plus petite des valeurs entre la résistance axiale du boulon et la compression du bois sous la rondelle.

$$F_{ax,Rd} = \min \begin{cases} 0{,}9\, f_{u,k} A_s \cdot \dfrac{1}{1{,}25} \\ A_{effective\ rondelle} \times 3 \cdot f_{c,90,k} \times \dfrac{k_{mod}}{\gamma_M} \end{cases}$$

d (mm)	-	12	14	16	18
A_S (mm²)	-	84	115	157	192
d (mm)	20	22	24	27	30
A_S (mm²)	245	303	353	459	561

Tableau 14 : Sections des boulons

où *d* est le diamètre du boulon
A_s est la section de la partie filetée du boulon travaillant en traction

- Assemblage bois/métal avec plaque en âme intérieure :

C'est la plus petite des valeurs entre la résistance axiale du boulon et la compression du bois sous la plaque métallique (simulée par une rondelle fictive de diamètre 12t ou 4d).

$$F_{ax,Rd} = \min \begin{cases} 0{,}9.\, f_{u,k}.\, A_s.\, \dfrac{1}{1{,}25} \\ 2\pi \left(36t^2 - \dfrac{d^2}{4}\right) \times 3.\, f_{c,90,k} \times \dfrac{k_{mod}}{\gamma_M} \\ 2\pi \left(\dfrac{15d^2}{4}\right) \times 3.\, f_{c,90,k} \times \dfrac{k_{mod}}{\gamma_M} \end{cases}$$

où *t* est l'épaisseur de la plaque métallique

■ Calcul de la résistance du boulon par plan de cisaillement pour un boulon en double cisaillement $F_{v,Rk}$ en N :

- Assemblage bois/métal avec plaques extérieures minces (épaisseur ≤ 0,5d) :

On retiendra la plus petite des valeurs suivantes, c'est-à-dire celle qui entraînerait la rupture en premier :

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0{,}5\, .\, f_{h,2,k}.\, t_2.\, d & \rightarrow \textit{mode j} \\ 1{,}15 \sqrt{2M_{y,Rk}.\, f_{h,2,k}.\, d} + \dfrac{F_{ax,Rk}}{4} & \rightarrow \textit{mode k} \end{cases}$$

t_2 est l'épaisseur de la pièce de bois intérieure

- Assemblage bois/métal avec plaques extérieures épaisses (épaisseur < 0,5d) :

On retiendra la plus petite des valeurs suivantes, c'est-à-dire celle qui entraînerait la rupture en premier :

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0{,}5\, .\, f_{h,2,k}.\, t_2.\, d & \rightarrow \textit{mode l} \\ 2{,}3 \sqrt{M_{y,Rk}.\, f_{h,2,k}.\, d} + \dfrac{F_{ax,Rk}}{4} & \rightarrow \textit{mode m} \end{cases}$$

t_2 est l'épaisseur de la pièce de bois intérieure

Si toutefois l'épaisseur de la plaque est comprise entre 0,5d et d, une interpolation linéaire permettra de déterminer $F_{v,Rk}$.

Dans les 4 accolades précédentes, le rapport $F_{ax,Rk}/4$ correspond à l'effet de corde et doit être limité à 25 % du terme le précédent, appelé partie de Johansen.

$F_{v,Rk}$ s'entend par boulon et par plan de cisaillement

- Assemblage bois/bois

On retiendra la plus petite des valeurs suivantes, c'est-à-dire celle qui entraînerait la rupture en premier :

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & \rightarrow mode\ \ g \\ 0{,}5 f_{h,2,k} t_2 d & \rightarrow mode\ \ h \\ 1{,}05 \dfrac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \dfrac{4\beta(2+\beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \dfrac{F_{ax,Rk}}{4} & \rightarrow mode\ \ j \\ 1{,}15 \sqrt{\dfrac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \dfrac{F_{ax,Rk}}{4} & \rightarrow mode\ \ k \end{cases}$$

Avec : $\beta = \dfrac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$

t_1 est l'épaisseur de la pièce de bois la plus mince

- Assemblage bois/métal avec plaque en âme intérieure

On retiendra la plus petite des valeurs suivantes, c'est-à-dire celle qui entraînerait la rupture en premier :

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & \rightarrow mode\ \ f \\ f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \dfrac{4 M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \dfrac{F_{ax,Rk}}{4} & \rightarrow mode\ \ g \\ 2{,}3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \dfrac{F_{ax,Rk}}{4} & \rightarrow mode\ \ h \end{cases}$$

t_1 est l'épaisseur d'une des pièces de bois extérieures

■ Calcul de la résistance au cisaillement des broches ou tiges

Lors du dimensionnement des broches ou tiges, les formules précédentes s'appliquent mais il n'est pas tenu compte du terme $F_{ax,Rk}$ / 4 traduisant l'effet de corde qui est considéré comme nul pour ces assemblages.

■ Calcul du nombre efficace

La capacité résistante d'une file de n organes doit être calculée à partir du nombre efficace n_{ef} d'organes efficaces dans la file.

- Lorsque l'effort est parallèle au fil du bois : $n_{ef} = \min \begin{cases} n \\ n^{0,9} \sqrt[4]{\dfrac{a_1}{13d}} \end{cases}$
- Lorsque l'effort est perpendiculaire au fil du bois : $n_{ef} = n$
- Pour les angles 0°< α < 90° entre l'effort et le fil du bois, n_{ef} peut être déterminé par interpolation linéaire entre les deux équations précédentes.

3. Résistance au cisaillement d'un crampon

La résistance au cisaillement d'un crampon résulte de la somme de la résistance de l'assembleur surfacique lui même, et de celle du boulon qui lui est associé.

Il existe deux sortes de crampon définies dans les normes EN 912 et EN 14545 :
- simple face : type C2, C4, C7, C9, C11
- double face : type C1, C3, C5, C6, C8, C10

La relation suivante permet de déterminer la capacité résistante caractéristique :

$$F_{v,Rk} = \begin{cases} 18 k_1 k_2 k_3 d_c^{1,5} & \rightarrow \textit{pour les types C1 à C9} \\ 25 k_1 k_2 k_3 d_c^{1,5} & \rightarrow \textit{pour les types C10 à C11} \end{cases}$$

d_c est :
- le diamètre des crampons C1, C2, C6, C7, C10 et C11 en mm
- la longueur de côté du crampon pour les types C5, C8, C9 en mm
- la racine carrée du produit des 2 dimensions pour les C3 et C4 en mm

Les différents coefficients qui interviennent dans le calcul sont définit comme suit :

$$k_1 = \min \begin{cases} 1 \\ \dfrac{t_1}{3h_e} \\ \dfrac{t_2}{5h_e} \end{cases}$$

$$k_3 = \min \begin{cases} 1,5 \\ \dfrac{\rho_k}{350} \end{cases}$$

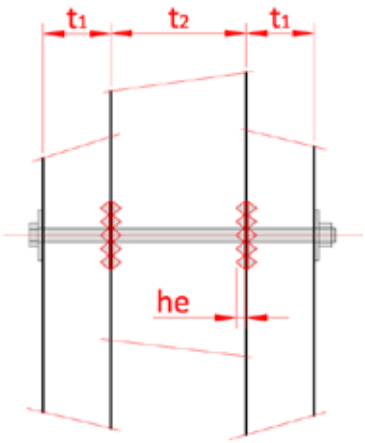


Figure 21 : Mesures de t_1, t_2 et h_e

Pour les crampons de type C1 à C9 et d, le diamètre du boulon :

$$k_2 = \min\begin{cases} 1 \\ \dfrac{a_{3,t}}{1{,}5d_c} \end{cases} \text{ et } a_{3,t} = \max\begin{cases} 1{,}1d_c \\ 7d \\ 80 \text{ mm} \end{cases}$$

Pour les crampons de type C10 et C11 et d, le diamètre du boulon :

$$k_2 = \min\begin{cases} 1 \\ \dfrac{a_{3,t}}{2d_c} \end{cases} \text{ et } a_{3,t} = \max\begin{cases} 1{,}5d_c \\ 7d \\ 80 \text{ mm} \end{cases}$$

Concernant des dispositions relatives aux distances entre organes disposés en quinconce, les données établies pour les anneaux s'appliquent ainsi que les épaisseurs des bois extérieurs et du bois intérieur.

Il en est de même pour le nombre efficace d'organes, celui des anneaux sera repris et on n'oubliera pas de passer de la valeur caractéristique à la valeur de calcul.

La mise en œuvre de crampons permet de réduire le nombre d'organes sachant que l'on dispose toujours au moins un crampon par boulon et par plan de cisaillement.

4. La résistance de bloc

Parfois aussi appelée rupture à la déchirure, la rupture de bloc qui met en jeu la résistance au cisaillement sur un plan et en traction sur un autre se rencontre dans les assemblages encastrés.

Dans l'annexe nationale de l'Eurocode 5, l'Annexe A, permettant de vérifier le cisaillement de bloc des assemblages bois/métal, est rendu normative et s'applique également aux assemblages bois-bois et bois-panneaux. On se doit donc de vérifier ce mode de rupture supplémentaire après ceux cités précédemment.

Ainsi, lorsqu'un groupe d'organes est sollicité par une composante d'effort parallèle au fil du bois, la capacité de cisaillement de bloc est définie comme le **maximum de résistance en traction du bloc et en cisaillement du bloc**.

$$F_{bs,Rk} = \max \begin{cases} 1{,}5 A_{net,t} f_{t,0,k} \\ 0{,}7 A_{net,v} f_{v,k} \end{cases}$$

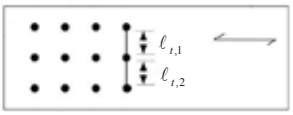
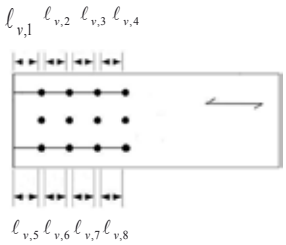
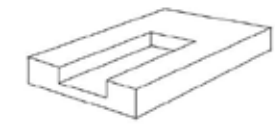
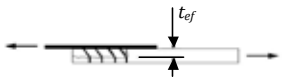
	Mode de rupture initial	Calcul	Illustration
Bloc en traction	Tous	$A_{net,t} = t_1 \sum_i \ell_{t,i}$	
Bloc en cisaillement	f, j, k et l	$A_{net,v} = t_1 \sum_i \ell_{v,i}$	
	g	$A_{net,v} = \frac{\sum \ell_{v,i}}{2}\left(\left(\sum_i \ell_{t,i}\right) + 2t_{ef}\right)$ $t_{ef} = t_1\left[\sqrt{2 + \frac{4.M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1\right]$	
	h	$A_{net,v} = \frac{\sum \ell_{v,i}}{2}\left(\left(\sum_i \ell_{t,i}\right) + 2t_{ef}\right)$ $t_{ef} = 2\sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{h,k} d}}$	 

Tableau 15 : Calcul de la rupture de bloc

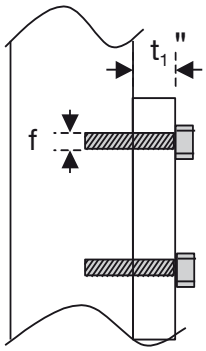
5. La résistance au feu

La norme NF EN 1995-1-2 et son annexe nationale définissent les méthodes de calcul des assemblages au feu dans une limite de 60 minutes. Une partie est spécifiquement consacrée aux assemblages non protégés et on retiendra les points principaux suivants :

■ Cas de l'assemblage avec éléments latéraux en bois

Le tableau suivant donne les épaisseurs de bois minimales pour un temps de résistance $t_{d,fi}$ d'après la méthode simplifiée :

	Temps de résistance au feu $t_{d,fi}$ (min)*	Préconisations
Boulons	15	$t_1 \geq 45$ mm
Broches	20	$t_1 \geq 45$ mm
Assembleurs selon EN 912	15	$t_1 \geq 45$ mm



**lorsque les têtes de broches sont non-dépassantes, ces valeurs peuvent être augmentées*

Tableau 16 : épaisseurs minimales pour résistances au feu (méthode simplifiée)

- Pour calculer la valeur caractéristique de la capacité résistante au cisaillement d'un assemblage non protégé après un temps $t_{d,fi}$ (en minute) d'exposition au feu, on doit connaître la résistance caractéristique de l'assemblage ($F_{v,Rk}$) et appliquer les équations données au §6.2.2.1(2) de EC5-1-2.

$$F_{v,Rm,fi} = e^{-m.t(d,fi)}.F_{v,Rm}$$

$t_{d,fi}$ étant inférieur ou égale à la période de validité de k

- Pour calculer la durée de résistance d'un assemblage non protégé exposé au feu, on doit connaître la résistance caractéristique de l'assemblage ($F_{v,Rk}$), la sollicitation au feu ($F_{v,Ed,fi}$) et inverser les équations données au §6.2.2.1(2) de EC5-1-2.

$$t_{d,fi} = min\begin{cases} période\ de\ validité\ de\ k \\ \frac{-1}{k}.\ ln\left(\frac{F_{v,Ed,fi}.\gamma_{M,fi}}{F_{v,Rk}.k_{fi}}\right) \end{cases}$$

Avec $\gamma_{M,fi}$=1
K_{fi} =1,15 pour les assemblages avec éléments latéraux en bois
K_{fi}=1,05 pour les assemblages avec éléments latéraux métalliques

La valeur de k a une période de validité donnée. Au delà, on devra protéger l'assemblage :

	k	Période de validité en min
Boulons bois/bois d = 12 mm	0,065	30 min
Boulons bois/métal d = 12 mm	0,085	30 min
Broches bois/bois d = 12 mm	0,040	40 min
Broches bois/métal d = 12 mm	0,085	30 min
Assembleurs	0,065	30 min

Tableau 17 : période de validité du coefficient k

Les broches nécessitent 1 boulon par groupe de 4 broches et on additionne les capacités résistantes pour obtenir celle de l'assemblage complet.

Les broches dépassant de plus de 5 mm sont considérées comme des boulons vis-à-vis du feu.

■ Cas de l'assemblage avec plaque métallique interne

Dans le cas de rives non protégées, la plaque ne doit pas être plus large que la pièce de bois et son épaisseur doit être supérieure ou égale à 2 mm. La largeur doit alors suivre les valeurs indiquées dans l'Eurocode 5 partie 2 paragraphe 6.2.1.3, le calcul est ensuite identique à ce qui est vu plus haut.

■ Cas de l'assemblage avec plaque métallique externe

On doit pratiquer un calcul selon l'Eurocode 3 partie feu (NF EN 1993-1-2) consacré aux structures métalliques.

ANNEXE B
BIBLIOGRAPHIE

- Heimeshoff, B. (1997). *Berechnung von Ramenecken mit Dübelanschluss (Dübelkreis)*. Holzbau Statik Aktuell - Folge 2, 1-5.
- NF EN 1995-1-2. Eurocode 5 - *Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-2 : généralités - Calcul des structures au feu (2005).*
- NF EN 1995-1-2/NA. Eurocode 5 - *Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-2 : généralités - Calcul des structures au feu - Annexe Nationale à la NF EN 1995-1-2:2005 - Généralités - Calcul des structures au feu (2007).*
- Racher, P. (1996). *Liaisons sollicitées en flexion*, sujet C16. STEP.
- SNCCBLC. (2000). *Charpente en bois lamellé-collé*, Guide pratique 4e. Eyrolles.
- Tetard, A., & Vidon, M. (1991). *Encastrement poteau-traverse par couronnes de boulons en locaux clos et chauffés*. Annales de l'ITBTP N°497, 96-98.

MEMBRES DE LA COMMISSION TECHNIQUE et PERSONNALITÉS CONSULTÉES

Monsieur Alain PERRIN, *BE PERRIN*
Messieurs PROVOT et NAVILLOT, *ARBONIS*
Monsieur DE BOUTRAY, *AKZO NOBEL INDUSTRIAL FINISHES SAS*
Monsieur COMTE, *BARLET Frères*
Messieurs BELLIARD et FOUILLEUL, *BELLIARD*
Monsieur Eric SAUVIGNET, *BE2S*
Monsieur CHAUTARD, *BOIS & SCIAGES DE SOUGY*
Messieurs ADAM, JEUSEL et MOULIE, *BRIAND CONSTRUCTION BOIS*
Monsieur SIMONNEAU, *C.I.L.C.*
Messieurs GUELLIER et VERRIERE, *C.M.B.P.*
Monsieur COLLADELLO, *COLLADELLO*
Messieurs BOUTHILLON et MONTAGNIER, *COSYLVA*
Monsieur DURAND, *DESCHAMPS*
Monsieur LE GUYADER, *EMG*
Monsieur BEAULIEU, *ERIBOIS*
Monsieur FENESTRE, *FCB*
Monsieur LEBLEU, *GOUBIE*
Monsieur LEDOUX, *HAAS WEISROCK*
Monsieur GIRI, *ICABOIS*
Messieurs QUIDET et LEROY, *ITECH*
Madame PANESCU, *JAMES S.A*
Monsieur SCHOULER, *MARGUERON*
Messieurs ADOLF et DE TADDEO, *MATHIS S.A*
Monsieur FURLAN, *SACBA*
Messieurs CABOT et FOURNIER, *SOCIÉTÉ des CHARPENTES FOURNIER*
Monsieur THUAULT, *TANGUY S.A*
Messieurs MICHELER et LEDER, *TÜRMERLEIM AG*
Monsieur VARACCA, *SFS Intec*
Monsieur STAUBER, *SIMPSON STRONG TIE*
Monsieur HAMEURY, *CSTB*
Messieurs BRASSY et LE MAGOROU, *FCBA*
Madame FAYE, *FCBA*
Monsieur BLERON, *ENSTIB*
Messieurs FERET et MILLEREUX, *SNBL*
Monsieur ADJANOHOUN, *APAVE*
Monsieur FAHRNER, *SOCOTECH*
Monsieur FAILLE, *QUALICONSULT*
Messieurs LAMADON, HOSTALERY et BERRY, *BUREAU VERITAS*

La présente note a pu être élaborée grâce à plusieurs contributions expérimentales et scientifiques en particulier : Travaux de modélisation de l'ENSAM-CLUNY (L.BLERON), Étude de la semi-rigidité (FCBA L.LEMAGOUROU) et Comportement des assemblages avec plaque de répartition (US2B P.GALIMARD et JL COUREAU). A cette note est associé un exemple d'application réalisée par le Bureau d'études (BE2S E.SAUVIGNET) disponible auprès du SNBL.

SNBL
120, avenue Ledru Rollin
75011 PARIS
Tél. : 01 43 45 53 43
fibc@magic.fr
www.glulam.org

Le S.N.B.L. a pour objectif de promouvoir l'utilisation du bois lamellé collé dans la construction et il participe au développement technique industriel, commercial et économique et à l'établissement de règles de conception et de mise en œuvre.

Il diffuse à l'ensemble des professionnels, les documents d'information relevant de l'architecture et de la construction en bois lamellé collé. Le S.N.B.L. membre de la F.I.B.C. et de l'association européenne « Glulam », est l'organisme représentatif des industries françaises du bois lamellé collé pour la construction.

Ses membres sont des professionnels de la construction, du bois et de la transformation du bois.