



ETUDE

CARACTERISATION
DE LA RAIDEUR D'ASSEMBLAGES
DE STRUCTURES EN BOIS

PARTIE 3

ASSEMBLAGE PAR CONTACT

AVERTISSEMENT

Cette publication vise à mettre à disposition des acteurs de la construction les résultats d'études menées dans le cadre des travaux de la Commission Technique d'ADIVbois.

ADIVbois ne saurait être tenu pour responsable des omissions, inexactitudes ou erreurs que pourrait contenir cette publication et qui résulteraient de la retranscription de ces études, réalisées sous la responsabilité de leurs auteurs respectifs, et auxquelles le lecteur est invité à se référer directement.

ADIVbois souligne également que les éléments et recommandations retranscrites dans le présent ouvrage présentent un caractère informatif et ne sauraient en aucun cas se substituer, même pour partie, aux études techniques et juridiques, tant au stade de la conception que de l'exécution, qui incombent à chaque acteur de la construction dans le cadre des projets auxquels il pourra être amené à participer.

Droits d'auteur - copyright ©

L'ensemble de ce document relève de la législation française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle. Tous les droits de reproduction sont réservés, y compris pour les documents téléchargeables et les représentations iconographiques et photographiques.

La reproduction de tout ou partie de ce document, y compris sur un support électronique quel qu'il soit est formellement interdite sauf autorisation expresse d'ADIVbois, du Codifab et des réalisateurs de l'étude.

PRÉAMBULE

Depuis 2016, l'Association pour le Développement des Immeubles à Vivre Bois porte un projet innovant reposant sur des immeubles bois de moyenne et grande hauteur, qui se distinguent par des solutions structurelles bois et des aménagements intérieurs faisant appel au bois.

Ce projet innovant va de pair avec un important travail collectif (études, benchmark, prototypages) visant à accompagner la réalisation d'immeubles démonstrateurs.

La Commission Technique d'ADIVbois a lancé, depuis 2016, un nombre conséquent de travaux dans le cadre d'ateliers thématiques (structure, incendie, acoustique, enveloppe, environnement...) et d'études afin d'accompagner la conception et la réalisation des Immeubles à Vivre Bois. L'objectif de ces travaux est de favoriser la levée de freins technico-réglementaires et d'être partagés avec la collectivité.

Le présent document s'inscrit dans cette démarche.

L'étude présentée vise à caractériser et à établir des moyens d'évaluation de la raideur des assemblages de forte capacité

Elle a été menée par l'association du CRITTbois et du LERMAB.

CARACTERISATION DE LA RAIDEUR D'ASSEMBLAGES DE STRUCTURES EN BOIS

L'association ADIVbois travaille depuis plusieurs années pour accompagner l'émergence de Bâtiments en Bois de Grand Hauteur (BBGH) en France.

Les études de cas, menées en 2017, ont permis d'identifier plusieurs points fondamentaux à prendre en compte dans la démarche de conception d'un BBGH, et l'évaluation fine de la raideur des assemblages au sein des structures en bois est un point critique qui méritait l'attention de l'atelier structures.

En effet, l'augmentation de la hauteur des immeubles bois, et le recours à des assemblages permettant le transfert d'efforts de plus en plus importants au sein des structures, font que les immeubles deviennent plus sensibles au comportement de ces dits assemblages.

Lors de la construction des immeubles de moyenne et grande hauteur, la raideur de la structure est un paramètre clé pour la bonne modélisation et la justification du projet. La prise en compte des raideurs élastiques dans les connexions entre éléments en bois est indispensable pour rendre compte du comportement global de la structure. Pour cela, l'ingénieur se doit de disposer de la valeur de la raideur des assemblages la plus précise possible.

La problématique de la raideur des assemblages est en outre une thématique bien particulière, car il n'y a pas de moyen pour l'ingénieur calculateur de « se placer du côté de la sécurité » pour mener sa conception :

- Si la raideur est sous-estimée, les déplacements sont alors certes surestimés, mais les efforts au sein des organes d'assemblages peuvent être plus importants que prévus et potentiellement entraîner des ruptures non maîtrisées dans les nœuds d'assemblages
- Si la raideur est surestimée, les efforts dans les assemblages peuvent certes être inférieurs aux actions prévues, mais les déplacements calculés sont alors sous-estimés, ce qui peut entraîner des inconforts ou pire une impropriété à l'usage.

Actuellement, l'Eurocode 5 propose une méthode de calcul de la raideur de ces assemblages très approximative, peu adaptée aux configurations possibles des immeubles de grande hauteur (avec un nombre d'organes important), transmettant éventuellement des moments ou encore faisant appel à des montages moins répandus (CLT, vissage à 30° ou 45°). Ces outils ne permettent pas d'assurer le calcul avec précision et rend difficile la maîtrise du comportement de ces structures bois de grande hauteur.

En conséquence, l'atelier structure a considéré nécessaire de mener des essais d'assemblages bois pour définir une méthodologie permettant de cibler une valeur de raideur la plus proche de la réalité possible, en fonction de différents paramètres tel que la nature des organes d'assemblages, la nature des pièces bois assemblées ou encore la disposition du montage dans son ensemble.

Un plan d'expérimentation a été définie, en visant à la fois à caractériser les comportements réels des assemblages, mais aussi à s'assurer de la reproductibilité des phénomènes par modélisation et extrapolation. L'objectif est bien d'outiller les calculateurs et ingénieurs de nouvelles formulations permettant de rendre compte au mieux des raideurs des assemblages pour différentes configurations que l'on retrouve dans les structures des bâtiments bois de grande hauteur.

Ainsi, les essais suivants ont été menés :

- Essais de comportement locaux pour alimentation de la modélisation : essais d'arrachement de vis, de portance locale et de flexion de broche ;
- Essais de comportements d'assemblages pour validation et extrapolation : essais sur assemblage par vis, alternés ou non, essais sur assemblages par broches de 12 mm et de 16 mm, essais sur assemblages par contact direct

Pour les essais de comportements d'assemblages, les sollicitations ont en outre été poussées jusqu'à la rupture afin d'enrichir également les bases de données de recherche sur la performance des assemblages renforcés (vis de frettage perpendiculaires).

Dans le cadre de l'action de recherche, les notes de calcul précises ont été élaborées afin de confronter les résultats mesurés avec les valeurs obtenues par le calcul en application de l'Eurocode 5 partie 1-1 (tant en termes de résistance que de raideur). Une analyse a également été menée afin d'évaluer et de préciser les incidences d'une variation des tolérances admissibles sur la fabrication des assemblages bois-métal (notamment sur le jeu au sein des plaques métalliques).

Enfin, de nouvelles formulations analytiques ont été proposées afin d'obtenir les valeurs de glissement, exprimées en kN/mm et calculées en fonction de quelques paramètres clefs définissant les assemblages :

- Le nombre d'organes par file (en unité)
- Le nombre de files d'organes (en unité – nombre pair)
- L'épaisseur de bois (en mm)
- L'épaisseur du ou des plats métalliques (en mm)
- Le diamètre des organes (en mm)
- La pince entre organes dans le sens du fil (en mm)

Les limites d'applications de cette étude doivent cependant être bien comprises :

- Les raideurs sont formulées avec l'hypothèse d'une absence de jeu dans les pièces en bois et d'un jeu de 0,6 mm au diamètre entre la tige et le plat métallique
- Les bois employés relèvent de la classe GL28h (bien que commandés en GL24h, les bois utilisés se sont révélés être plus proches dans leurs caractéristiques – densité et module d'élasticité – d'un bois classe GL28h)

Les résultats de ces essais et les analyses qui en sont tirées ne sont pas à considérer à ce stade comme normatifs, mais permettent :

- Aux concepteurs de structures en bois d'affiner leurs analyses structurelles
- Aux développeurs de logiciels de calculs de proposer de nouvelles approches sur l'évaluation des assemblages
- Au groupe de travail en charge de l'Eurocode 5 d'enrichir le corpus normatif de ces nouvelles connaissances, tant sur les raideurs d'assemblages que sur la rupture d'assemblages bois renforcés (ce travail a été soumis au WG5 en charge de la révision et mise à jour du texte) ;
- De tirer quelques grands enseignements ou de confirmer des pratiques actuelles :
 - o la mobilisation de l'effet de corde dans les organes d'assemblages n'est réelle que sur des assemblages présentant un contact parfait ;
 - o les vis disposées à 90° du plan de cisaillement conduisent à des raideurs faibles. Les configurations à vis inclinées permettent un gain substantiel de rigidité ;
 - o les vis inclinées subissent une perte de raideur très faible sous sollicitations alternées ;
 - o la raideur des assemblages augmente généralement en fonction du rapport « t/d » (t = épaisseur du bois ; d = diamètre de l'organe) ;
 - o Assemblage en contact direct : comportement relativement similaire entre bois-bois, bois-acier et bois-mortier

SOMMAIRE PARTIE 3 : ASSEMBLAGE PAR CONTACT

1. **BIBLIO-3** : Rapport bibliographique des assemblages par contact
2. **PRO-3** : Protocole d'essais des assemblages par contact
3. **RAP-3** : Rapport d'essais des assemblages par contact

1. BIBLIO-3

Rapport bibliographique des assemblages par contact



Laboratoire d'Etudes et de Recherche
sur le Matériau Bois
EA 43 70 USC / INRA



Ecole Nationale Supérieure des
Technologies et Industries du Bois

CAMPAGNE D'ESSAIS VISANT A CARACTERISER LA RAIDEUR D'ASSEMBLAGES COURANTS DE STRUCTURES EN BOIS

BIBLIO-3 : Rapport bibliographique des assemblages par contact

Fait à Epinal, le vendredi 17 décembre 2021

1. - SOMMAIRE

1. - SOMMAIRE	2
2. - INTRODUCTION DU PROJET	3
3. - SYSTEME « POTEAU-POUTRE »	7
3.1. DEFINITION.....	7
3.2. EVOLUTION DU SYSTEME.....	7
4. - ASSEMBLAGE PAR CONTACT	10
4.1. TOLERANCES.....	10
4.1.1. <i>Longueurs</i>	10
4.1.2. <i>Perpendicularité</i>	11
4.2. TYPES D'ASSEMBLAGES PAR CONTACT	12
4.2.1. <i>Assemblage Bois/Bois</i>	12
4.2.2. <i>Assemblage Bois/Métal</i>	13
4.2.3. <i>Assemblage Bois-Mortier</i>	15
5. - CARACTERISATION DES ASSEMBLAGES PAR CONTACT	16
5.1. ETUDE CEPELKA AND MALO [18].....	16
5.1.1. <i>Campagne expérimentale</i>	16
5.1.2. <i>Résultats</i>	17
5.2. ETUDE FLAIG, SCHMIDT ET BLASS [21].....	20
5.2.1. <i>Campagne expérimentale</i>	20
5.2.2. <i>Résultats</i>	21
5.3. ANALYSE COMPARATIVE DES DEUX ETUDES.....	24
6. - CONCLUSIONS	25
7. BIBLIOGRAPHIE :.....	26

2. – INTRODUCTION DU PROJET

Le bois est un matériau naturel, l'un des premiers à être utilisé comme matériau de construction pour différents usages. Au fil des siècles, le matériau bois s'est vu remplacé par d'autres matériaux comme le béton armé et l'acier pour la construction de bâtiment. Aujourd'hui, ces deux matériaux demeurent ses principaux concurrents.

Au fil des années et après de nombreuses années de recherches, des produits dits « d'ingénierie » ont vu le jour comme le panneau de fibres à haute densité, le panneau de particules, le panneau de contreplaqué, le bois lamellé-collé dit « BLC », et plus récemment le bois lamellé-croisé dit « CLT ». Ces produits permettent d'obtenir une homogénéisation des propriétés mécaniques à partir de la matière première les constituants. Depuis, la part du bois dans la construction n'a cessé de croître. En 2012, 2197 entreprises recensées par « l'Enquête nationale de la construction bois » [1] ont permis de faire 3,1% du chiffre d'affaire national du bâtiment, représentant 4 milliards d'euros. Ce chiffre est réalisé en considérant plusieurs systèmes constructifs, dont la part relative est représentée en Figure I-1.

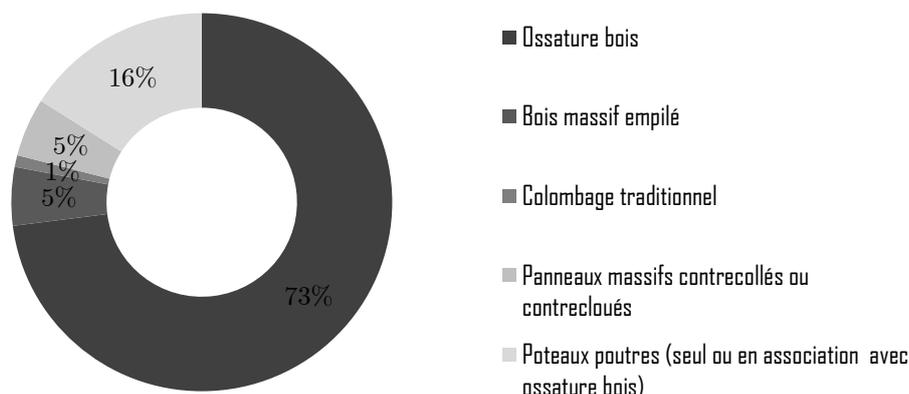


Figure 2-1 : Part des différents systèmes constructifs dans le marché non-résidentiel [1]

Par l'utilisation du bois comme élément structurel, les architectes cherchent à développer des structures fines, élancées et légères afin d'obtenir de grands espaces ainsi qu'un certain esthétisme [3]. Aujourd'hui, la nécessité de construire durablement n'est plus à justifier, ceci constitue la vision de l'avenir tout en préservant les terres agricoles. La conception de ces futures constructions doit être pensée pour qu'elle soit évolutive et modulaire tout en essayant de permettre la réutilisation des produits de déconstruction en fin de vie. L'ensemble des enjeux économique, sociale et environnementale laissent donc entrevoir un fort potentiel de développement des systèmes constructifs en bois.

Après avoir fait ce constat, il a émergé une volonté de la profession des constructeurs bois et autres de passer un nouveau cap : construire des Bâtiments en Bois de Grande Hauteur appelés « BBGH ». Cette volonté de construire des bâtiments doit cependant s'accompagner d'études spécifiques afin de répondre aux nouvelles problématiques que soulève ce genre d'ouvrage. Un certain nombre a été relevé dans le vade-mecum publié par l'association « ADIV'BOIS » [2].

Pour rappel, les trois systèmes constructifs envisagés par ces constructions sont présentés sur les figures ci-dessous :

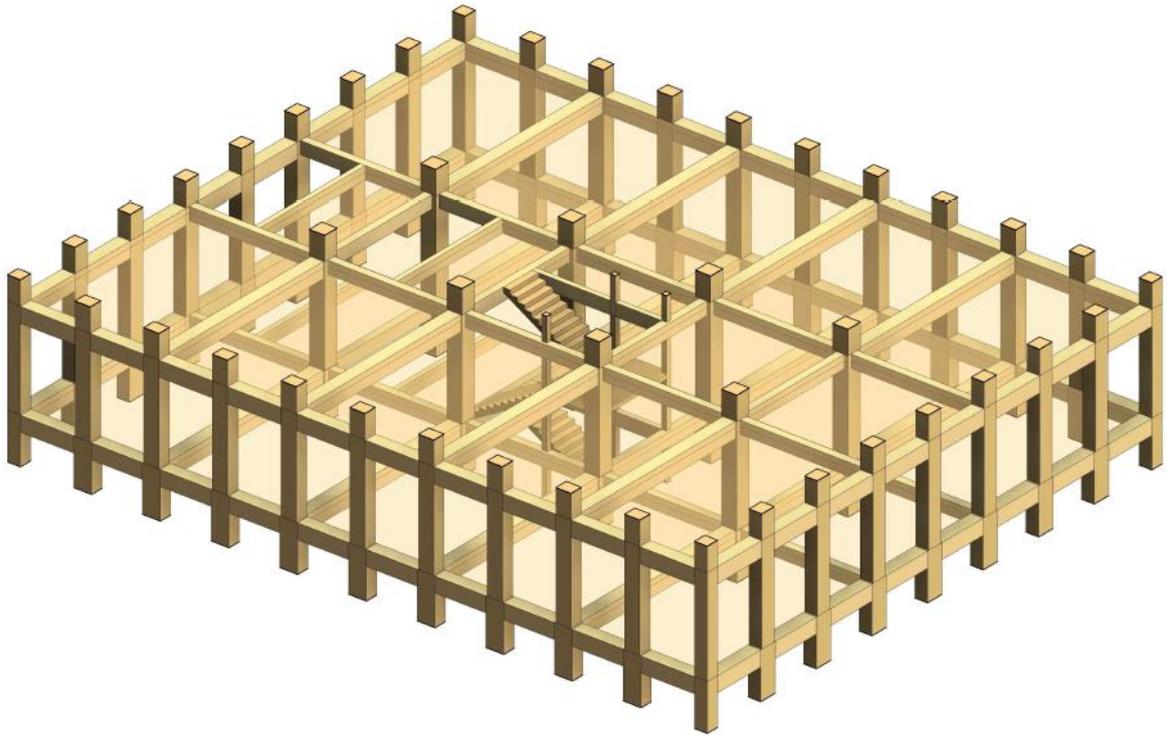


Figure 2-2 : Principe constructif du système poteau poutre [2]

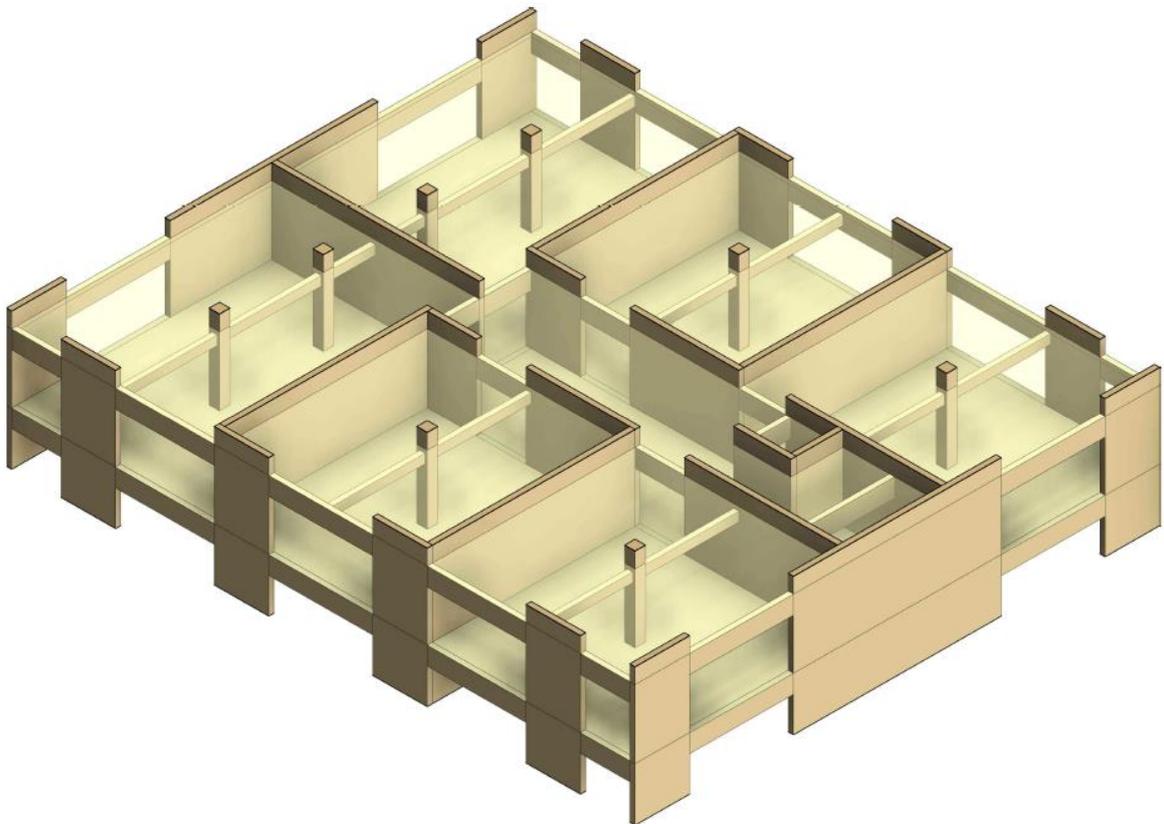


Figure 2-3 : Principe constructif du système de panneau porteurs et contreventant [2]

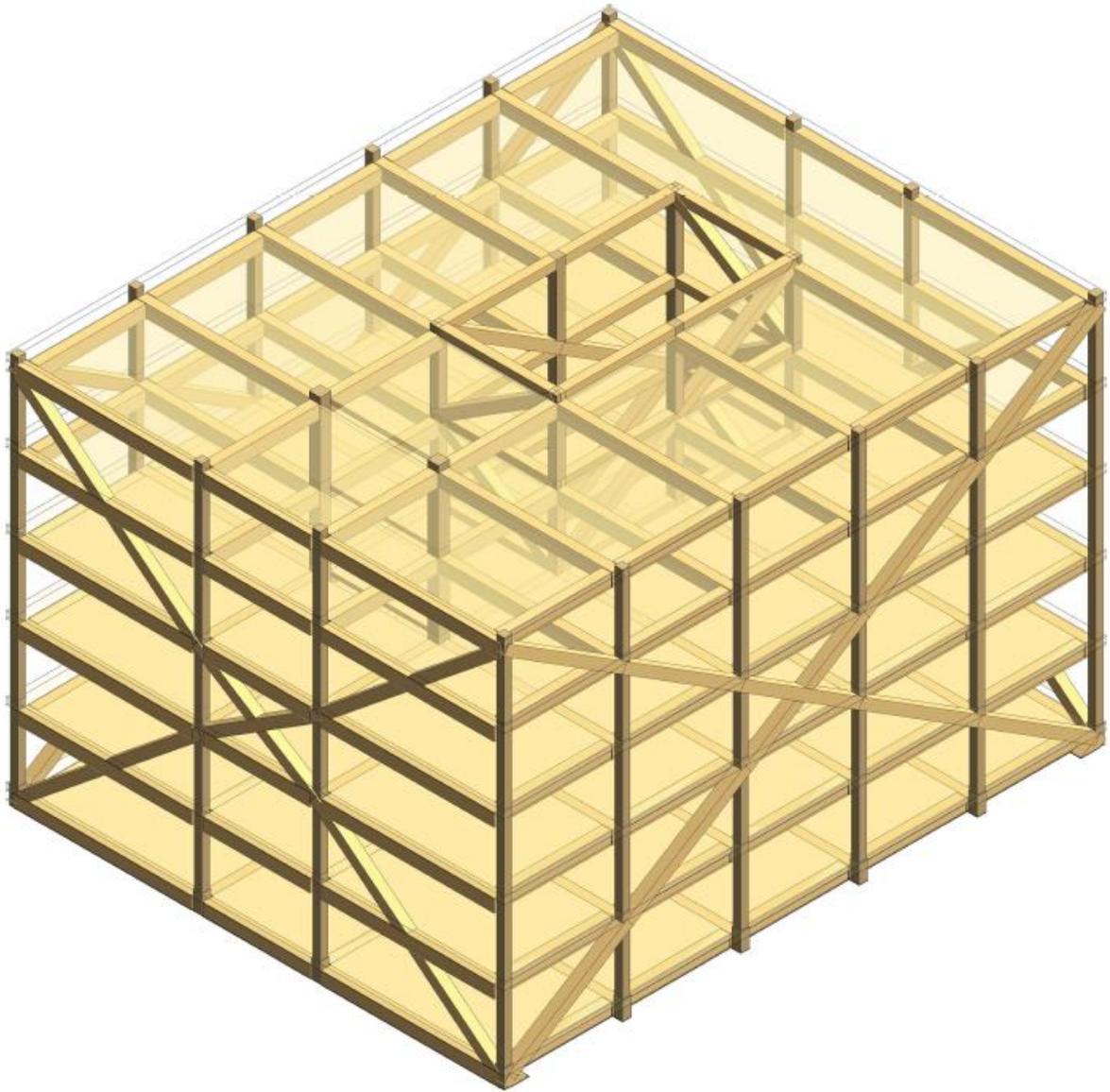


Figure 2-4 : Principe constructif du système exosquelette [2]

Aujourd'hui, d'un point de vue mécanique, les matériaux à base de lamelles collées sont idéalement positionnés pour concevoir des structures complexes. Ils proposent soit des éléments porteurs longilignes (poteaux et poutres), soit des éléments de type plaque ou coque respectivement, le bois lamellé-collé (BLC), fabriqué par un empilement de lamelles collées dans le même sens longitudinal et le bois lamellé-croisé (CLT) fabriqué par un empilement de lamelles croisées et collées.

Aujourd'hui, en Europe, l'utilisation du BLC et le CLT, comme éléments structuraux, repose sur des normes produit et une norme de dimensionnement. Les normes de produit permettent de réglementer la fabrication du produit concerné et de classifier les caractéristiques mécaniques des éléments en fonction de différentes classes de résistances mécaniques des lamelles constituant le produit. Ces normes sont la norme NF EN 14080 [3] et la norme NF EN 16351 [4] respectivement pour le BLC et le CLT. Elles permettent donc de connaître les propriétés intrinsèques des produits.

La norme de dimensionnement est la norme NF EN 1995-1-1 [5], appelée plus généralement sous le nom Eurocode 5 (EC5). Elle permet de définir les règles de dimensionnement des structures en bois, il est à noter que cette norme est en cours de révision. Cette révision doit servir à combler un certain nombre de lacunes que des applications comme la construction de bâtiment de grande hauteur font nécessairement apparaître. Il convient donc de rester vigilant à ce que les nouveaux développements ne constituent pas des entraves dans

leur domaine d'application. C'est pourquoi il est nécessaire d'accompagner ces révisions par des études spécifiques en parallèle.

Un certain nombre de verrous scientifiques ont donc été identifiés dans l'étude de cas des trois systèmes constructifs présentés précédemment, ils sont décrits dans le vade-mecum.

Les verrous scientifiques ont été classés selon les thématiques suivantes donnant lieu à 5 ateliers techniques du même nom :

- Structurelle,
- Incendie,
- Enveloppe et thermique
- Durabilité Entretien
- Acoustique.

Un des verrous scientifiques commun aux trois systèmes constructifs réside dans la maîtrise de la raideur des assemblages. Aujourd'hui, l'EC5 [5] propose d'estimer la raideur des organes dénommée « Kser » pour remonter à la raideur d'assemblage en fonction de la constitution de ce dernier. Cependant, cette proposition reste très approximative, cette approche permet dans les calculs de voir la sensibilité des ouvrages à cette caractéristique mécanique mais elle ne permet pas de résoudre finement la problématique.

A l'origine de l'EC5 [5], la notion de raideur d'assemblage avait peu d'importance sur le dimensionnement d'un bâtiment puisque les bâtiments étaient souvent de conception isostatique et de redondance. Aujourd'hui, la valeur de la raideur d'assemblage doit être maîtrisée puisqu'elle a un impact fort sur le dimensionnement des BBGHs. Cette valeur intervient sur le dimensionnement à l'état limite ultime et surtout sur les vérifications aux aptitudes de service comme le confort sous charge de vent.

Afin de répondre à un dimensionnement des bâtiments avec une bonne maîtrise des valeurs des raideurs d'assemblages, des essais expérimentaux sont proposés permettant de lever les verrous scientifiques de la raideur d'assemblage et ainsi franchir ce nouveau cap.

Ainsi les objectifs de l'étude sont de réaliser des campagnes d'essais mécaniques permettant d'établir des outils d'estimation de la raideur sur des configurations d'assemblages retenus par l'atelier structure. Ces résultats d'essais serviront également à nourrir des modèles analytiques et éléments finis afin d'assurer l'extrapolation des résultats obtenus.

Dans ce présent rapport, un focus est effectué sur le verrou scientifique du système dit « Poteau/Poutre » et en particulier la transmission des efforts par contact direct entre les éléments.

3. - SYSTEME « POTEAU-POUTRE »

3.1. DEFINITION

Le système constructif dit « Poteau-Poutre » est, comme son nom l'indique, constitué d'un tissu de poteaux et de poutres permettant de descendre les différentes charges. La fonction principale du tissu de poutres est de récupérer les charges descendantes dites « Verticales » repris par les planchers afin de les transmettre en tête de poteau. La fonction principale des poteaux est de descendre les charges transmises par les poutres et de les descendre jusqu'aux fondations du bâtiment tout en cumulant les charges transmises par les différents étages. Cette descente de charge est effectuée par compression.

3.2. EVOLUTION DU SYSTEME

Les premières constructions utilisant le système dit « Poteau/Poutre » datent du Moyen Âge avec les maisons à colombages ou pans de bois. Ce type de construction (cf. Figure 3-1) était constitué d'une redondance de poteau visible en façade permettant de descendre les charges gravitaires. A l'époque, cette redondance existait puisque la caractérisation des bois, comme on l'entend aujourd'hui, n'était certainement pas la préoccupation étant donné l'abondance de la ressource. Il évoluait avec la ressource locale et les moyens de l'époque. De plus, il évoluait avec des bois courts permettant de faire la hauteur d'un seul étage. Ainsi, ils devaient solidariser cette redondance de poteaux courts en utilisant des poutres bois pour liaisonner les pieds et les têtes de poteaux (cf. Figure 3-1). Ainsi, la descente de charge s'établissait par de la compression longitudinale et transversale entre les poteaux et les poutres de liaison.



Figure 3-1 : Maison à colombage.

L'évolution de la construction bois n'est apparue ensuite que dans les années 1960, où les pouvoirs publics ont demandé aux maîtres d'ouvrages d'exploiter les potentiels de la forêt française. C'est à cette époque également, que les anciens codes de calculs des ouvrages bois, ont été créés, les règles CB71 [6]. A cette époque, une ère d'industrialisation de la filière bois a commencé à se développer permettant de créer des nouveaux systèmes constructifs. Le mur à ossature bois est apparu, basé sur le même principe que le mur à colombage il est importé des états unis, tout en minimisant le volume de matière (cf. Figure 3-2). Cette minimisation de matière est due à de nombreuses caractérisation du matériaux bois permettant de connaître les résistances mécaniques. Une note de calculs pouvait donc être écrite pour la construction d'un bâtiment.



Figure 3-2 : Maison à ossature bois

Parmi les nombreuses études de caractérisation du matériaux bois en compression longitudinal, Kollmann [7] a réalisé des essais en compression longitudinale, où il a détecté six modes de rupture (cf. Figure 3-3). Aujourd'hui, cette caractérisation du matériau bois est synthétisée dans la norme NF EN 338 [8] pour le bois massif, cette norme a connu différentes évolutions au cours de ces dernières années. Cette norme présente, entre autres, les résistances en compression longitudinale variant de 16MPa à 30MPa tandis que la résistance en compression transversale varie de 2 à 3 MPa. Ainsi, un rapport allant de 8 à 10 existe entre la résistance longitudinale et la résistance transversale selon les classes de résistance. Ces rapports montrent ainsi une faiblesse de la résistance en compression transversale expliquant la redondance des poteaux pour ce type de construction pour diminuer les efforts repris par compression.

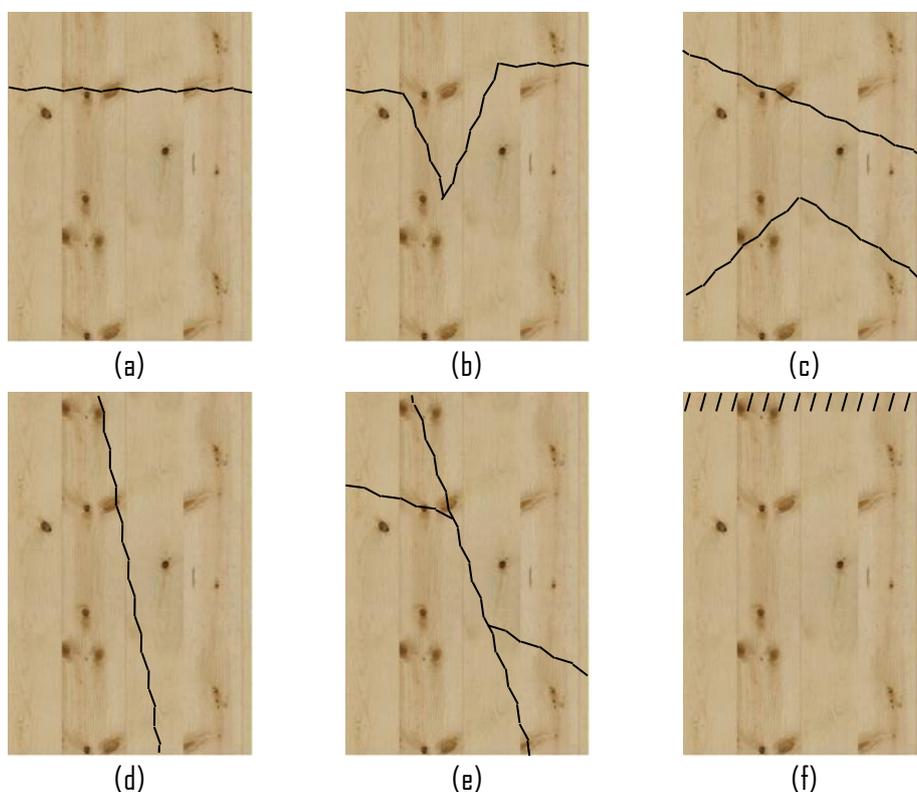


Figure 3-3 : Mode de rupture en compression parallèle au fil : a : rupture par flambement des fibres - b : fendage en biseau - c : fendage simple - d : fendage et rupture transverses - e : cisaillement associé à des plans de faiblesse - f : écrasement des extrémités [7], [9]

3 - SYSTEME « POTEAU-POUTRE »

Le module d'élasticité longitudinale est également caractérisé par rapport aux essais de compression longitudinale. Cette caractérisation du module de l'élasticité longitudinale s'effectuant sur la partie centrale, la plupart des modes de ruptures (cf. Figure 3-3) sont perçus dans la caractérisation du module d'élasticité. Cependant, le sixième mode de rupture ne peut pas être intégré dans cette caractérisation du module. C'est justement à ce dernier mode de rupture qu'il est nécessaire de porter une attention particulière en configuration BBGH. Le dernier mode apparaît lorsque l'élément bois n'a pas ou peu de défauts. Ce type de rupture peut, par conséquent, apparaître sur les éléments en bois lamellé-collé étant donné l'homogénéité des propriétés mécaniques et la minimisation de défauts apparents.

Depuis une dizaine d'années bien des projets ont vu le jour aujourd'hui le bois essaye de monter en hauteur (cf. Figure 3-4). Ces trois bâtiments sont construits sur la base de poteau/poutre en bois lamellé-collé.



Figure 3-4 : Immeubles de grandes hauteurs (de gauche à droite : Mjøstårnet plus grande tour en bois Norvège (85,4 m de hauteur) [10], Résidence universitaire de l'université de British Columbia [11] et Immeuble perspective @Groupe Pichet [12])

L'avantage de ce principe pour ces trois bâtiments est d'obtenir de grands espaces (cf. Figure 3-5) permettant de changer l'agencement d'un étage facilement. Le contreventement du bâtiment est, quant à lui, assuré par la cage d'escalier et d'ascenseur pouvant être réalisé en béton [11] ou en CLT [13].



Figure 3-5 : Volume intérieur des bâtiments avec le système poteau poutre [11], [14]

Afin de répondre à ce type de construction, l'utilisation du bois lamellé-collé est devenu le matériau d'ingénierie incontournable pour la fabrication des poteaux. Il permet d'adapter la taille du poteau au regard des efforts à faire transiter jusqu'au fondation. Il peut donc apparaître une « forêt » de poteaux de taille raisonnable comme pour le projet de la résidence universitaire de British Columbia [11]. Au regard des efforts à faire transiter, l'idée initiale du système Poteau/Poutre, c'est-à-dire celle du Moyen-Âge ou celle de l'ossature bois, ne peut plus être adoptée, la descente de charge doit s'effectuer de poteau à poteau par contact. Ainsi, diverses conceptions d'assemblages par contact sont apparues. Elles sont présentées dans la partie qui suit.

4.- ASSEMBLAGE PAR CONTACT

4.1. TOLERANCES

Pour que ce type de structure de grande hauteur puisse voir le jour, il est primordial de pouvoir se baser sur un tolérancement d'exécution qui seul permet de fonder une note d'hypothèses au regard des enjeux mécaniques à relever. Sur la réalisation des poteaux, il y a deux tolérancements qui doivent être respectés, ces derniers sont : la longueur nominale et la perpendicularité des sections afin garantir le contact des surfaces.

4.1.1. Longueurs

Le tolérancement de longueur pour les poteaux en bois lamellé-collé sont données par la norme NF EN 14080 [3]. Pour l'éléments bois lamellé-collé, la tolérance d'exécution de longueur est un pourcentage de $\pm 0,1$ % de la longueur nominale pour les éléments compris entre 2 m et 20m. En dessous, la tolérance de longueur est de ± 2 mm et au-delà, elle est de ± 20 mm. Étant donné l'évolution de la construction bois, le projet de norme d'exécution de la norme NF EN 1995-1-1 [15] propose un nouveau tolérancement d'exécution sur la longueur, celle-ci est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Écarts maximaux en dimensions sur la longueur [15]

Géométrie découpée/usinée	Schéma	Δ_{\max}
Longueur de la poutre ou de la plaque, ou largeur de la plaque	<p>Le schéma illustre un poteau en bois lamellé-collé. La longueur nominale est notée 'l', la largeur est notée 'b', et l'écart maximal est noté 'Δ'. Des flèches indiquent la direction des lamelles.</p>	En retenant la valeur la plus élevée : $\pm 5,0$ mm ou $\pm 1/1000$, et $\pm b/1000$

En prenant le cas d'un poteau en bois lamellé-collé de 3000 mm de hauteur, le tolérancement selon la norme NF EN 14080 donne une longueur comprise entre 2997 et 3003 mm tandis que le projet de norme d'exécution de la norme NF EN 1995-1-1 [15] donne une longueur comprise entre 2995 et 3005 mm.

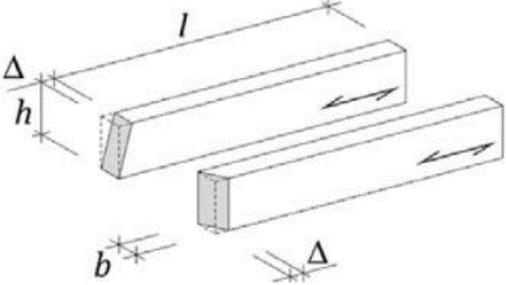
Si, le calcul est fait sur la résidence universitaire de 18 niveaux avec des poteaux de 3000mm, un écart maxi de 18 cm peut être visible entre deux empilements de poteaux pour le cas extrême.

Dans le cas où un contact direct est souhaité pour la transmission des efforts, des solutions techniques doivent être mises en œuvre pour compenser ces écarts dimensionnels.

4.1.2. Perpendicularité

Le deuxième tolérancement est le défaut de perpendicularité sur un élément comprimé. Contrairement au tolérancement de longueur, celui-ci a une incidence sur la raideur de contact. Le tassement va s'effectuer de manière progressive et de manière non homogène sur la section. Il induira un déplacement plus important pour avoir un contact intégral sur la section du poteau. Aujourd'hui, le projet de norme d'exécution [15] propose le tolérancement du défaut de coupe.

Tableau 2 : Écarts maximaux en dimensions sur la perpendicularité [15]

Géométrie découpée/usinée	Schéma	Δ_{\max}
Contact par pression (par exemple, appuis, assemblages bout à bout, assemblage de charpente)		En retenant la valeur la plus élevée : 1,5 mm ou $(h+b)/1000$, ou 5,0 mm si un dispositif de contact approprié est utilisé

Afin de donner une définition claire pour établir le tolérancement d'une coupe d'about, il est intéressant de s'inspirer de la cotation fonctionnelle issue de la mécanique car celle-ci peut facilement s'adapter (cf. Figure 4-1). Si, le calcul est effectué avec des poteaux de 400mm par 400mm, la zone de tolérance est de 1,5mm. Si celui-ci est supérieur à 1,5 mm et inférieur à 5mm, ce tolérancement est très large et inadapté à la construction d'immeuble de grande hauteur, des dispositions de montage adaptées doivent être prises permettant de compenser ces défauts de fabrication.

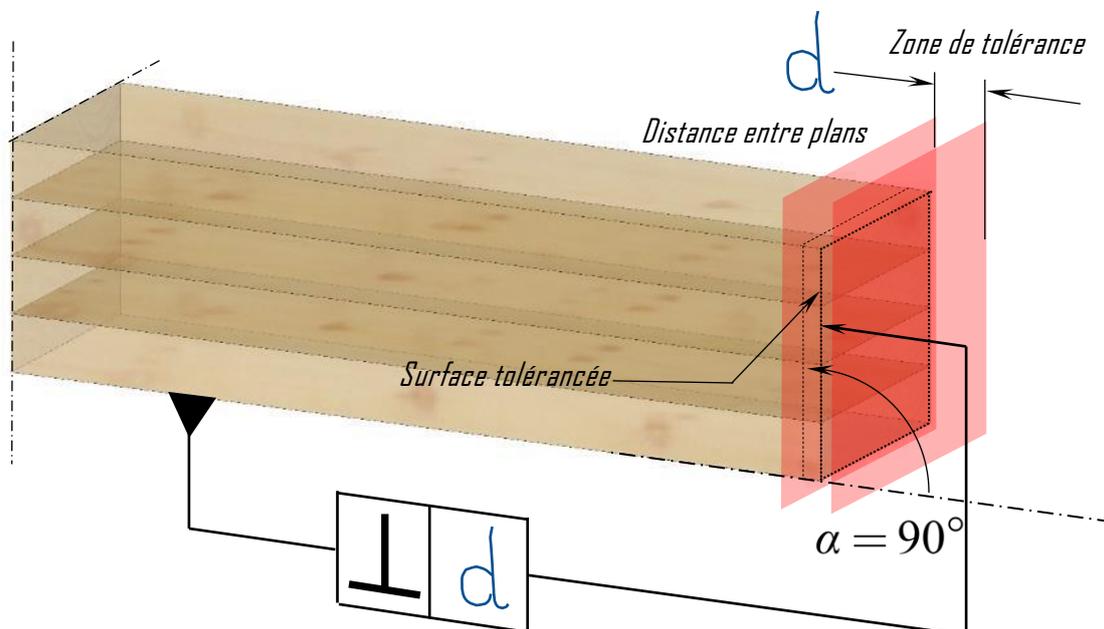


Figure 4-1 : Schéma de principe pour le contrôle de tolérancement de la perpendicularité en mécanique

4.2. TYPES D'ASSEMBLAGES PAR CONTACT

4.2.1. Assemblage Bois/Bois

Ce premier type d'assemblage par contact est sans doute le plus simple qui soit puisqu'il consiste à mettre directement les deux surfaces en contact l'une sur l'autre. Ce principe d'assemblage est par exemple utilisé dans le système AZURTEC sous avis technique pour assembler deux murs à poteaux et voiles travaillant collés l'un sur l'autre.

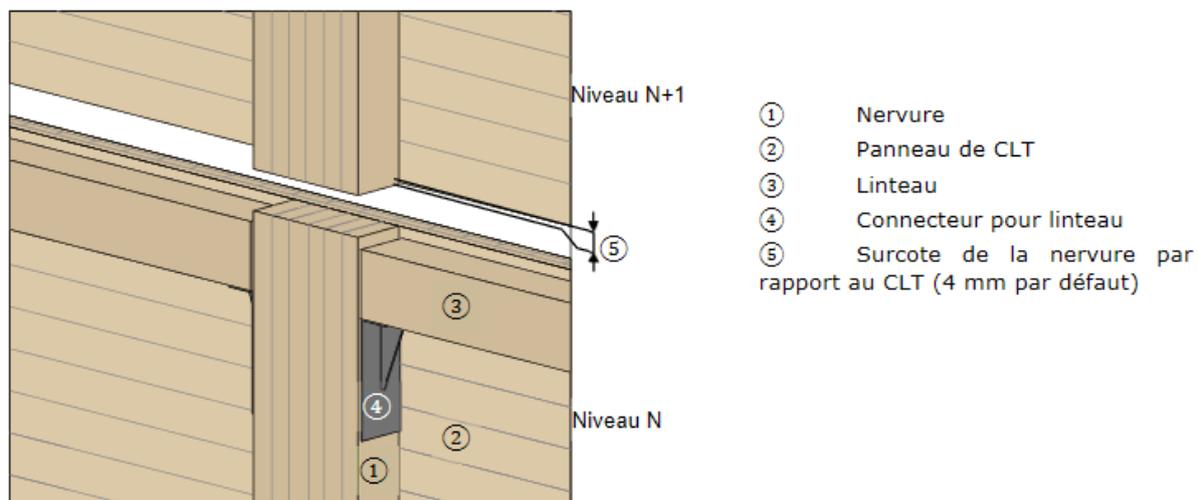


Figure 4-2 : Exemple d'assemblage Bois/Bois [16]

Il est évidemment nécessaire de liasonner les poteaux les uns avec les autres. Il peut être constaté ici que sur ce système, la précision de la surcote du poteau doit être bien assurée afin d'éviter une mise en compression du voile travaillant en CLT à l'extérieur.

4.2.2. Assemblage Bois/Métal

Le premier type d'assemblage par contact fréquemment rencontré en système poteau poutre consiste à faire reposer l'extrémité sciée du poteau sur une plaque métallique. Suivant ce principe, plusieurs conceptions d'assemblage peuvent être réalisées en intégrant différentes fonctions à la plaque métallique : spécifiquement le montage et la transmission d'autres efforts que celui de compression axiale dans le poteau. Un principe simple est illustré sur la Figure 4-3. Sur le projet de la nouvelle gare et de l'hôtel de ville à Växjö [17] en Suède, une plaque métallique de faible épaisseur est interposée entre les abouts des poteaux. Cette plaque est équipée de rebords permettant la fixation et l'alignement des poteaux. Ce principe permet d'interposer facilement des cales de réglage de hauteur au besoin.



Figure 4-3 : Exemple d'assemblage Bois/Métal [17]

Ce principe d'intégration d'une plaque métallique à la jonction de deux poteaux (cf. Figure 4-4 (a)) a également été mise en place pour la construction du bâtiment Wood Innovation and Design Centre [13]. Afin de reprendre des efforts de traction, des tiges collées ont été insérées dans le poteau. Elles passent à travers la plaque métallique et viennent se fixer dans un tube inséré à l'intérieur du poteau pour répartir la charge. Ici l'interposition de plaques métalliques permet le calage en hauteur des éléments et donc le réglage.

Un autre principe d'assemblage a été adopté pour la construction de la résidence universitaire de l'université du British Columbia [11]. Ici la plaque métallique est dimensionnée en épaisseur afin de concentrer le passage de la charge sur un tube qui permet de traverser le plancher et de se raccorder au poteau de l'étage inférieur. Ce principe comporte une partie mâle et une partie femelle permettant de ficher les poteaux facilement sur chantier (cf. Figure 4-4 (b)).

La différence de rigidité des plaques sur ces deux modes d'assemblages de poteaux n'influe pas sur la qualité et la raideur de contact bois métal, la caractérisation du contact bois métal est donc indépendante de la conception d'assemblage.

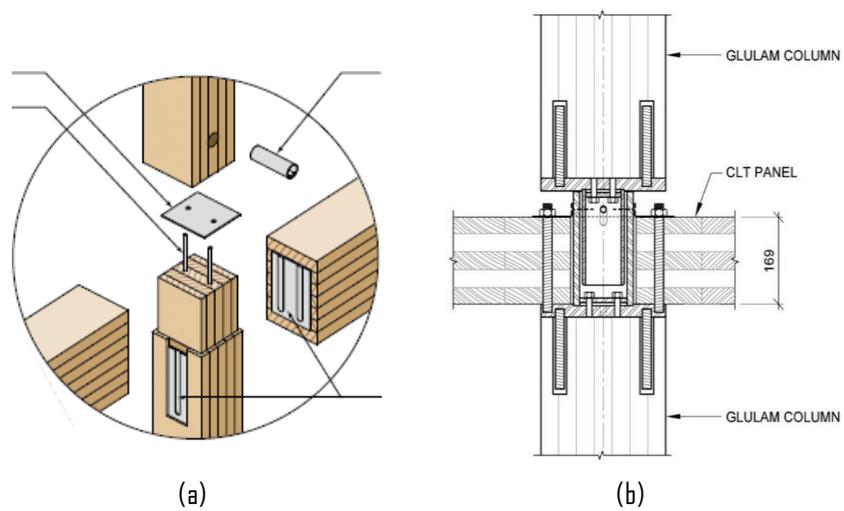


Figure 4-4 : Exemple d'assemblage Bois/Métal (A gauche [13] et à droite [11])

4.2.3. Assemblage Bois-Mortier

Le dernier principe d'assemblage pouvant être utilisé est un assemblage par contact avec un mortier de calage. Ce principe d'assemblage peut être utilisé pour compenser les défauts de perpendicularité de surface de contact conformément au projet de norme d'exécution [15]. Indirectement ce principe a été utilisé pour la construction du bâtiment « LifeCycle Tower One » pour colmater les aspérités au tour de tube métalliques (cf. Figure 4-5).

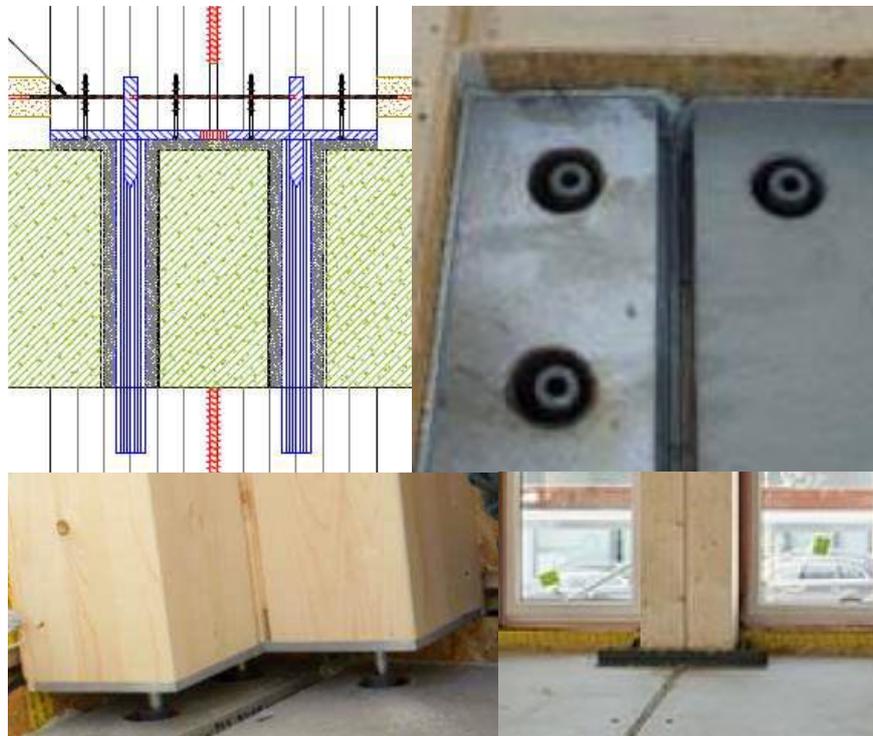


Figure 4-5 : Exemple d'assemblage avec un mortier de calage [14]

5. – CARACTERISATION DES ASSEMBLAGES PAR CONTACT

Aujourd'hui, peu de travaux scientifiques et expérimentaux traitent d'assemblages par contact, puisque l'importance de cet assemblage n'était pas primordiale pour la grande majorité des structures standards. Les matériaux dit d'ingénieries sont apparus permettant une homogénéisation des propriétés matériaux et une réduction de leur variabilité. Dans la bibliographie récente, deux articles de congrès internationaux traitent de la problématique des assemblages par contact : l'un est apparu en 2016 au WCTE, l'autre en 2019 à INTER. Le contenu de ces deux articles est résumé dans la suite de ce document.

5.1. ETUDE CEPELKA AND MALO [18]

Le premier article a été publié au congrès WCTE par CEPELKA and MALO [18]. Cet article présente les résultats d'une campagne d'essais de compression uni-axiale parallèle au fil avec deux types de contact, l'un Bois/Bois, l'autre Bois/Métal/Bois. Ces essais ont eu pour objectif d'étudier l'influence de la mise en œuvre ou non d'une plaque métallique entre deux éléments bois sollicités en compression axiale au regard de la résistance et de la rigidité de contact. Ces essais ont permis d'obtenir la résistance de l'interface, le tassement initial, une raideur de contact ainsi que le facteur de ductilité pour ces deux types de contact. Un modèle mathématique, par une association de ressort a été proposé permettant de quantifier la raideur d'assemblage par contact.

5.1.1. Campagne expérimentale

Dans cette campagne expérimentale, deux lots de 12 éprouvettes soit 48 éléments bois ont été usinés avec du bois lamellé-collé de classe GL30C conformément à la norme NF EN 14080 [3]. La section transversale des éprouvettes était composée d'une section formée de trois lamelles d'épaisseur 45mm en sapin Epicéa pour finir avec une section transversale de 130*130mm². Ces dimensions ont été choisies pour minimiser l'impact d'un défaut dans l'éprouvette et garantir une rupture dans la zone de contact. Ces éléments bois mesurent 300mm de long. Ainsi l'éprouvette mesure 600mm pour l'assemblage avec le contact Bois/Bois (B-B). Pour l'éprouvette possédant la plaque métallique (B-M-B), l'échantillon mesure 610mm puisque la plaque métallique mesure 10mm d'épaisseur. L'humidité des bois en moyenne était comprise entre 11% au lieu de 12% préconisée par la norme NF EN 408 [19]. La densité moyenne des éléments bois est de 479kg/m³ pour une valeur caractéristique de la densité à 456kg/m³. Une attention particulière a été apportée lors de la confection des éprouvettes vis-à-vis du parallélisme entre les faces supérieures et inférieures des éléments bois et de la perpendicularité de ces faces au regard de la longueur de l'éprouvette : ils se sont placés dans le cadre d'un contact parfait.

La Figure 5-1 présente le montage ainsi que les équipements pour caractériser les raideurs de contacts. Un appui sphérique a été mis en tête de l'éprouvette afin de garantir un parfaitement alignement des réactions d'appuis. Le cycle adopté est une rampe croissante en déplacement à une vitesse constante de 0,015mm/s permettant d'obtenir la rupture en 300s conformément à la norme NF EN 408 [19].

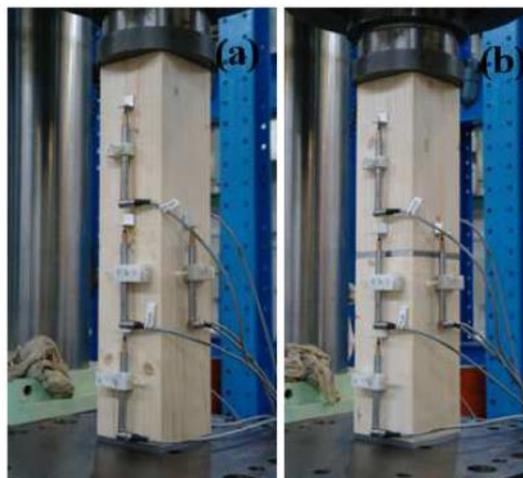


Figure 5-1 : Configuration d'essai avec les deux lots d'éprouvettes Bois /Bois à gauche et Bois Métal Bois à droite [18]

Concernant les mesures de déplacements, chacun des échantillons a été équipé de 8 capteurs, 4 d'entre eux ont été positionnés pour mesurer le tassement sur chacune des faces. Les 4 autres ont été positionnés pour mesurer le raccourcissement des éprouvettes afin de déterminer un module d'élasticité. La distance de mesure de chacun des capteurs est d'environ 60mm.

5.1.2. Résultats

En compilant l'ensemble des essais [18], la Figure 5-2 montre le comportement de l'ensemble des éprouvettes avec une allure et un niveau de rupture similaire entre les deux lots d'éprouvettes. Le déplacement correspond à la valeur moyenne de 4 capteurs de déplacement positionnés dans la zone de contact.

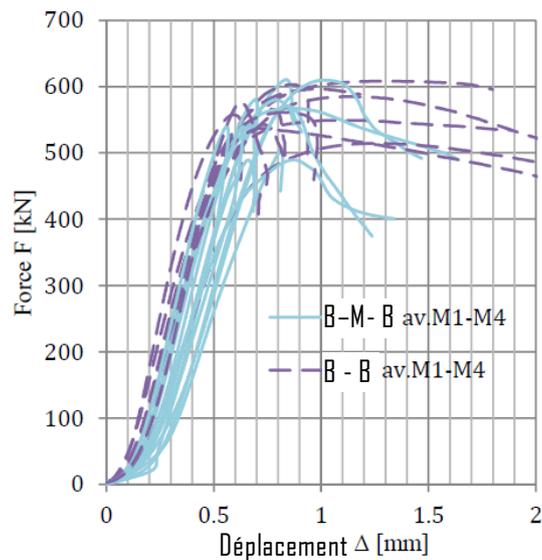


Figure 5-2 : Courbes d'essais [18]

Pour les éprouvettes de contact Bois/Bois, un écrasement est observé dans la zone de contact avec une déformation variable entre les éprouvettes (cf. Figure 5-3). Cependant, l'essentiel des ruptures a été observées au voisinage d'un défaut, le plus généralement autour d'un nœud de manière aléatoire quel que soit le lot d'éprouvette. Cette analyse montre que les zones de contact ne sont pas les points de faiblesse en termes de résistance.

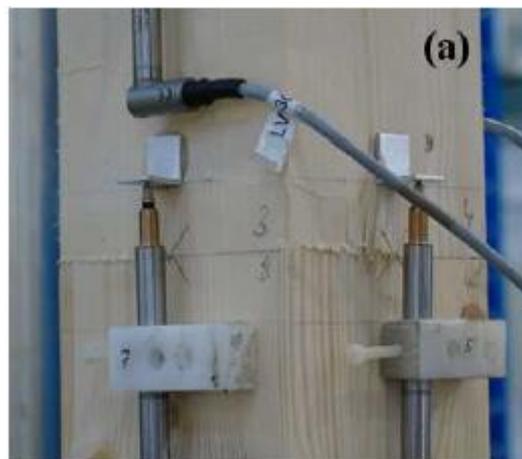


Figure 5-3 : Rupture en zone de contact pour une éprouvette Bois/Bois [18]

Une observation plus détaillée a été effectuée au niveau de la zone de contact. Il est observé un tassement des cernes de printemps puisque la densité de ces dernières est moins élevée que les cernes d'été (cf. Figure 5-4). De plus, les tassements ne sont pas homogènes sur l'ensemble de la zone de contact, c'est-à-dire qu'une partie du tassement est observée sur l'élément bois supérieur et l'autre partie est observée sur l'élément bois inférieur.

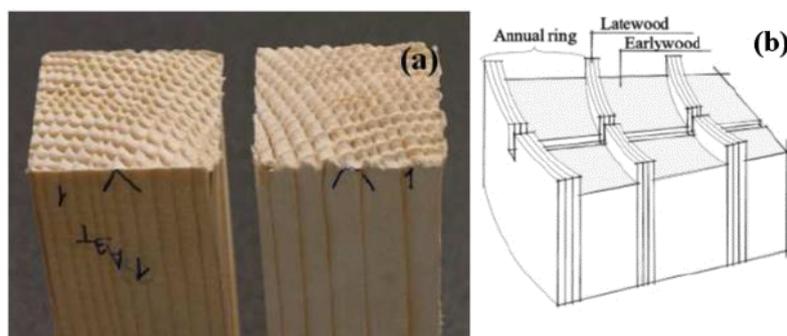


Figure 5-4 : Zoom de la zone de contact après essai.

Le Tableau 3 présente les valeurs moyennes et caractéristiques de la résistance en compression parallèle au fil. Au regard de ces valeurs, aucune différence significative n'est observée sur la valeur caractéristique de la résistance en compression parallèle au fil entre les deux lots d'éprouvettes Bois/Bois et Bois /Métal.

Tableau 3 : Valeurs statistiques de la résistance à la compression axiale [18]

Configuration	$f_{c,0,mean}$ [MPa]	$f_{c,0,k}$ [MPa]	Ecart-type	COV [%]
Bois/Bois	33,6	30,5	1,7	5,1%
Bois/Métal	33,3	29,0	2,3	6,9%

Deux autres paramètres ont également été définis à la suite de ces expériences. Le premier est un jeu initial défini conformément à la norme ISO 6891 [20]. Il définit le jeu initial comme étant le déplacement observé pour un seuil d'effort de $0,2 F_{max}$. Le Tableau 4 résume ces tassements initiaux pour les deux lots d'éprouvettes.

Tableau 4 : Valeurs des tassements initiaux

Configuration	Moyenne [mm]	Ecart-type	COV [%]
Bois/Bois	0,20	0,02	12,0%
Bois/Métal	0,26	0,05	19,0%

Le deuxième paramètre est la raideur de tassement de contact. Pour ce faire, CEPELKA et MALO [18] ont pris un modèle de ressort linéaire en série pour caractériser plus précisément la raideur de contact. Le principe a consisté à soustraire à la valeur moyenne du tassement des 4 capteurs de la zone de contact, la déformation de chacun des éléments bois ainsi que le tassement initial. Ces valeurs de raideurs sont définies dans le Tableau 5. Ces valeurs, si elles sont divisées par la section transversale des éprouvettes, permettent également d'obtenir une raideur de fondation élastique « $k_{c,mean}$ » en $[N/mm^3]$.

Tableau 5 : Valeurs moyennes et caractéristiques des raideurs de tassement de contact

Configuration	$K_{C,mean}$ [kN/mm]	$K_{C,k}$ [kN/mm]	Ecart-type	COV [%]	$k_{c,mean}$ [N/mm^3]
Bois/Bois	2796	1740	630	22,5%	165,4
Bois/Métal	2780	1569	771	27,7%	164,5

Les valeurs précédentes montrent que d'après ces expériences, il n'y a pas à priori pas de différence de raideur entre un contact Bois /Bois et un contact Bois /Métal /Bois.

Afin d'identifier la part de cette raideur de contact au regard du tassement de la zone de contact complet, CEPELKA et MALO [18] ont calculé un ratio de la valeur de raideur totale de la zone de contact sur la raideur équivalente des éléments bois 1 et 2 selon l'équation suivante :

$$\eta = \frac{k_{total}}{\frac{k_1 \times k_2}{k_1 + k_2}}$$

CEPELKA et MALO [18] ont fait ce calcul sur l'ensemble des éprouvettes. Il présente les résultats sous forme d'histogramme (cf. Figure 5-5). Ces valeurs montrent que sur des éprouvettes de 600 mm de hauteur, la part du tassement de contact varie de 35% à 60% de la raideur totale selon les échantillons.

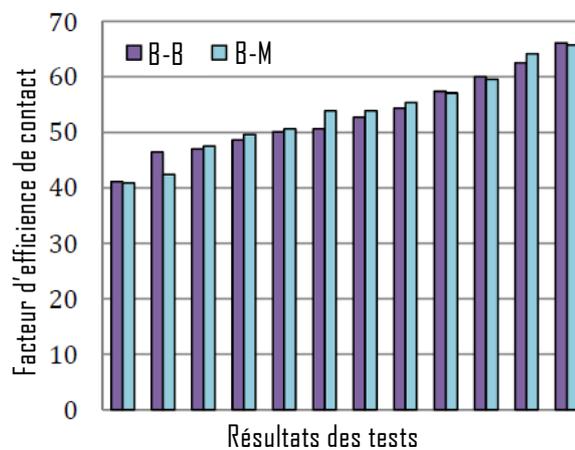


Figure 5-5 : Valeur des ratios de déformation de contact [18]

5.2. ETUDE FLAIG, SCHMIDT ET BLASS [21]

La deuxième étude expérimentale a été publiée au congrès INTER par FLAIG and al. [21]. Cet article présente les résultats d'une campagne d'essais de compression uni-axiale parallèle au fil avec plusieurs configurations sur du bois lamellé-collé et sur du bois lamellé-croisé (CLT). Ces essais avaient pour objectif d'étudier l'influence de la raideur et la résistance d'un joint de continuité en compression par contact sous différentes configurations avec différents matériaux. Ces essais ont permis d'obtenir la résistance de l'interface ainsi que la raideur de contact. Comme une partie de ces essais portent sur différents matériaux seuls les résultats d'essais en compression Bois/ Bois pourront être comparés aux résultats de l'étude précédente.

5.2.1. Campagne expérimentale

Pour cette campagne expérimentale, six lots de 13 à 16 éprouvettes ont été réalisés. Deux de ces six lots sont constitués de bois lamellé-collé de classe GL24h conformément à la norme NF EN 14080 [3]. La section de ces échantillons est de 100 mm par 80mm. La hauteur totale de l'échantillon est de 480mm avec, pour un lot, une zone de contact à mi-hauteur. L'autre lot est constitué d'éprouvettes sans zone de contact en partie centrale. La densité moyenne des échantillons de l'ensemble des lots est de 472,5 kg/m³, avec une humidité de 11,8%.

Les quatre autres lots sont constitués d'éléments en bois lamellé-croisé de classe C24. La hauteur des éprouvettes est de 1200mm pour une section de 600mm par 200mm. Le premier lot est composé d'éprouvettes toute hauteur. Le deuxième lot est constitué d'éprouvettes avec une zone de contact Bois/Bois à mi-hauteur. Le troisième lot est composé d'éprouvettes avec une zone de contact Bois/Métal constitué d'une plaque métallique. Le dernier lot est identique au deuxième lot. Cependant, les éprouvettes de ce dernier lot ont été immergées dans l'eau pendant 30 min pour simuler des intempéries sur chantier. Le Tableau 6 présente la synthèse des configurations.

Tableau 6 : Descriptif des éprouvettes d'essais.

Matériau	Zone de contact	Plat métallique	Nombre d'éprouvettes	Composition des plis/lamelles [mm]	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]
CLT (Témoin)	Non	Non	15	40-20-40-40-20-40	1200	600	200
CLT	Oui	Non	15	40-20-40-40-20-40	2 x 600	600	200
CLT + humidification	Oui	Non	13	40-20-40-40-20-40	2 x 600	600	200
CLT + humidification	Oui	Oui	15	40-20-40-40-20-40	2 x 600	600	200
BLC (Témoin)	Non	Non	16	20-40-20	480	100	80
BLC	Oui	Non	16	20-40-20	2 x 240	100	80

La Figure 5-6 présente le montage ainsi que les équipements pour caractériser les raideurs de contact sur les éprouvettes en bois lamellé-collé. Les essais ont été effectués conformément à la norme NF EN 408 [19], excepté la distance de mesure des déplacements. Cette distance a été réduite à 100mm au lieu de retenir 4 fois l'épaisseur de l'éprouvette selon la norme NF EN 408 [19]. Chacun des échantillons a été équipé de 4 capteurs. Ils ont été positionnés au niveau de la zone de contact sur uniquement deux faces opposées (cf. Figure 5-6).

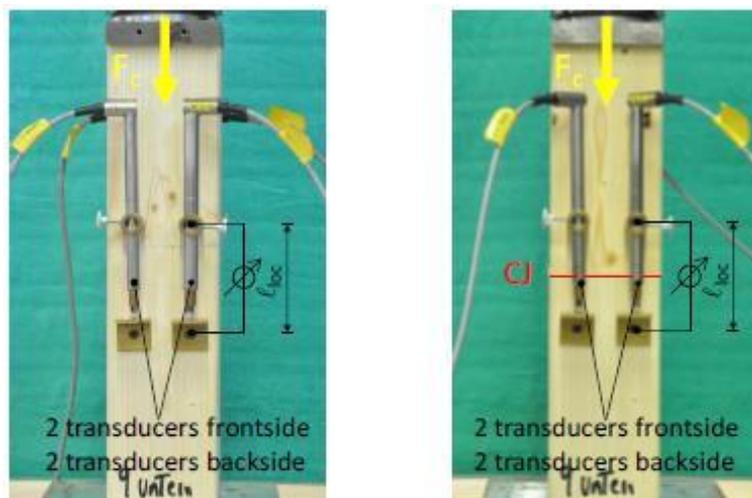


Figure 5-6 : Configuration d'essai avec les deux lots d'éprouvettes sur le bois lamellé-collé [21]

Afin d'obtenir le module des éprouvettes en bois lamellé-collé, des essais non destructifs ont tout d'abord été effectués sur les éprouvettes entières jusqu'au seuil de 40% de l'effort estimé à rupture. Suite à ces essais, la valeur du module d'élasticité a été calculée entre les seuils de 10% et 40% de l'effort estimé conformément à la norme NF EN 408 [19]. A la suite de ces essais non-destructifs, les éprouvettes ont été découpées à mi-hauteur puis tournées à 180° pour croiser les cernes en zone de contact.

5.2.2. Résultats

Dans le cadre de cette bibliographie seuls les résultats correspondant aux essais de contact bois sur bois lamellé-collé sont présentés. Les résultats d'essais de cette campagne montrent les comportements de l'ensemble des éprouvettes en bois lamellé-collé (Figure 5-7). Le déplacement correspond à la valeur moyenne de 4 capteurs de déplacement positionnés dans la zone de contact.

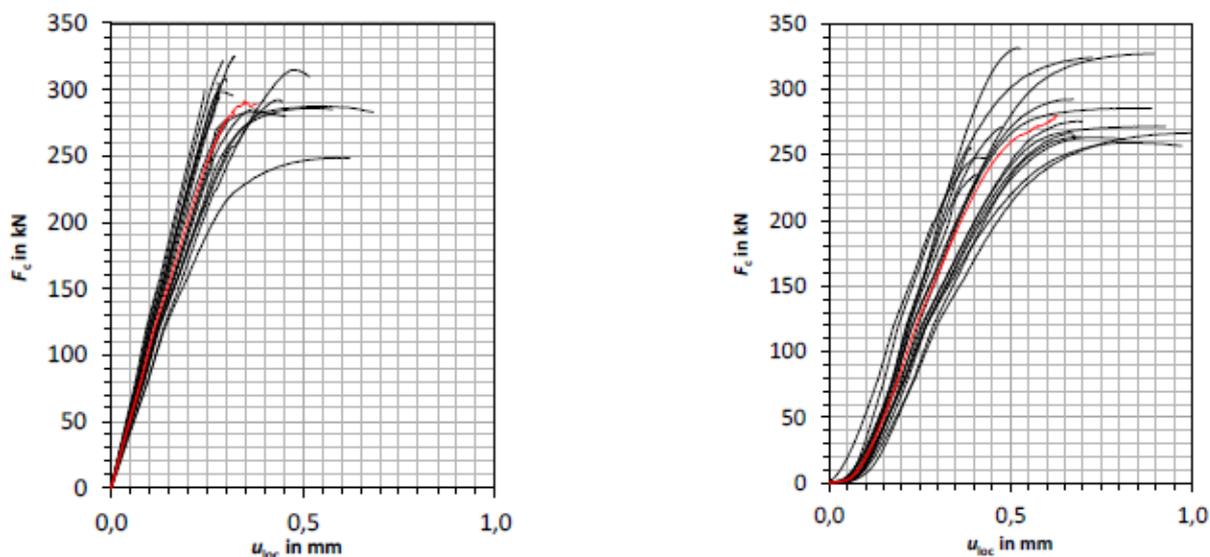


Figure 5-7 : Courbes d'essais sur les éprouvettes en bois lamellé-collé (essais bois sans contact à gauche, essais bois avec contact à droite) [21]

Pour les éprouvettes de contact Bois/Bois, un écrasement a été observé dans la zone de contact, ce tassement s'est généralement poursuivi par une rupture au niveau de la zone de contact (cf. Figure 5-8).



Figure 5-8 : Rupture en compression de la zone d'assemblage [21]

La contrainte de compression est obtenue en divisant l'effort de compression par la section. Pour les échantillons possédant une zone de contact, la raideur de la zone de contact est définie de manière similaire à l'étude précédente : elle est exprimée par une raideur de fondation élastique en $[N/mm^3]$. L'ensemble des résultats est résumé dans les Tableau 7 et Tableau 8 respectivement pour les échantillons avec et sans zone de contact.

Tableau 7 : Valeurs de résistance et de module d'élasticité des éprouvettes sans zone de contact [21]

Echantillon	ρ $[kg/m^3]$	$f_{c,0}$ $[MPa]$	$E_{c,0}$ $[MPa]$
1	489	38,5	14520
2	488	40,8	13490
3	439	34,5	12050
4	451	31,1	11580
5	502	39,2	11140
6	494	40,1	14300
7	443	36,5	10670
8	507	37,3	13980
9	483	35,5	13990
10	429	34,7	11900
11	504	35,6	11830
12	419	35,5	11290
13	459	37,0	14240
14	497	38,3	14330
15	517	35,9	12110
16	470	37,0	14330
Minimum	419	31,1	10670
Maximum	517	40,8	15200
Moyenne	474	36,7	12859
Fractile		32,2	

Tableau 8 : Valeurs de résistance, de module d'élasticité et de raideur des éprouvettes avec une zone de contact [21]

Echantillon	ρ [kg/m ³]	$f_{c,0}$ [MPa]	$E_{c,0}$ [MPa]	$k_{c,j}$ [N/mm ³]
1	482	32,0	14120	363
2	484	33,2	11350	261
3	488	33,8	16660	362
4	456	33,2	9220	275
5	494	34,4	9850	266
6	425	32,2	10340	252
7	499	29,6	13170	330
8	506	31,1	13520	307
9	443	32,6	10260	259
10	449	33,9	11270	274
11	432	35,6	10900	370
12	503	41,2	16130	365
13	496	40,8	13300	283
14	412	32,8	11310	263
15	508	40,2	14330	482
16	459	36,2	12110	375
Minimum	412	29,6	9220	252
Maximum	508	41,2	16660	482
Moyenne	471	34,5	12365	318
Fractile		28,5		

5.3. ANALYSE COMPARATIVE DES DEUX ETUDES

Ces deux études se différencient dans la manière de définir la raideur de contact : il existe deux manières d'expliciter la raideur de contact. La première estimation, adoptée par CEPELKA and MALO [18], consiste à définir une raideur comme étant une raideur d'assemblage exprimée en kN/mm. La deuxième estimation, adoptée par FLAIG, SCHMIDT et BLASS [21], est l'estimation de la raideur comme étant une raideur de fondation élastique exprimée en N/mm³. La relation qui relie ces deux propositions est l'équation suivante :

$$k = \frac{K}{A_{net}}$$

avec :

- K : Valeur de la raideur d'assemblage [kN/mm]
- k : Valeur de la raideur de fondation élastique [kN/mm³]
- A_{net} : Valeur de la section nette résistante [mm²]

Afin de comparer ces deux estimations de raideur de contact, le Tableau 9 présente les résultats obtenus à partir uniquement des valeurs moyennes.

Tableau 9 : Comparaison des raideurs de contact moyennes des deux études sur les assemblages Bois/Bois.

Echantillon	k [kN/mm ³]	K [kN/mm]	A _{net} [mm ²]
CEPELKA	165	2796	130*130
FLAIG	318	2544	100*80

Au regard des valeurs présentées dans le Tableau 9, il apparaît que les raideurs de contact dite « Assemblage » sont assez similaires pour les deux campagnes d'essais. Cependant, cette analyse n'est pas vraie sur les raideurs de contact dites « Fondation élastique », lorsque les choses sont ramenées à l'aire de contact. Un rapport de 1,93 est visible entre ces deux raideurs de contact dite « Fondation élastique ». Il est à noter un rapport de 2,11 au niveau des sections.

L'ordre de grandeur de la valeur mesurée est sans doute à l'origine de cet écart de résultats finaux.

6. - CONCLUSIONS

Dans les constructions de grandes hauteurs, les assemblages par contact permettent des transferts d'efforts de charges gravitaires très importants à un coût réduit. Ces assemblages par contact peuvent être bois métal ou bois sur bois. Les études expérimentales sur le sujet ne sont pas convergentes en termes de caractérisation car la raideur de fondation qui permet de les comparer sont différentes et apparaissent dépendantes de la surface de contact. Ceci est à relativiser car l'ordre de grandeur de ce qui est analysé est très faible. Les écarts peuvent facilement être dans le bruit de ce qui est mesuré. Dans les deux études expérimentales qui ont été menées, les contacts étaient parfaits c'est-à-dire sans défaut de surface et de perpendicularité.

Aujourd'hui, un projet de norme d'exécution est en cours de rédaction, en parallèle de la révision de la norme NF EN 1995-1-1 [5], afin de fixer des tolérances d'exécution sur la longueur des éléments et sur la « perpendicularité » des coupes transversales. L'influence du défaut de perpendicularité sur le jeu initial et la raideur de fondation dans le contexte de la construction de grande hauteur apparaît aujourd'hui comme un manque pour le projeteur.

Dans les situations où ces contacts ne sont pas maîtrisés, des solutions de compensation peuvent être mise en œuvre par l'interposition d'un mortier de calage par exemple. Il n'a pas été trouvé pour le moment dans la bibliographie de choses permettant de définir de raideur de contact pour ces solutions techniques.

Ainsi, le plan expérimental des essais d'assemblage par contact sera constitué de 5 lots de 5 éprouvettes ; une Bois-Bois sans défaut apparent [B/B], une Bois-Métal-Bois sans défaut apparent [B/M/B], une Bois-Mortier-Bois [B/MO/B], une Bois-Bois avec défaut apparent [B/B/D], une Bois-Métal-Bois avec défaut apparent [B/M/B/D].

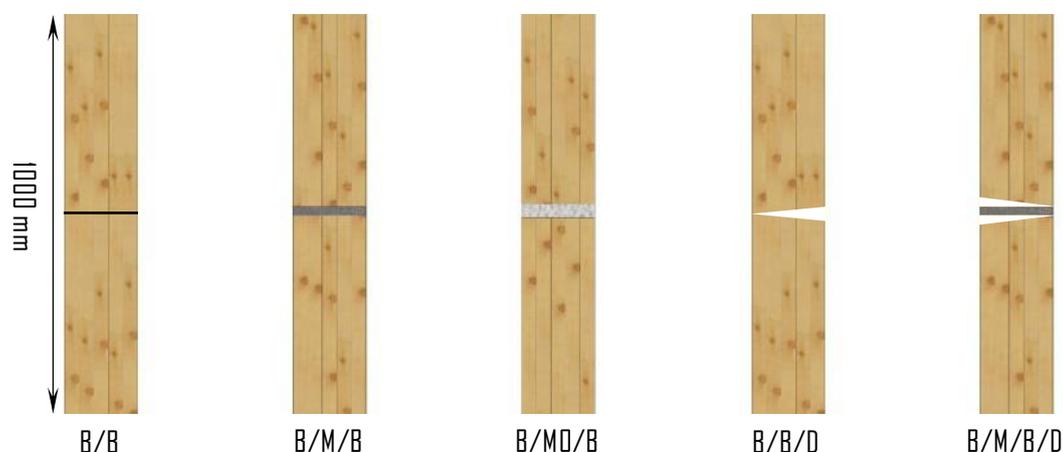


Figure 6-1 : Schéma des configurations d'assemblages par contact à tester.

Les configurations sans défaut permettront d'obtenir des raideurs de fondation de contact à comparer aux valeurs de la bibliographie et de combler les manques sur les solutions techniques de contournement du problème. Les mesures expérimentales permettront de tirer des résultats propres à établir des modélisations de type poutre sur raideur d'appui. Les essais avec des défauts permettront en direct de faire apparaître leur influence et permettront de valider aux besoins des modèles permettant l'extrapolation des résultats. La plupart des bureaux d'études sont équipés aujourd'hui de logiciel qui permettent de modéliser simplement ces contacts non-linéaires afin de tirer profit de ces résultats pour des besoins spécifiques de développement.

Une des difficultés de l'approche est de maîtriser le défaut qui va être introduit et de pouvoir le réaliser dans le cadre d'un contexte industriel afin que ceci garde un sens industriel. Vu l'ordre de grandeur du défaut attendu, il est clair que celui-ci est de l'ordre de la capacité des machines de production. Une procédure spécifique de mesure et de maîtrise du défaut devra être mise en place dans le protocole d'essais.

7.BIBLIOGRAPHIE :

- [1] C. Piquet, "Les ressources, l'économie et les perspectives de la construction bois en France," Besançon, France, 2014.
- [2] ADIVBOIS, "Vade-mecum des immeubles à vivre bois," CODIFAB, Mar. 2017.
- [3] AFNOR, *NF EN 14080: Structures en bois - Bois lamellé collé et bois massif reconstitué - Exigences*. 2013.
- [4] AFNOR, *NF EN 16351: Structures en bois - Bois lamellé croisé - Exigences*. 2015.
- [5] AFNOR, *NF EN 1995-1-1: EC 5 - Eurocode 5 - Calcul des structures en bois - Partie 1-1 - Règles générales et règles pour les bâtiments*. 2005.
- [6] AFNOR, *Règles CB71: Règle de calcul et de conception des charpentes en bois*. 1975.
- [7] F. Kollmann and J. W. A. Cote, *Principles of wood science and technology. vol. 1. Solid Wood*, vol. 1. Springer, 1968.
- [8] AFNOR, *NF EN 338: Bois de structure - Classes de résistance*. 2016.
- [9] G. Pluvinage, *La rupture du bois et ses composites*, Cepadues. 1992.
- [10] R. B. Abrahamsen, "Mjostarnet - Construction of an 81 m tall timber building," Garmisch - Germany, 2017.
- [11] P. Fast, "Case Study : An 18 storey tall mass timber hybrid student resident at the University of British Columbia," Lyon, France, 2016.
- [12] "Inauguration du plus haut immeuble de bureaux en structure bois de France," <https://www.batiactu.com/edito/inauguration-plus-haut-immeuble-bureaux-structure-bois-54566.php>.
- [13] M. Green, "Wood Innovation and Design Centre," 2017.
- [14] H. Kaufmann, "La tour LifeCycleTower One en construction," Beaune, France, 2012.
- [15] BNTEC, *2ème projet de texte de la partie Exécution de l'Eurocode 5*. 2020.
- [16] MATHIS SA, "Avis technique 3.3/17-944_V2." 2021.
- [17] T. Anna, "Växjö - The modern wooden city," Dijon, France, 2018.
- [18] M. Cepelka and K. A. Malo, "Experimental study of end grain effects in timber joints under uniaxial compression load," Vienna, Autriche, 2016.
- [19] AFNOR, *NF EN 408+A1: Structures en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques*. 2012.
- [20] ISO, *ISO 6891: Timber Structures: Joints made with mechanical fasteners: General principles for the determination of strength and deformation characteristics*. 1991.
- [21] M. Flaig, T. Schmidt, and H. J. Blass, "Compressive strength and stiffness of end grain contact joints in glulam and CLT," in *Proceedings of International Network on Timber Engineering (INTER)*, Tacoma, United States, 2019, p. Paper 52-12-5.

2. PRO-3

Protocole d'essais des assemblages par contact



Laboratoire d'Études et de Recherche
sur le Matériau Bois
EA 4370 USC / INRA



Ecole Nationale Supérieure des
Technologies et Industries du Bois

CAMPAGNE D'ESSAIS VISANT A CARACTERISER LA RAIDEUR D'ASSEMBLAGES COURANTS DE STRUCTURES EN BOIS

PRO-3 : Protocole d'essais des assemblages par contact

Fait à Epinal, le vendredi 17 décembre 2021

Ecole Nationale Supérieure
des Technologies et Industries du Bois
27, rue Philippe SEGUIN
CS 60036
88026 EPINAL

Tél : 03-72-74-96-11
Fax : 03-72-74-96-38
e-mail : jean-françois.bocquet@univ-lorraine.fr

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
1. - ESSAIS DE CARACTERISATION DE D'ASSEMBLAGE PAR CONTACT	3
1.1. PROTOCOLE DES ESSAIS	3
1.1.1. <i>Principe de l'essai</i>	3
1.1.2. <i>Définition des échantillons</i>	4
1.1.3. <i>La chaîne d'acquisition</i>	7
1.1.4. <i>Dispositif de montage</i>	8
1.1.5. <i>Dispositif de contrôle des tolérances</i>	9
1.1.5.1. Mesure du défaut de perpendicularité et de longueur des éprouvettes	9
1.1.5.2. Mesure sans contact	12
1.1.6. <i>Cycle de chargement</i>	14
1.2. RESULTATS	15
2. - BIBLIOGRAPHIE :	19
- ANNEXE A - - DOCUMENTATION TECHNIQUE DU MORTIER CIMENT	20

1. – ESSAIS DE CARACTERISATION DE D'ASSEMBLAGE PAR CONTACT

1.1. PROTOCOLE DES ESSAIS

Les essais seront effectués sur la dalle d'essais mécanique du CAMPUS BOIS située à Epinal (Vosges, 88). Pour la caractérisation, 5 échantillons par lot seront testés afin de déterminer le module de compression et la résistance en compression axiale des assemblages pour chacune des configurations retenues sur le cahier des charges rédigé par la commission structure Adiv'bois. Pour donner suite à l'analyse bibliographique, 2 voire 3 lots de 5 échantillons supplémentaires seront intégrés.

1.1.1. Principe de l'essai

Le principe des essais de caractérisation du contact consistera à déterminer le module de fondation élastique des surfaces en contacts à partir d'un essai en compression axiale, et d'identifier les impacts de défauts de perpendicularité. Les mesures prises seront le déplacement de l'éprouvette aux abords de la zone de contact permettant de remonter à un module de fondation élastique de l'assemblage par contact. Pour les échantillons parfaitement en contact, la valeur du module sera corrigée de la déformation élastique du bois en zone d'assemblage à partir du module d'élasticité théorique des éléments bois GL24 h.



Figure 1-1 : Forme d'éprouvette pour caractériser le module de fondation d'assemblage

Le LERMAB propose de réaliser les essais d'assemblages en partant de la forme d'éprouvette illustrée sur la Figure 1-1. Cette forme d'éprouvette permettra d'intégrer différentes configurations : Bois-Bois, Bois-Métal-Bois et Bois-Mortier-Bois avec et sans défaut apparent.

1.1.2. Définition des échantillons

Trois configurations principales d'assemblages par contact ont été retenues dans le cahier des charges en vue d'évaluer le module de fondation élastique ainsi que la résistance de l'assemblage par contact ; une Bois-Bois [a], une Bois-Métal-Bois [b] et une Bois-Mortier-Bois [c]. À la suite de l'analyse bibliographique, deux configurations supplémentaires seront ajoutées permettant de tester les deux premières configurations avec le défaut apparent maximum autorisé par le projet de norme [1]. Ce dernier sera explicité par la suite.



Figure 1-2 : Schémas des configurations d'assemblage par contact

Chaque configuration d'assemblage sera constituée de deux pièces de bois lamellé-collé GL24h d'une section de 160*160 mm et d'une longueur de 500 mm. Ces pièces seront tronçonnées par une société tierce à l'aide d'une machine de taille de charpente afin d'évaluer le défaut de perpendicularité du tronçonnage et de prendre en compte l'état de surface d'une machine de production. Les pièces fournies par la société tierce auront une section supérieure à 160*160 mm. Ces dernières seront rabotées sur le Campus Bois pour s'adapter parfaitement au montage au moment de l'essai.

Les échantillons seront constitués de la manière suivante :

- La première configuration sera uniquement constituée de deux pièces de lamellé-collé, découpées puis replacées bout à bout sans changer le sens des coupes. Les coupes s'effectueront dans une barre de section légèrement supérieure à 160 par 160 mm. La coupe s'effectuera sur toute la hauteur de la pièce (cf. Figure 1-3).
- La seconde configuration sera constituée de deux pièces de lamellé-collé, découpées puis replacées bout à bout sans changer le sens des coupes. Un plat métallique au niveau de la zone de contact d'une épaisseur de 10mm sera intercalé. Les coupes s'effectueront dans une barre de section légèrement supérieure à 160 par 160 mm. La coupe s'effectuera sur toute la hauteur de la pièce (cf. Figure 1-3).
- La troisième configuration sera constituée de deux pièces de bois lamellé-collé, découpées puis replacées bout à bout sans se préoccuper du sens des coupes. Un mortier de ciment (type Tecnogrout-N/PR) (cf. - Annexe A -) sera intercalé au niveau de la zone de contact. La section du mortier sera de 160*160 mm. Il est proposé d'interposer une épaisseur de 30 mm de mortier. Une finition filmogène sera appliquée aux extrémités des pièces de bois avant la réalisation du joint de mortier ceci dans le but d'éviter une humidification du bois par le mortier qui pourrait entraîner une perte de raideur au moment de l'essai ainsi qu'une mauvaise prise du mortier (cf. Figure 1-3).

Remarque : Il est à noter au regard de la bibliographie et de la configuration avec mortier que l'influence de la reprise d'humidité pourrait être à observer, suivant l'avancement de l'étude des essais après humidification des pièces pourront être envisagés.

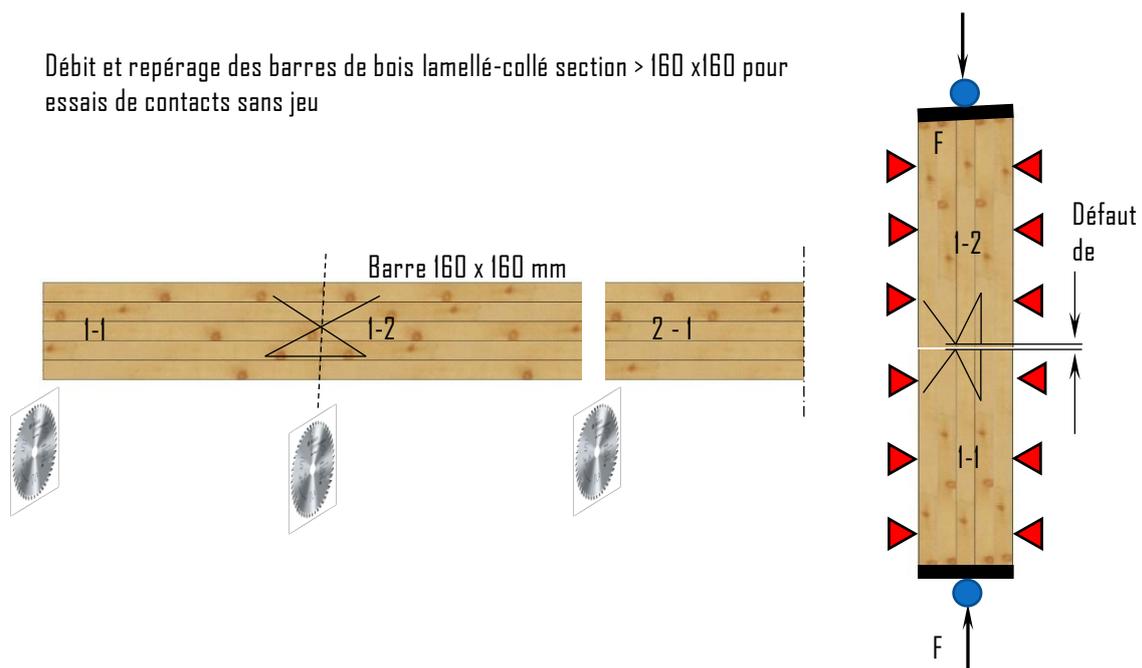


Figure 1-3 : Identification des pièces de bois et éprouvettes d'essais

- Pour confectionner la 4eme et la 5eme configuration, le principe de confection des éprouvettes consistera à fabriquer tout d'abord un poteau de 400 mm par 400 mm. En premier lieu, l'about sera rafraîchi en faisant plonger la lame de scie de quelques mm dans la matière afin d'éviter le dévoiement de la lame. Cette coupe donnera la surface finie avec son défaut. Un bloc d'une longueur de 500 mm sera alors découpé. Cette coupe sera réalisée en deux passages un au-dessous et un au-dessus. L'état de surface et l'angle de ces coupes ne seront pas très importants car ces surfaces seront placées du côté des surfaces de chargement. Une fois le bloc de bois découpé, celui-ci sera refendu en 4, les éléments seront rabotés en conservant pour surfaces de références les surfaces extérieures du poteau 400 x 400 mm. Les éléments seront numérotés et les surfaces d'assemblage à tester repérées (cf. Figure 1-4).
- Un défaut de perpendicularité sera imposé conformément au projet de norme d'exécution [1]. Il sera de 1,5mm pour un poteau de 400mm par 400mm. Ainsi, le tolérancement de perpendicularité sera de 0,6mm pour une section de 160mm par 160mm.
- Après usinage, le défaut de perpendicularité de la surface d'assemblage sera mesuré sur chacune des pièces réalisées. Suivant l'importance des défauts mesurés, les pièces seront alors appariées permettant de produire le défaut maximum autorisé : 2 X 0.6 mm.

Débit et repérage des barres de bois lamellé-collé section > 160 x 160 pour essais de contacts avec jeu dans poteau 400 x 400

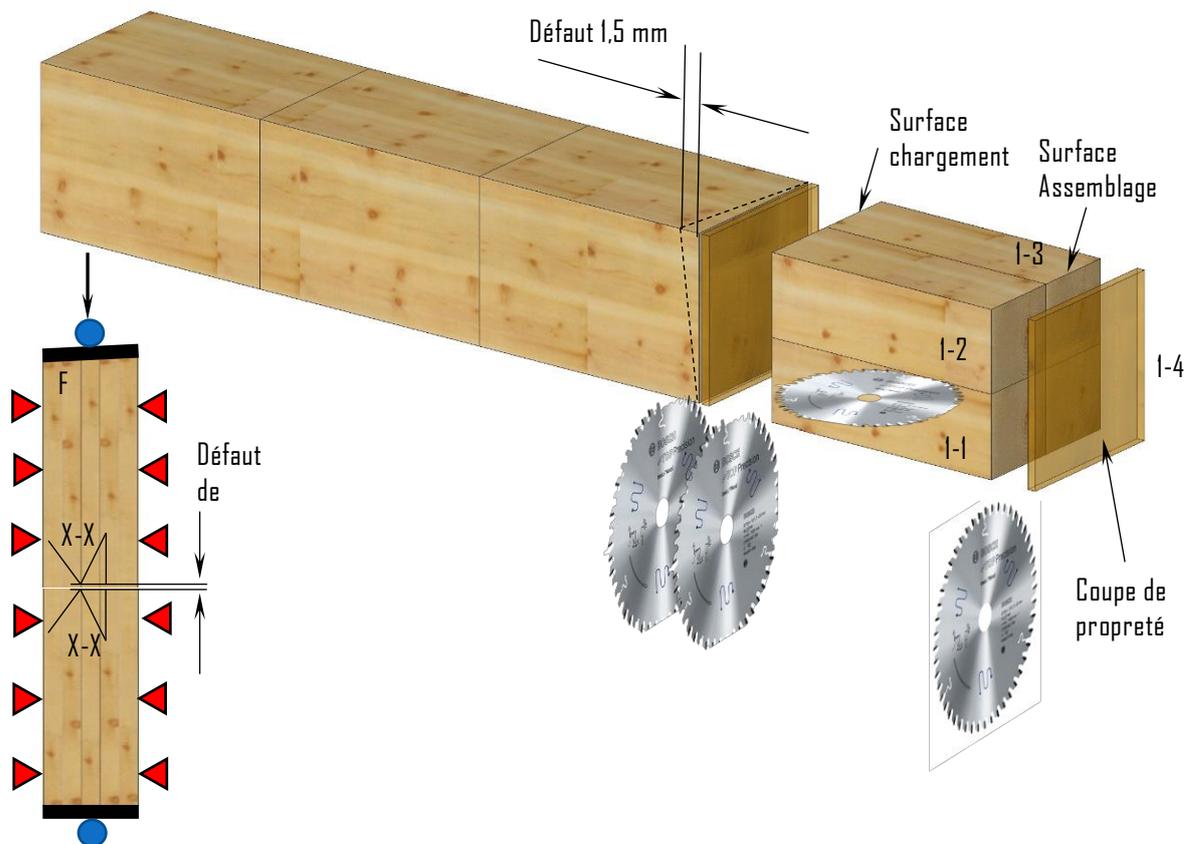


Figure I-4 : Identification des pièces de bois et éprouvettes d'essais pour les éprouvettes avec défauts

1.1.3. La chaîne d'acquisition

Sur chacun des essais, les déplacements de l'échantillon ainsi que la charge dans les vérins seront enregistrés. Ces enregistrements seront ensuite analysés pour déterminer de manière expérimentale les valeurs de résistance et les modules de fondation élastique de l'assemblage par contact. Pour cela un dispositif de mesure constitué de deux chaînes d'acquisition sera mis en place.

Une première chaîne de mesures enregistrera en continu le déplacement, la charge sur les vérins. Cette chaîne d'acquisition sera intégrée dans le système d'asservissement des vérins (cf. partie : 1.1.4).

La deuxième chaîne de mesures sera composée de deux caméras 2D. L'acquisition des données enregistrées par ces caméras sera réalisée par le logiciel VDM_acqui. Pour permettre l'acquisition des données avec cette deuxième chaîne de mesures, des cibles d'une taille adaptée seront disposées sur les deux faces de l'échantillon bois (cf. partie : 1.1.5).

La synchronisation des deux chaînes de mesures sera donnée par un signal de type trigger, permettant une synchronisation instantanée temporelle des données issues des caméras et celles issues des vérins.

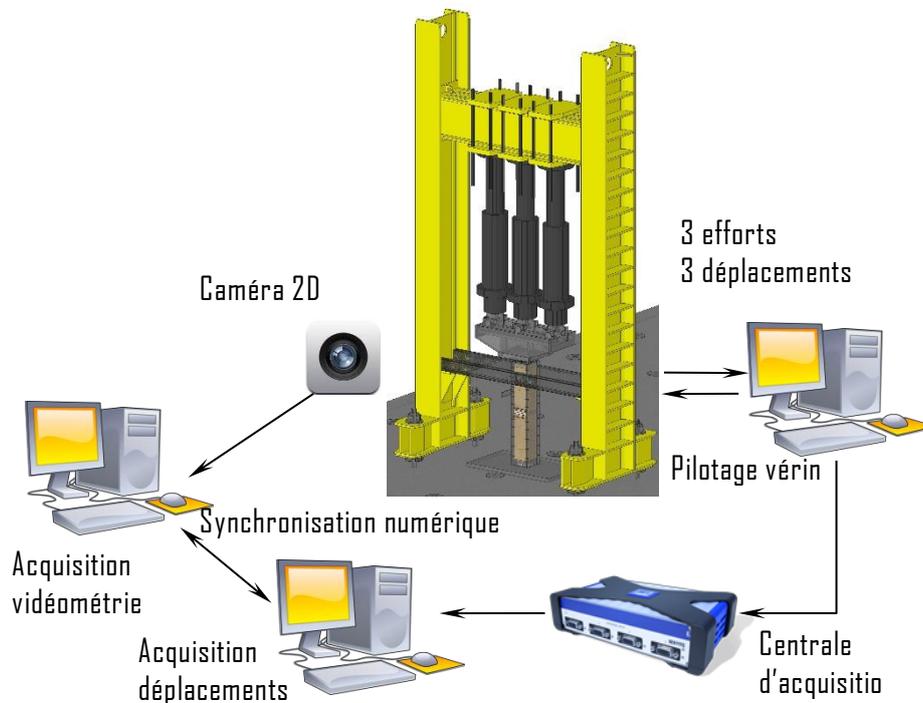


Figure 1-5 : Schéma de la chaîne d'acquisition

1.1.4. Dispositif de montage

Les essais de compression seront effectués selon le principe de montage présenté en Figure 1-6. Le chargement sera réalisé grâce à 3 vérins assemblés à un chevêtre. Une tête de chargement sphérique sera vissée au chevêtre et transmettra l'effort de compression à une plaque d'appui comportant une face sphérique. Les sections des plaques d'appuis seront égales à celles de l'éprouvette d'essai.

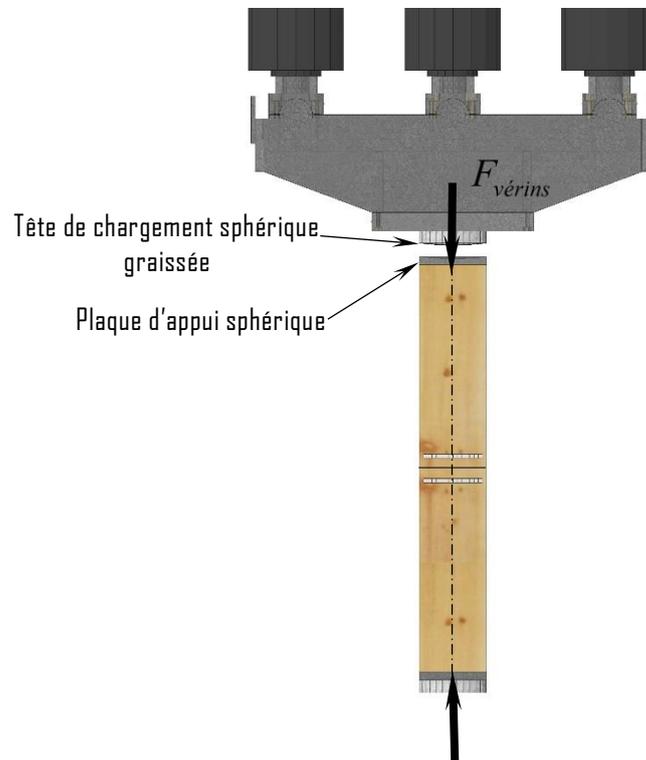


Figure 1-6 : Principe de montage de l'essai de cisaillement

Pour éviter tout déséquilibre de l'échantillon, ce dernier sera guidé par une enveloppe vissée en acier de 20 mm d'épaisseur comme il est illustré sur la Figure 1-7. L'enveloppe sera constituée de deux ouvertures de part et d'autre de l'éprouvette au niveau de la zone de contact. Ces ouvertures permettront de suivre les déplacements de l'échantillon lors de l'essai. L'enveloppe sera graissée pour limiter le frottement. Les ouvertures auront également pour rôle d'éviter que le plat métallique de la seconde configuration d'éprouvette s'arcboute dans les éléments assurant le guidage de l'échantillon. L'enveloppe démontable sera fixée de part et d'autre à 2 UPN qui seront assemblés au bâti, lui-même étant posé sur une ferrure scellée dans la dalle d'essais.

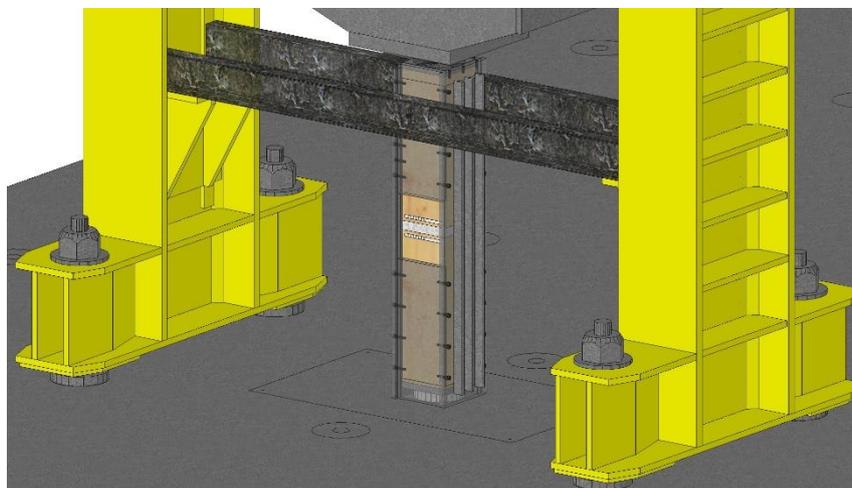


Figure 1-7 : Guidage de l'éprouvette d'essai

1.1.5. Dispositif de contrôle des tolérances

1.1.5.1. Mesure du défaut de perpendicularité et de longueur des éprouvettes

Préalablement aux essais, un contrôle de tolérancement de perpendicularité et de longueur sera effectué selon le principe de montage (cf. Figure 1-8). Ils seront comparés aux préconisations du projet de norme d'exécution [1].



Figure 1-8 : Principe de montage du contrôle de perpendicularité.

Pour ce faire, deux plaques du montage de compression seront adaptées permettant d'avoir deux plans parfaitement perpendiculaires. A chacune de ces extrémités, une plaque métallique sera fixée perpendiculairement aux deux précédentes. Une de ces plaques sera conçue pour permettre l'intégration de 9 comparateurs selon la Figure 1-8. Les comparateurs de contour seront positionnés à 10 mm du contour de l'échantillon. Le comparateur central sera lui positionné à l'axe de l'éprouvette. En déplaçant une plaque sur la surface de la plaque équipée, les 9 comparateurs seront étalonnés en prenant pour position initiale le palpeur à fleur de la plaque équipée. En venant plaquer la pièce de bois contre la plaque équipée de comparateurs, il sera possible d'estimer la différence mini maxi entre les mesures indiquées par les comparateurs et d'établir le défaut de perpendicularité de l'about mesuré (cf. Figure 1-9). Après cette première mesure, le morceau de bois sera mis en butée sur la plaque opposée : la mesure du décalage jusqu'à la mise en butée sera mesurée sur l'ensemble des comparateurs. Après cette deuxième mesure, la pièce sera retournée pour mesurer le défaut de perpendicularité sur l'about opposé.

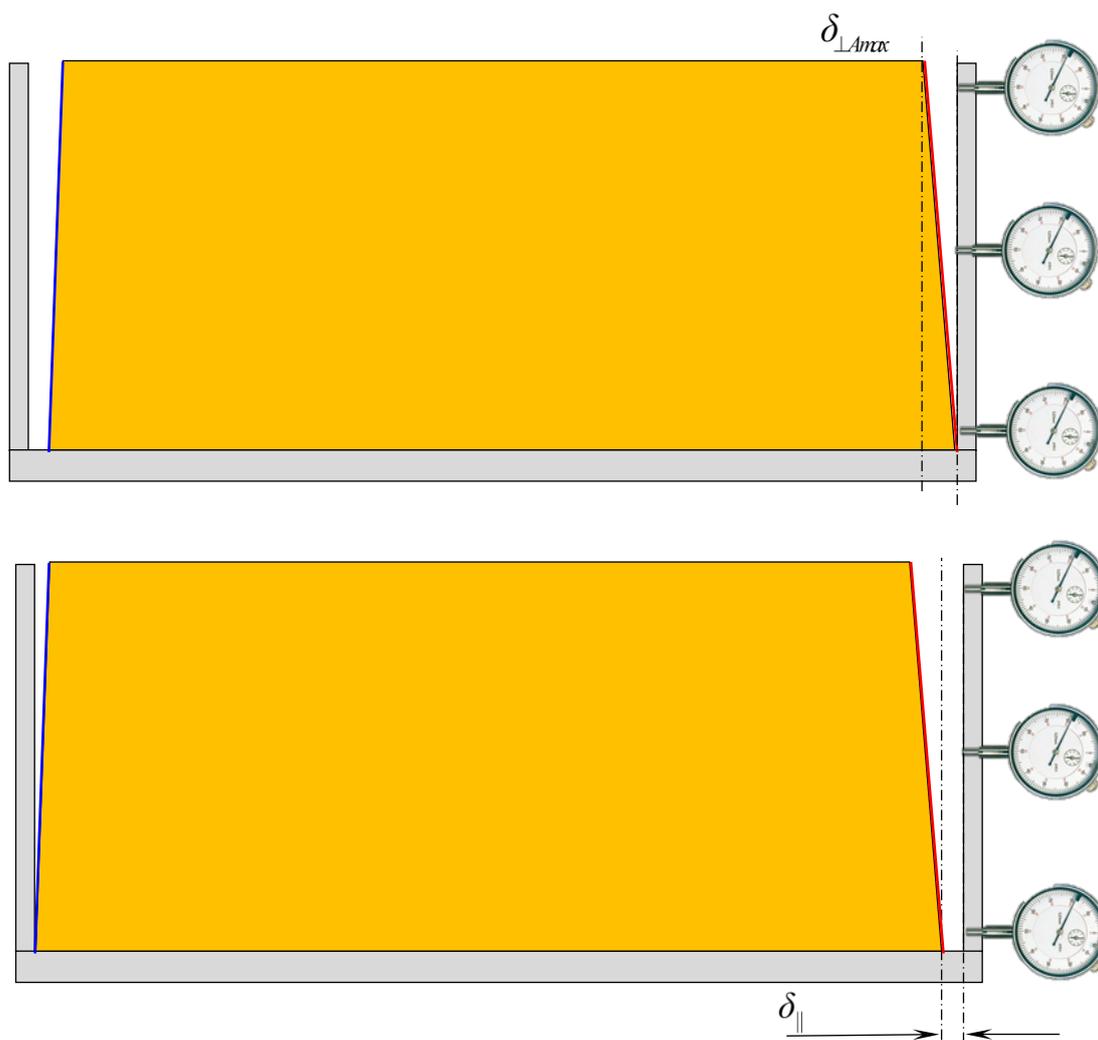


Figure 1-9 : Principe de prise de côte pour contrôler le tolérancement de perpendicularité

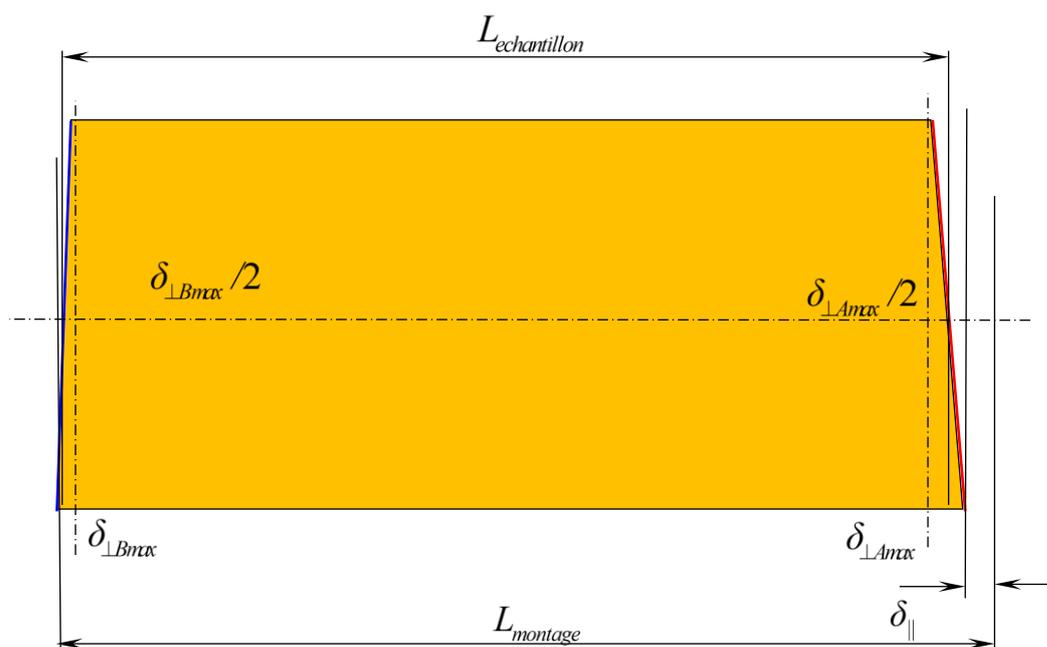


Figure 1-10 : Estimation de la longueur nominale de la pièce

A partir de ces mesures, la longueur de la pièce de bois sera établie par chaîne de côte (cf. Figure I-10) selon l'équation suivante :

$$L_{\text{echantillon}} = L_{\text{montage}} - \delta_{\parallel} - \frac{\delta_{\perp A \text{max}}}{2} - \frac{\delta_{\perp B \text{max}}}{2}$$

A la suite de ce contrôle de tolérancement, il sera présenté des tableaux de synthèse par configuration d'essai. A titre d'exemple, le Tableau I-1 présente les valeurs obtenues pour l'ensemble des échantillons du lot Bois/Bois.

Tableau I-1 : Principe de synthèse des valeurs de contrôle de tolérancement

Configuration	Elément	$L_{\text{echantillon}}$ [mm]	$\delta_{\perp A \text{max}}$ [mm]	$\delta_{\perp B \text{max}}$ [mm]
B/B-1	1			
	2			
B/B-2	1			
	2			
B/B-3	1			
	2			
B/B-4	1			
	2			
B/B-5	1			
	2			
Minimum				
Maximum				
Moyenne				
Ecart type				
COV				

1.1.5.2. Mesure sans contact

Le dispositif de mesure sera constitué de deux caméras 2D et du logiciel VDM_acqui. Ces caméras seront positionnées avec un recul d'environ 1,0 mètre des faces de mesure, afin d'obtenir une précision de l'ordre du 0,01 mm. Ce dispositif de mesure permettra de suivre les déplacements sans contact au cours du temps des cibles collées sur deux faces coplanaires de l'échantillon. Ce dispositif, après l'analyse des images des caméras, permettra de connaître les coordonnées spatiales de chacune des cibles.

En associant plusieurs cibles en formant des corps dit « rigides », ici au nombre de 2, il sera possible de connaître les déplacements relatifs entre les différents éléments de l'échantillon. Ils permettront d'estimer le module de fondation élastique de l'assemblage par contact conformément aux analyses bibliographiques. Les corps dits « rigides » seront constitués de cibles positionnées sur le même élément. Les Figure 1-11 et Figure 1-12 présente le positionnement des cibles sur les échantillons ainsi que la dénomination des différents objets respectivement pour les lots sans et avec défauts apparents.

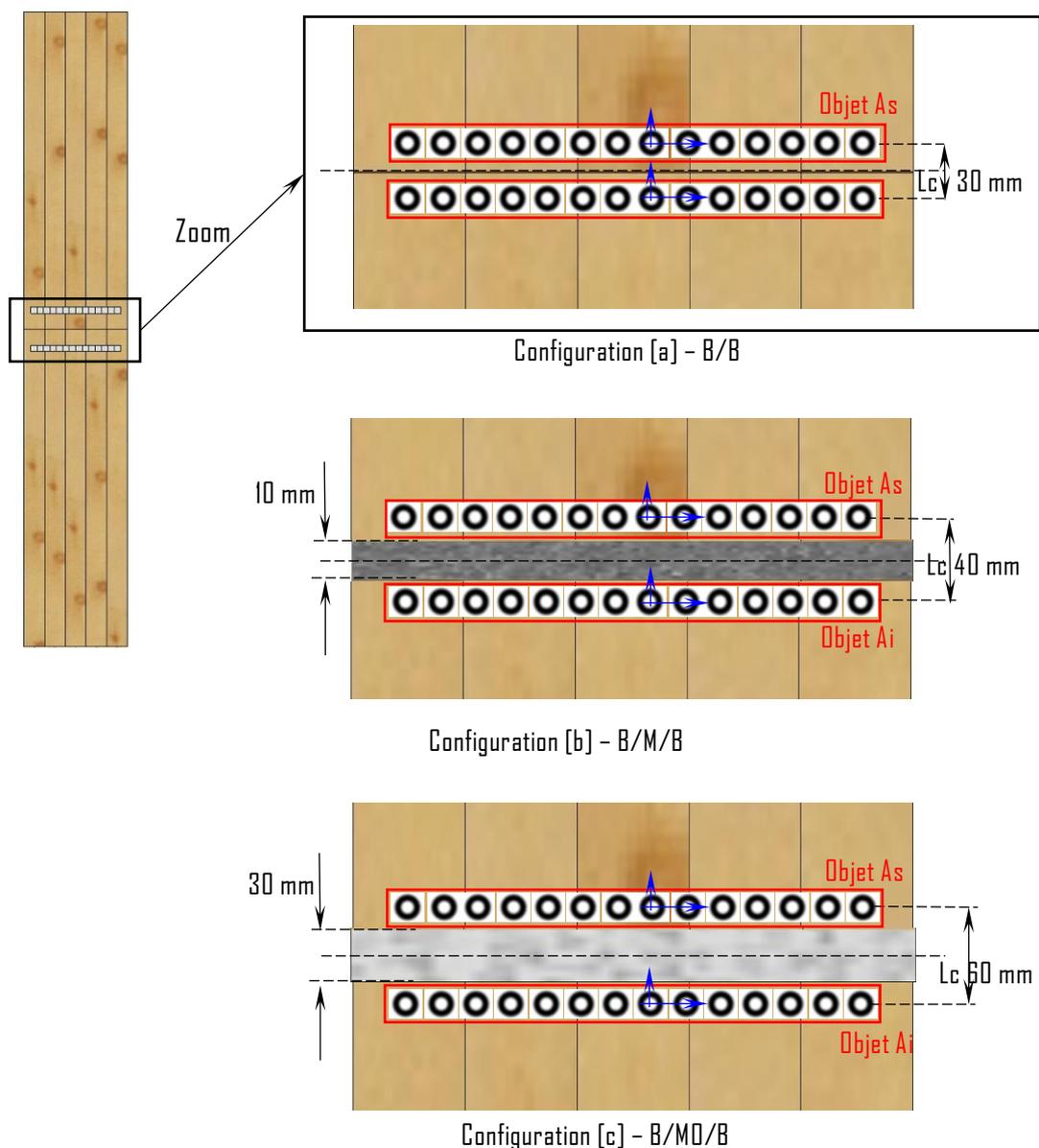


Figure 1-11 : Disposition des cibles pour la mesure en zone de contact pour les lots sans défauts apparents.

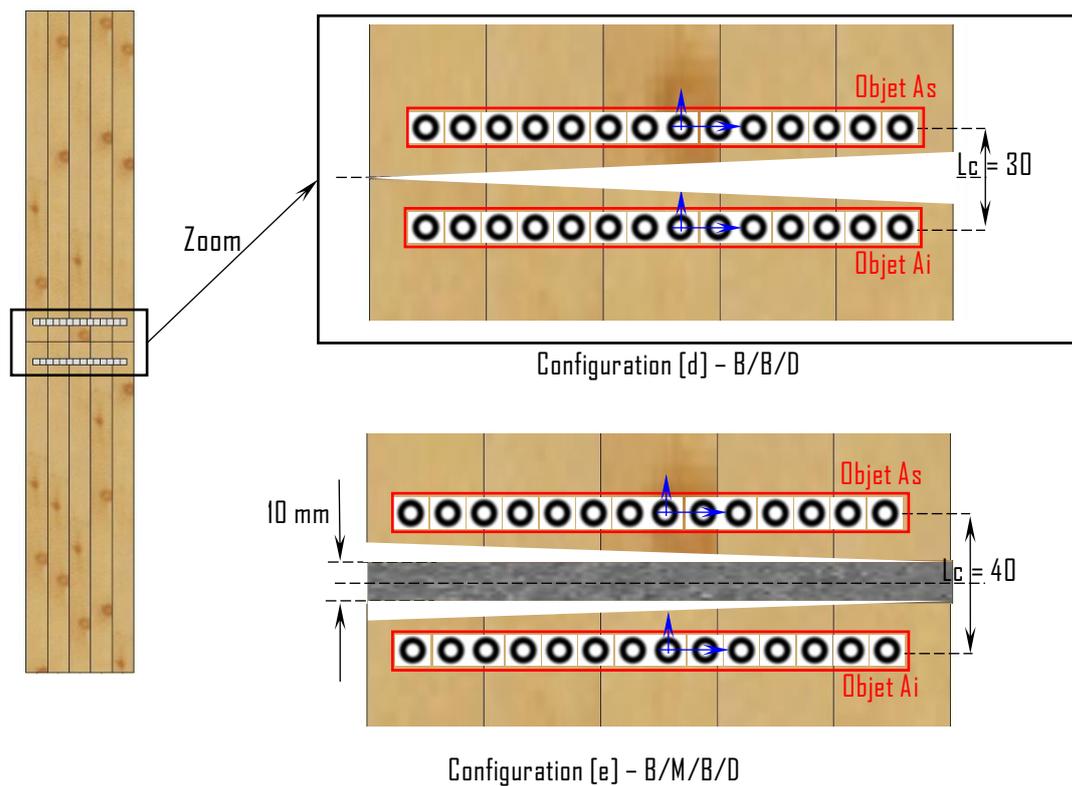


Figure I-12 : Disposition des cibles pour la mesure en zone de contact pour les lots avec défauts apparents.

1.1.6. Cycle de chargement

Le cycle de chargement sera effectué conformément à celui proposé dans le cahier des charges. Il sera adapté à celui donné dans la norme NF EN 26891:1991 [2]. Le cycle est composé de trois seuils d'effort et d'une montée à rupture. Le premier seuil est atteint par une montée en charge jusqu'à l'effort dit « ELS » estimé de l'assemblage pour ensuite être maintenue pendant 30s. Après ce premier seuil, la charge diminue jusqu'à 10% de l'effort moyen estimé à rupture pour être de nouveau maintenue pendant 30s. Le second palier est atteint par une montée en charge jusqu'à l'effort dit « ELU,0,6 » estimé de l'assemblage avec un k_{mod} égal à 0,6 pour ensuite être maintenue pendant 30s. La charge diminue de nouveau jusqu'à 10% de l'effort moyen estimé à rupture pour être maintenue pendant 30s. Le dernier palier est atteint par une montée en charge jusqu'à l'effort dit « ELU 1,1 » estimé de l'assemblage avec un k_{mod} égal à 1,1 pour être maintenue pendant 30s. Enfin, le cycle se termine par une montée en charge jusqu'à rupture.

La vitesse de chargement sera calculée de manière à obtenir un temps, dans la dernière montée c'est-à-dire celle permettant de passer de 10% à 100% de l'effort à rupture estimé, en $300s \pm 120s$. Cette même vitesse sera imposée sur l'ensemble du cycle de chargement et ce pour l'ensemble des lots.

Au regard d'une note de calculs qui peut être pratiquée pour des ouvrages multi étages, les différents efforts servant au cycle sont déterminés selon les équations suivantes :

$$F_{\text{vérin},ELS} = f_{c,0,k} \times S \times \frac{k_{mod}}{\gamma_m} / 1,35 = \frac{24 \times 160 \times 160 \times 0,6}{1,35 \times 1,3} = 210,05kN$$

$$F_{\text{vérin},ELU,0,6} = f_{c,0,k} \times S \times \frac{k_{mod}}{\gamma_m} = 24 \times 160 \times 160 \times \frac{0,6}{1,3} = 283,57kN$$

$$F_{\text{vérin},ELU,1,1} = f_{c,0,k} \times S \times \frac{k_{mod}}{\gamma_m} = 24 \times 160 \times 160 \times \frac{1,1}{1,3} = 519,88kN$$

$$F_{\text{vérin},mean,rupt} = f_{c,0,mean} \times S = 30,69 \times 160 \times 160 = 785,66kN$$

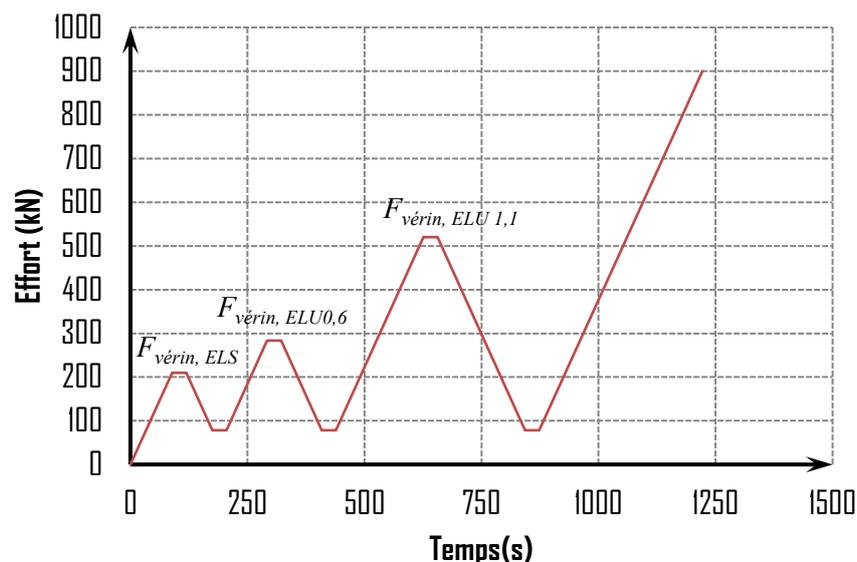


Figure I-13 : Cycle de chargement

- ✓ σ_{rup} : Valeur maximale de la contrainte à rupture dans l'échantillon en [MPa]
- ✓ ρ : Valeur de la masse volumique en [kg/m³]
- ✓ H : Valeur de l'humidité en [%]
- ✓ Le mode rupture de l'échantillon
- ✓ J_{app} : Valeur du jeu apparent en [mm]

- ✓ m_{el} : Valeur du module de fondation d'assemblage par contact de la première montée en charge en [N/mm³] définie par la valeur du coefficient directeur de la droite de régression linéaire entre les seuils de 10% et 40% de la valeur estimée de la contrainte
- ✓ $m_{el,ELU,0,6,unload}$: Valeur du module de fondation d'assemblage par contact de la décharge élastique en [N/mm³] définie par la valeur du coefficient directeur de la droite de régression linéaire entre les seuils ELU intégrant un k_{mod} de 0,6 et 20% de la valeur estimée de la contrainte
- ✓ $m_{el,ELU,0,6,reload}$: Valeur du module de fondation d'assemblage par contact de la recharge élastique en [N/mm³] définie par la valeur du coefficient directeur de la droite de régression linéaire entre les seuils ELU intégrant un k_{mod} de 0,6 et 20% de la valeur estimée de la contrainte
- ✓ $m_{el,ELS,unload}$: Valeur du module de fondation d'assemblage par contact de la décharge élastique en [N/mm³] définie par la valeur du coefficient directeur de la droite de régression linéaire entre les seuils ELS et 20% de la valeur estimée de la contrainte
- ✓ $m_{el,ELS,reload}$: Valeur du module de fondation d'assemblage par contact de la recharge élastique en [N/mm³] définie par la valeur du coefficient directeur de la droite de régression linéaire entre les seuils ELS et 20% de la valeur estimée de la contrainte
- ✓ $m_{el,ELU,1,1,unload}$: Valeur du module de fondation d'assemblage par contact de la décharge élastique en [N/mm³] définie par la valeur du coefficient directeur de la droite de régression linéaire entre les seuils ELU intégrant un k_{mod} de 1,1 et 20% de la valeur estimée de la contrainte
- ✓ $m_{el,ELU,1,1,reload}$: Valeur du module de fondation d'assemblage par contact de la recharge élastique en [N/mm³] définie par la valeur du coefficient directeur de la droite de régression linéaire entre les seuils ELU intégrant un k_{mod} de 1,1 et 20% de la valeur estimée de la contrainte

A la suite des campagnes d'essais, il sera présenté des tableaux de synthèse par configuration d'essai. A titre d'exemple, le Tableau 1-2 présente l'ensemble des résultats qui seront obtenus pour la configuration Bois/Bois tandis que le Tableau 1-3 présente la synthèse des modules de fondations.

Tableau 1-2 : Principe de synthèse des valeurs déterminées par les essais pour la configuration Bois/Bois.

Configuration	σ_{rup} [MPa]	ρ [kg/m ³]	H [%]	Type de rupture	J_{appa} [mm]
B/B-1					
B/B-2					
B/B-3					
B/B-4					
B/B-5					
Minimum					
Maximum					
Moyenne					
Ecart type					
COV					

Tableau 1-3 : Synthèse des valeurs brutes du module de fondation déterminées par les essais pour la configuration Bois/Bois.

Configuration	m_{el} [N/mm ³]	$m_{el,ELU,0,6,unload}$ [N/mm ³]	$m_{el,ELU,0,6,reload}$ [N/mm ³]	$m_{el,ELS,unload}$ [N/mm ³]	$m_{el,ELS,reload}$ [N/mm ³]	$m_{el,ELU,1,1,unload}$ [N/mm ³]	$m_{el,ELU,1,1,reload}$ [N/mm ³]
B-B-1							
B-B-2							
B-B-3							
B-B-4							
B-B-5							
Minimum							
Maximum							
Moyenne							
Ecart type							
COV							

Pour les échantillons sans défauts apparents, une valeur corrigée du module de fondation élastique (m_{el}) sera estimé à partir des résultats du Tableau 1-3, conformément aux analyses bibliographiques. Pour rappel, le principe est d'estimer ce module par la soustraction du tassement théorique des éléments bois sur le tassement obtenu dans la zone de contact (u_{moyen}). Ce tassement théorique sera défini à partir de classe de résistance des poteaux, c'est-à-dire GL24h. Le module d'élasticité sera donc pris à 11500 MPa conformément à la norme NF EN 14080 [3]. Sur ce principe, les valeurs corrigées des modules de fondations aux différents seuils seront estimées selon l'équation suivante :

$$m_{corrigée} = moyenne \left(\frac{F_{c,0}}{A \times \left\| u_{yAS} - u_{yAI} - \frac{F_{c,0} \times L_C}{A \times E_{théo}} \right\|_{FaceA}} ; \frac{F_{c,0}}{A \times \left\| u_{yAS} - u_{yAI} - \frac{F_{c,0} \times L_C}{A \times E_{théo}} \right\|_{FaceB}} \right)$$

A la suite de ces calculs, il sera présenté un tableau de synthèse par configuration d'essais pour les lots sans défauts apparents. Ici à titre d'exemple, le Tableau 1-4 présente les résultats de la configuration Bois/Bois.

Tableau 1-4 : Synthèse des valeurs corrigées du module de fondation déterminées par les essais pour la configuration Bois/Bois.

Configuration	m_{el} [N/mm ³]	$m_{el,ELU,0,6,unload}$ [N/mm ³]	$m_{el,ELU,0,6,reload}$ [N/mm ³]	$m_{el,ELS,unload}$ [N/mm ³]	$m_{el,ELS,reload}$ [N/mm ³]	$m_{el,ELU,1,1,unload}$ [N/mm ³]	$m_{el,ELU,1,1,reload}$ [N/mm ³]
B-B-1							
B-B-2							
B-B-3							
B-B-4							
B-B-5							
Minimum							
Maximum							
Moyenne							
Ecart type							
COV							

2.- BIBLIOGRAPHIE :

- [1] BNETC, *2ème projet de texte de la partie Exécution de l'Eurocode 5*. 2020.
- [2] AFNOR, *NF EN 26891: Structure en bois Assemblages réalisés avec des éléments de fixation - Principes généraux pour la détermination des caractéristiques de résistance et de déformation*. 1991.
- [3] AFNOR, *NF EN 14080: Structures en bois - Bois lamellé collé et bois massif reconstitué - Exigences*. 2013.

- ANNEXE A -- DOCUMENTATION TECHNIQUE DU MORTIER CIMENT

S&P TECNOGROUT-N

Mortier de réparation structurelle coulable



Ref: TECNOGROUT-N.IDS.FR-FV1

DESCRIPTION

S&P TECNOGROUT-N est un mortier de réparation coulable à retrait compensé, à base de composés minéraux et conçu pour les contraintes élevées où les mortiers traditionnels et les bétons ne sont pas appropriés.

Prêt à l'emploi et particulièrement recommandé dans des zones difficiles d'accès ou une utilisation du béton n'est pas possible. S&P TECNOGROUT-N est non soluble, auto-nivellant avec de bonnes résistances chimiques (eaux de mer, eaux usées, sulfates), applicable sur des épaisseurs comprises entre 30 et 80mm (S&P TECNOGROUT-N/PR entre 5 et 30mm; S&P TECNOGROUT-N/GR entre 80 et 120mm). Pour des utilisations particulières, nous consulter.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES

DOMAINES D'APPLICATION

Restructuration par coulage et sans vibrations d'ouvrages dégradés:

- Piliers, poutres, dalles, poteaux, radiers
- Coulage de chaînages

Exemples:

- Reprise structurelle de poutres ou piliers en béton
- Rénovation des poutres en béton précontraint
- Réfection de ponts ou viaducs autoroutiers, routiers ou ferroviaires
- Remplissage de joints rigides entre éléments du béton
- Zones à forte densité d'armatures lorsqu'une application manuelle ou projetée n'est pas possible.
- Application intérieure et extérieure

AVANTAGES

- Mortier à retrait compensé.
- Résistant à l'eau
- Différentes épaisseurs d'application (3 produits)
- Résistant aux sulfates
- Sans chlorure
- Sans agrégats métalliques
- Bonne résistance chimique aux sels de mers, eaux usées et sulfates
- Répond aux exigences de la norme NF-EN 1504-3, classe R4

DONNÉES DU PRODUIT

Apparence / Couleur

Poudre Gris béton

Conditionnement

En sac papier avec doublure plastique de 25 kg

Palette de 40 sacs

Conditions de stockage

Dans l'emballage d'origine et au sec

Durée de conservation

12 mois dans son emballage d'origine ; ne pas utiliser si le produit a durci

Consommation

20 à 21,5 kg par m² par cm d'épaisseur

AGRÈMENTS



Produit sous marquage CE, conforme à la norme EN 1504-3.



S&P TECNOGROUT-N

Mortier de réparation structurelle coulable



DONNÉES TECHNIQUES

Données	Unité	S&P TECNOGROUT-N/PR	S&P TECNOGROUT-N	S&P TECNOGROUT-N/GR	Exigences requises selon EN 1504-3, Mortier R4
		Valeur	Valeur	Valeur	
Masse volumique en poudre	Kg/dm ³	1,8	1,85	2,05	
Masse volumique durcie EN 12190	Kg/dm ³	~ 2,25	~ 2,30	~ 2,35	
Granulométrie maximale	mm	1,0	3,0	5,0	
Ajout d'eau par sac de 25 kg	%l	11,5 à 13,5 / 2,87 et 3,37	11,5 à 13,5 / 2,87 et 3,37	11,5 à 13,5 / 2,87 et 3,37	
Epaisseur d'application	mm	5 à 30 par couche	30 à 90 par couche	80 à 120 par couche	
Durée Pratique d'Utilisation	mn	30	30	30	
Durée de durcissement	h	1	1	1	
Températures d'application	°C	Entre +2 et +36	Entre +2 et +36	Entre +2 et +36	
Température de service	°C	400 max.	400 max.	400 max.	
Résistance à la compression EN 12190	Mpa	> 29 à 1 jour > 39 à 3 jours > 58 à 7 jours > 68 à 28 jours	> 31 à 1 jour > 49 à 3 jours > 58 à 7 jours > 73 à 28 jours	> 25 à 1 jour > 44 à 3 jours > 51 à 7 jours > 73 à 28 jours	> 45 à 28 jours
Résistance à la flexion EN 12190	Mpa	> 4,9 à 1 jour > 6,3 à 3 jours > 7,0 à 7 jours > 8,3 à 28 jours	> 5,2 à 1 jour > 6,6 à 3 jours > 7,5 à 7 jours > 10,5 à 28 jours	> 5,2 à 1 jour > 6,6 à 3 jours > 7,5 à 7 jours > 8,0 à 28 jours	
Module d'élasticité EN13412	MPa	> 29 000	> 29 000	> 29 000	> 20 000 à 28 jours
Absorption capillaire EN13057	kg/m ² /h0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Résistance à la carbonatation EN13295		ok	ok	ok	dK < MC(0.45)
Résistance au glissement		CLASSE II	CLASSE II	CLASSE II	
Résistivité électrique		Non Disponible	105Ω*M	Non Disponible	
Adhérence sur béton EN 1542	MPa	> 3,4	> 3,5	> 3,1	> 2,0
Adhérence au fer à béton	MPa	Non Disponible	9,6	Non Disponible	
Adhérence après cycle gel/dégel (50 cycles) EN13687-1		> 3,3	> 2,3	> 3,0	> 2,0

Tests réalisés à +20 °C et 65 % d'humidité relative

PRÉPARATIONS

Préparation du support

Le support est prétraité par sablage, moyens hydromécaniques ou piquage en fonction de la surface à traiter. Il doit être exempt de poussières et de parties non adhérentes, contaminations, huiles, matières grasses et toutes autres substances à effet séparable. Le support est humidifié pendant 6 heures avant l'application du mortier (pores capillaires saturés d'eau). L'excès d'eau sera enlevé à l'aide d'une éponge ou d'air comprimé. Les aciers d'armatures exposés doivent être traités contre la corrosion.

Préparation du produit

Mélanger le mortier manuellement ou au mélangeur électrique basse vitesse pendant 4 à 5 mn, en ajoutant entre 2.87 et 3.37 L (suivant variante produit) d'eau par sac jusqu'à obtention d'une consistance homogène et sans grumeaux.

Le mélange doit reposer 1–2 minutes avant d'être appliqué. Il n'est plus possible d'ajouter de l'eau une fois que le processus de prise a débuté.

S&P TECNOGROUT-N

Mortier de réparation structurelle coulable



08/2018

APPLICATION

Le coffrage doit être étanche pour éviter toute fuite de matériaux.
Verser d'une extrémité jusqu'à l'achèvement du remplissage en flux régulier.

Cure

Une fois le mortier appliqué, les surfaces doivent être maintenues humides pendant au moins 24 heures.

AVERTISSEMENT

Usage des produits

La gamme de produits S&P est destinée à un usage industriel. Ils doivent être installés par du personnel spécialisé et des professionnels compétents, ayant suivi une formation adaptée. Les instructions d'application doivent être suivies et respectées, elles sont détaillées dans nos guides d'application.

Assistance technique

S&P assure une assistance technique auprès des différents intervenants. Cette assistance technique ne peut être assimilée à une prestation de conception, de réception de support, d'application ou de contrôle du système.

SANTÉ & SÉCURITÉ

Consignes de sécurité importantes

Pour plus d'informations consulter la Fiche de Données de Sécurité sur notre site internet www.sp-reinforcement.fr.

Les informations contenues dans cette Fiche Technique sont valables pour les produits livrés par S&P Reinforcement France. Veuillez noter que les informations fournies par d'autres pays peuvent différer, toujours utiliser la Fiche Technique adaptée dans le pays considéré.

Les informations et données contenues dans cette Fiche Technique permettent d'assurer une utilisation normale du produit. Les informations et les données sont basées sur nos connaissances actuelles et notre expérience. Elles n'exonèrent pas l'utilisateur de sa propre responsabilité et de vérifier la pertinence de l'application.

S&P se réserve le droit d'apporter des modifications aux spécifications du produit. Nos conditions générales de vente et de livraison sont en outre applicables. La dernière version de cette fiche est la seule valable, veuillez nous contacter pour vérifier ou obtenir la version à jour.

S&P Reinforcement France
Z.A.C. des Quatre Chemins
85400 Sainte Gemme la Plaine
Phone: +33 2 51 28 44 77
Fax: +33 2 51 28 44 78
Web : www.sp-reinforcement.fr
E-Mail: info@sp-reinforcement.fr



3. RAP-3

Rapport d'essais des assemblages par contact



Laboratoire d'Études et de Recherche
sur le Matériau Bois
EA 43 70 USC / INRA



Ecole Nationale Supérieure des
Technologies et Industries du Bois

CAMPAGNE D'ESSAIS VISANT A CARACTERISER LA RAIDEUR D'ASSEMBLAGES COURANTS DE STRUCTURES EN BOIS

RAP-3 : Rapport d'essais des assemblages par contact

Fait à Epinal, le mercredi 17 février 2022

Ecole Nationale Supérieure
des Technologies et Industries du Bois
27, rue Philippe SEGUIN
CS60036
88026 EPINAL

Tél : 03-72-74-96-11
Fax : 03-72-74-96-38
e-mail : jean-françois.bocquet@univ-lorraine.fr
web : www.enstib.uhp-nancy.fr

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
1. - RESULTATS DES ESSAIS	3
1.1. DEMARCHE DE DEPOUILLEMENT.....	3
1.2. CONTACT BOIS-BOIS.....	7
1.2.1. <i>Echantillons</i>	7
1.2.2. <i>Résultats</i>	8
1.2.3. <i>Analyse statistique de la résistance</i>	11
1.1. - CONTACT BOIS-METAL.....	12
1.1.1. <i>Echantillons</i>	12
1.1.2. <i>Résultats</i>	13
1.1.3. <i>Analyse statistique de la résistance</i>	16
1.2. - CONTACT BOIS-MORTIER.....	17
1.2.1. <i>Echantillons</i>	17
1.2.2. <i>Résultats des essais</i>	18
1.2.3. <i>Analyse statistique de la résistance</i>	21
1.3. - ESSAIS DE CONTACT AVEC UN DEFAUT DE PERPENDICULARITE.....	22
1.3.1. <i>Echantillons</i>	22
1.3.2. <i>Résultats des essais de contact sur les échantillons du lot «B-B-D»</i>	24
1.3.3. <i>Analyse statistique</i>	28
1.3.4. <i>Résultats des éprouvettes B-ME-D</i>	29
1.3.5. <i>Analyse statistique</i>	32
1.4. SYNTHESE.....	33
2. SYNTHESE DES RESULTATS	34
2.1. ANALYSE DES ESSAIS B/B, B/M ET B/ME SANS DEFAUT.....	34
2.2. ANALYSE DES EPROUVETTES BOIS-BOIS.....	36
2.3. ANALYSE DES EPROUVETTES BOIS-METAL.....	37
3. - CONCLUSIONS	39
4. - BIBLIOGRAPHIE :.....	41
- ANNEXE A - - DECOUPE DES EPROUVETTES	42
- ANNEXE B - - MESURES DES DEFAUTS	44
B.1. ELEMENT 1213.....	44
B.2. ELEMENT 4344.....	45
B.3. ELEMENT 1411.....	46
B.4. ELEMENT 2223.....	47
B.5. ELEMENT 3132.....	48
B.6. ELEMENT 3233.....	49
B.7. ELEMENT 4441.....	50
B.8. ELEMENT 2324.....	51
B.9. ELEMENT 3334.....	52
B.10. ELEMENT 2122.....	53

1.- RESULTATS DES ESSAIS

1.1. DEMARCHE DE DEPOUILLEMENT

En premier lieu, il est rappelé la base de la démarche de dépouillement des essais. Ceci est extrait du protocole d'essais de chargement : PRO-3 - Protocole d'essais des assemblages par contact.pdf.

En premier lieu la contrainte de compression appliquée sur l'éprouvette sera calculée comme il suit (Figure 1-1) :

- $\sigma_{c,0,total} = \frac{\sum_{i=1}^3 F_i}{A} = \frac{\sum_{i=1}^3 F_i}{160 \times 160}$: Valeur de la contrainte de compression longitudinale en [MPa],
- F_i effort par vérin de chargement,

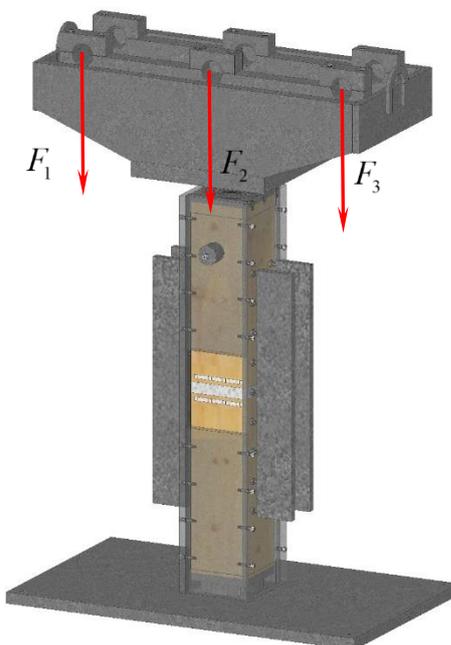


Figure 1-1: Vue des cibles sur une des fenêtres de l'enceinte.

La section des éprouvettes étant qualifiée au dixième de millimètre, la section de calcul restera constante est égale à 160 x160 mm pour tous les dépouillements d'essais.

En second lieu, le tassement longitudinal moyen sera exprimé en [mm] et sera défini comme il suit.

L'enceinte dans laquelle est placée l'éprouvette pour l'essai de compression comporte deux fenêtres afin de pouvoir observer par deux caméras la déformation de l'interface. Un objet A_s sera tout d'abord constitué d'une ligne de cibles qui seront placées sur une des faces visible de la pièce de bois située en partie haute de l'enceinte. Ces cibles sont éminemment visibles par une des fenêtres de l'enceinte. L'objet A_i sera constitué des cibles placées sur la même face de la pièce de bois située en partie basse de l'enceinte. Le tassement d'assemblage de la face A sera alors défini comme étant le déplacement relatif moyen de l'objet A_s par rapport à l'objet A_i . Ce déplacement sera dénommé

$$u_{y,A} = u_{y,A_s} - u_{y,A_i} .$$

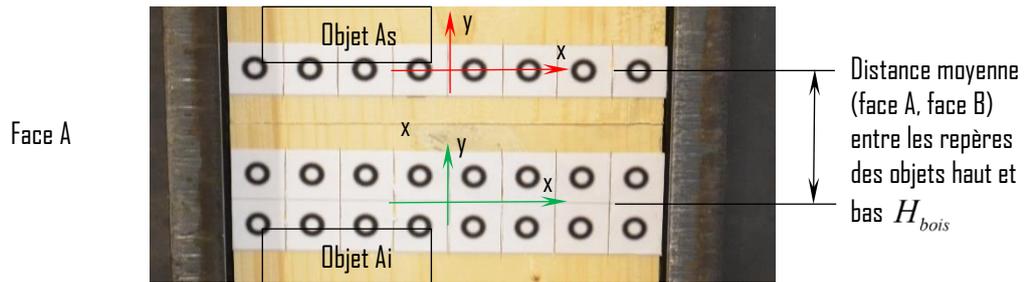


Figure 1-2 : Vue des cibles sur une des fenêtres de l'enceinte.

La même démarche sera effectuée sur la face B de l'échantillon permettant d'obtenir le tassement $u_{y,B} = u_{y,Bs} - u_{y,Bt}$. Le tassement brut moyen sera alors obtenu en faisant la moyenne de ces deux déplacements comme il est indiqué ci-dessous :

$$u_{brut,moyen} = \frac{u_{y,A} + u_{y,B}}{2}$$

La présentation des résultats des essais sera donc réalisée de deux manières :

Une première courbe présentera l'évolution de la contrainte de compression longitudinale ($\sigma_{c,0,total}$) en fonction de la moyenne du tassement longitudinal ($u_{brut,moyen}$).

Un second graphique présentera l'évolution de la contrainte ($\sigma_{c,0,total}$) en fonction du tassement modifié. Ce dernier sera défini comme étant le tassement brut diminué de la déformation cumulée des matériaux compris entre les deux objets au niveau de l'interface : bois seul, bois mortier et bois métal.

$$u_{net,moy} = u_{net,brut} \left(\frac{\sigma_{c,0} \times H_{bois}}{E_{moyen,bois}} - \frac{\sigma_{c,0} \times H_{(metal\ ou\ mortier)}}{E_{(metal\ ou\ mortier)}} \right)$$

avec

- ✓ H_{bois} : Hauteur **de bois** moyenne entre repères locaux des objets haut et bas.
- ✓ $H_{(m\acute{e}tal\ ou\ mortier)}$: Epaisseur de la couche intercalaire de m\acute{e}tal (M) ou de mortier (MO) \u00e9gale \u00e0 20 mm
- ✓ $E_{(m\acute{e}tal\ ou\ mortier)}$: Valeurs du module d'\u00e9lasticit\u00e9 des \u00e9l\u00e9ments m\acute{e}tal (M) ou de mortier (MO) prises respectivement \u00e0 210000 MPa et 29000 MPa (Doc Fournisseur voir protocole essa)
- ✓ $E_{th\u00e9o}$: Valeur du module d'\u00e9lasticit\u00e9 des \u00e9l\u00e9ments Bois prise \u00e0 13600 MPa selon le classement m\u00e9canique des bois obtenu \u00e0 l'aide de la valeur caract\u00e9ristique de la r\u00e9sistance en compression longitudinale selon la norme NF EN 14080.

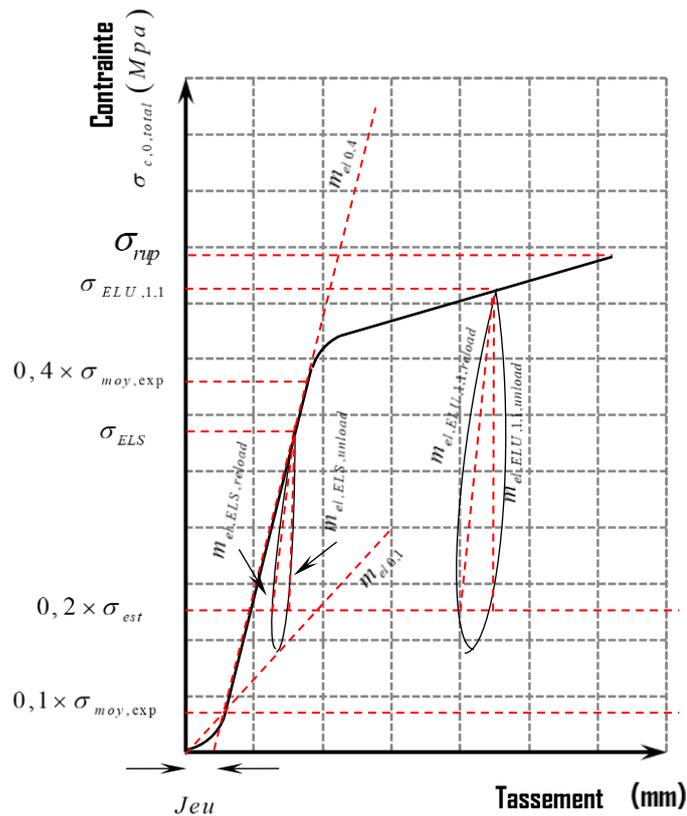


Figure 1-3: Courbe expérimentale idéalisée pour le dépouillement.

- ✓ σ_{rup} : Valeur maximale de la contrainte à rupture dans l'échantillon en [MPa],
- ✓ σ_{ELS} : Valeur de la contrainte maximum autorisée à l'état limite de service en [MPa],
- ✓ σ_{ELU} : Valeur de la contrainte maximum autorisée à l'état limite ultime avec un k_{mod} de 1,1 en [MPa],
- ✓ $\sigma_{moy,exp}$: Valeur de la contrainte moyenne à rupture expérimentale,
- ✓ ρ : Valeur de la masse volumique en [kg/m^3],
- ✓ H : Valeur de l'humidité en [%],
- ✓ Le mode rupture de l'échantillon,
- ✓ Jeu : Valeur du jeu apparent en [mm],
- ✓ $m_{el,0,1}$: Valeur du module de fondation d'assemblage par contact de la première montée en charge en [N/mm^3] définie par la valeur du coefficient directeur de la droite passant par les seuils de 0 et 10% de la valeur moyenne de la contrainte des essais
- ✓ $m_{el,1,4}$: Valeur du module de fondation d'assemblage par contact de la première montée en charge en [N/mm^3] définie par la valeur du coefficient directeur de la droite passant par les seuils de 10% et 40% de la valeur moyenne des essais de la contrainte
- ✓ $m_{el,ELS,unload}$: Valeur du module de fondation d'assemblage par contact de la décharge élastique en [N/mm^3] définie par la valeur du coefficient directeur de la droite de régression linéaire entre les seuils ELS et 20% de la valeur estimée de la contrainte à rupture.

- ✓ $m_{el,ELS,reload}$: Valeur du module de fondation d'assemblage par contact de la recharge élastique en $[N/mm^3]$ définie par la valeur du coefficient directeur de la droite de régression linéaire entre les seuils ELS et 20% de la valeur estimée de la contrainte à rupture.
- ✓ $m_{el,ELU,1,1,unload}$: Valeur du module de fondation d'assemblage par contact de la décharge élastique en $[N/mm^3]$ définie par la valeur du coefficient directeur de la droite de régression linéaire entre les seuils ELU intégrant un k_{mod} de 1,1 et 20% de la valeur estimée de la contrainte à rupture.
- ✓ $m_{el,ELU,1,1,reload}$: Valeur du module de fondation d'assemblage par contact de la recharge élastique en $[N/mm^3]$ définie par la valeur du coefficient directeur de la droite de régression linéaire entre les seuils ELU intégrant un k_{mod} de 1,1 et 20% de la valeur estimée de la contrainte à rupture.

1.2. CONTACT BOIS-BOIS

1.2.1. Echantillons

La configuration Contact Bois-Bois dénommé « B-B » est constitué d'échantillons issus de poteaux de section 160/160mm². Ces poteaux ont juste été sciés en tronçons de 500mm de longueur puis appérés afin de repérer deux à deux les tronçons successifs coupés d'une seul trait de scie plongeant (Annexe A). Il peut être remarqué que dans cette configuration, une fois les pièces placées bout à bout dans l'enceinte, le contact entre les pièces est parfait (cf. Figure 1-4).



Figure 1-4 : Echantillon B-B en contact parfait dans l'enceinte.

Le Tableau 1-1 présente les masses volumiques des éléments constituant un échantillon et la moyenne de la masse volumique de l'échantillon ramenée à 12% d'humidité.

Tableau 1-1 : Masse volumique des éléments de la configuration B-B

Configuration	Numéro d'échantillon	Masse volumique par élément [kg/m ³]	Masse volumique moyenne à 12 % [kg/m ³]
B-B	1	418	418
		418	
	2	406	408
		410	
	3	395	391
		387	
	4	418	418
		418	
	5	445	447
		449	

1.2.2. Résultats

La Figure 1-5 présente les courbes de la contrainte de compression de la zone de contact en fonction du tassement brut moyen de celui-ci. Les comportements globaux sont similaires en termes d'évolution sur ce type de contact. Un jeu se développe à faible niveau de contrainte, ce jeu provient de l'état de surface laissé par le passage de la lame. Cet état de surface était tout à fait standard pour une entreprise de charpente, sans pouvoir s'attendre à mieux. La rupture de l'échantillon se produit par compression et flambement de lits de trachéides en différents points dans la hauteur de l'éprouvette.

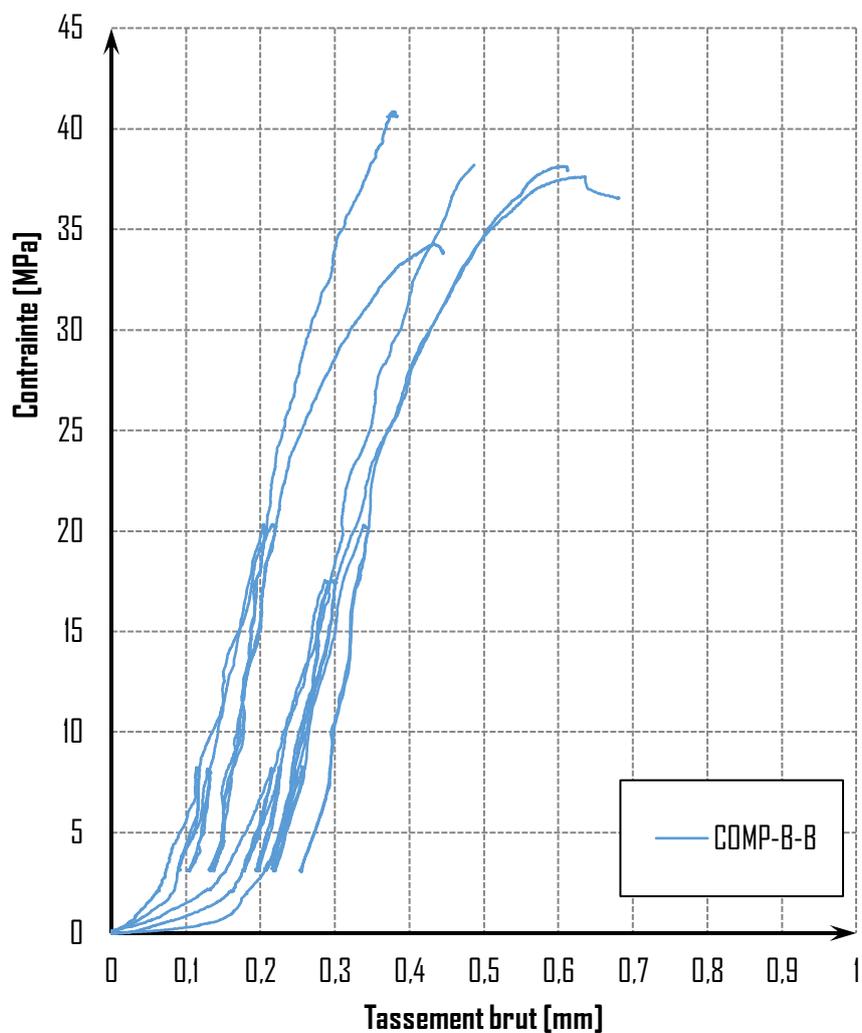


Figure 1-5 : Evolution de la contrainte de compression en fonction du tassement brut moyen des échantillons de la configuration B-B

Le Tableau 1-2 présente la hauteur de bois H_{bois} retenue pour calculer la déformation nette de la zone de contact pour chaque essai bois sur bois.

Tableau 1-2 : Hauteur de bois moyenne entre les objet assemblage bois / bois

Echantillon	COMP-B-B-1	COMP-B-B-2	COMP-B-B-3	COMP-B-B-4	COMP-B-B-5
H_{bois} mm	50.2	50.2	49.8	49.5	49.7

La Figure 1-6 présente les courbes de l'effort de compression de la zone de contact en fonction du tassement net moyen de celui-ci.

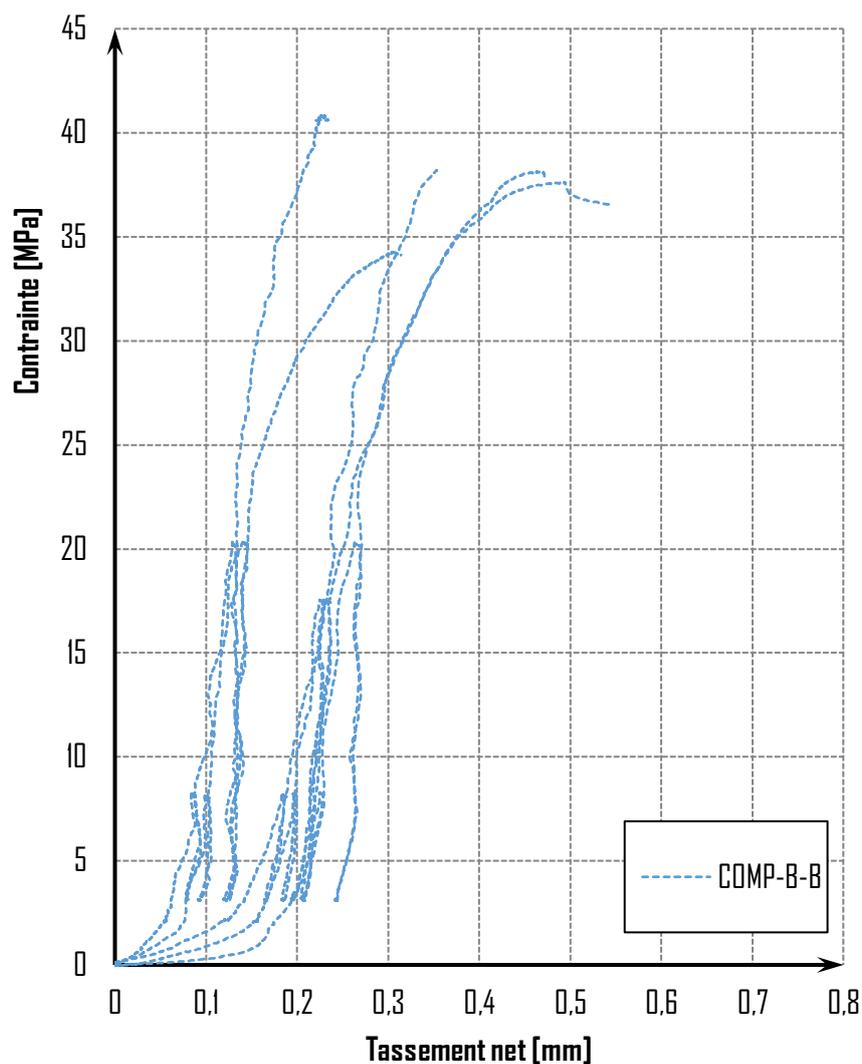


Figure I-6 : Evolution de la contrainte de compression en fonction du tassement net moyen des échantillons de la configuration B-B

Les valeurs des contraintes à rupture de chaque échantillon ainsi que le mode de rupture sont répertoriés dans le Tableau I-4. La Figure I-7 présente le mode de rupture type de cette configuration de contact observé de manière récurrente sur chacun des échantillons.

Tableau I-3 : Résultats des contraintes à rupture et des modes de rupture des échantillons de la configuration B-B

Echantillon	Contrainte Mpa	Masse volumique kg/m ³	Type de rupture
COMP-B-B-1	39.1	418	Compression du bois
COMP-B-B-2	37.6	408	Compression du bois
COMP-B-B-3	34.3	391	Compression du bois
COMP-B-B-4	38.1	418	Compression du bois
COMP-B-B-5	40.8	447	Compression du bois
Moyenne	38.00	416.40	
Maximum	40.85	447.00	
Minimum	34.29	391.00	
Ecart type	2.41	20.35	
COV	6.35%	4.89%	

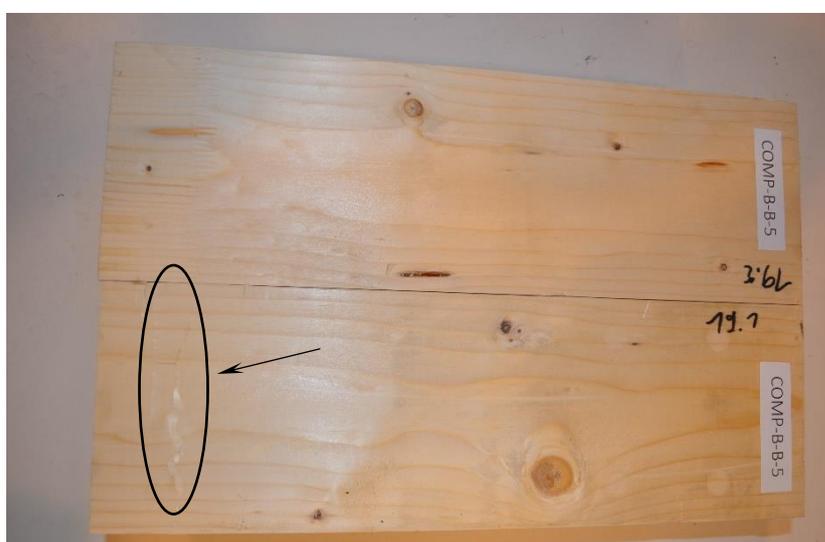


Figure I-7: Matage des surfaces de contact très peu perceptible et ligne de rupture par flambement de lits de trachéïdes en différents endroits dans la hauteur de l'échantillon B-B-5

Les valeurs de modules de fondation d'assemblage par contact sont répertoriées dans le Tableau I-4 selon la démarche rappelée en début de ce rapport.

Tableau I-4 : Résultats des modules de fondation d'assemblage par contact des échantillons de la configuration B-B [MPa/mm]

Echantillon	$m_{el,0,1}$	$m_{el,1,4}$	Jeu	$m_{el,ELS,unload}$	$m_{el,ELS,reload}$	$m_{el,ELU,1,1} unload$	$m_{el,ELU,1,1} reload$
COMP-B-B-1	22.13	253.97	0.16	385.3	279.7	700.5	513.7
COMP-B-B-2	25.51	153.18	0.12	247.9	215.1	390.6	356.9
COMP-B-B-3	58.87	218.62	0.05	192.4	238.0	735.8	637.6
COMP-B-B-4	18.96	259.96	0.19	227.9	244.9	576.0	600.2
COMP-B-B-5	46.52	324.85	0.07	326.7	346.2	406.4	1646.0
Moyenne	34.40	242.12	0.12	276.04	264.76	561.86	750.88
Maximum	58.87	324.85	0.19	385.34	346.19	735.80	1645.98
Minimum	18.96	153.18	0.05	192.42	215.09	390.59	356.95
Ecart type	17.42	62.78	0.06	78.45	51.08	160.62	511.90
COV	50.64%	25.93%	49.73%	28.42%	19.29%	28.59%	68.17%

1.2.3. Analyse statistique de la résistance

L'annexe D de la norme NF EN 1990 Partie D7 [3] fournit deux approches permettant de déterminer une propriété caractéristique d'un produit, dans le cas présent, la contrainte de compression du bois. Il a été choisi que les données soient dépouillées en suivant une loi Log Normale, ce qui, comme le précise l'annexe D [3], présente l'avantage d'exclure les valeurs négatives.

La première approche suppose que le coefficient de variation (COV) V_x est inconnu tandis que la deuxième approche suppose que le COV est parfaitement connu.

Dans le tableau ci-dessous, les valeurs des contraintes de compression à rupture sont présentées. A partir de ces valeurs, il est possible de déterminer une valeur caractéristique de la résistance de compression du matériau conformément au dépouillement statistique de l'Annexe D de la norme NF EN 1990 [3]. Le coefficient de variation V_x étant inférieur à 10%, il est nécessaire de passer par une approche V_x connu.

Tableau I-5 : Détermination de la valeur caractéristique de la résistance de compression du matériau de la configuration B-B

Echantillon	m_i	$\ln(m_i)$	$(\ln(m_i) - \text{moy})^2$	N essai	k_n	s_y	Analogie	$s_y \text{ cor}$	k_s	m_k
COMP-B-B-1	39.1	3.67	9.09E-04	5	Connu	6.34%	Non	10.00%	1.80	31.69
COMP-B-B-2	37.6	3.63	6.53E-05							
COMP-B-B-3	34.3	3.53	1.03E-02							
COMP-B-B-4	38.1	3.64	2.90E-05							
COMP-B-B-5	40.8	3.71	5.45E-03							
Moyenne	38.00	3.64								
Minimum	34.29									
Maximum	40.85									
Ecart type	2.41									
COV	6.35%									

A partir de ces hypothèses, il est possible de calculer la valeur caractéristique de la résistance de compression du matériau des essais de compression Bois / Bois selon l'équation suivante :

$$f_{c,0,k} = \exp(m_y - k_n \times 0,10) = \exp(3,64 - 1,80 \times 0,10) = 31,7 \text{ MPa}$$

1.1. - CONTACT BOIS-METAL

1.1.1. Echantillons

La configuration Contact Bois-Métal dénommé « B-ME » est constitué d'échantillons issue de poteaux de section 160/160mm². Ces poteaux ont juste été sciés en tronçons de 500mm de longueur puis appérés afin de repérer deux à deux les tronçons successifs coupés d'une seul trait de scie plongeant. Il peut être remarqué que dans cette configuration, une fois les pièces placées bout à bout dans l'enceinte, le contact entre les pièces est parfait avec la plaque métallique de 20mm d'épaisseur intercalée entre les deux tronçons (cf. Figure 1-8).

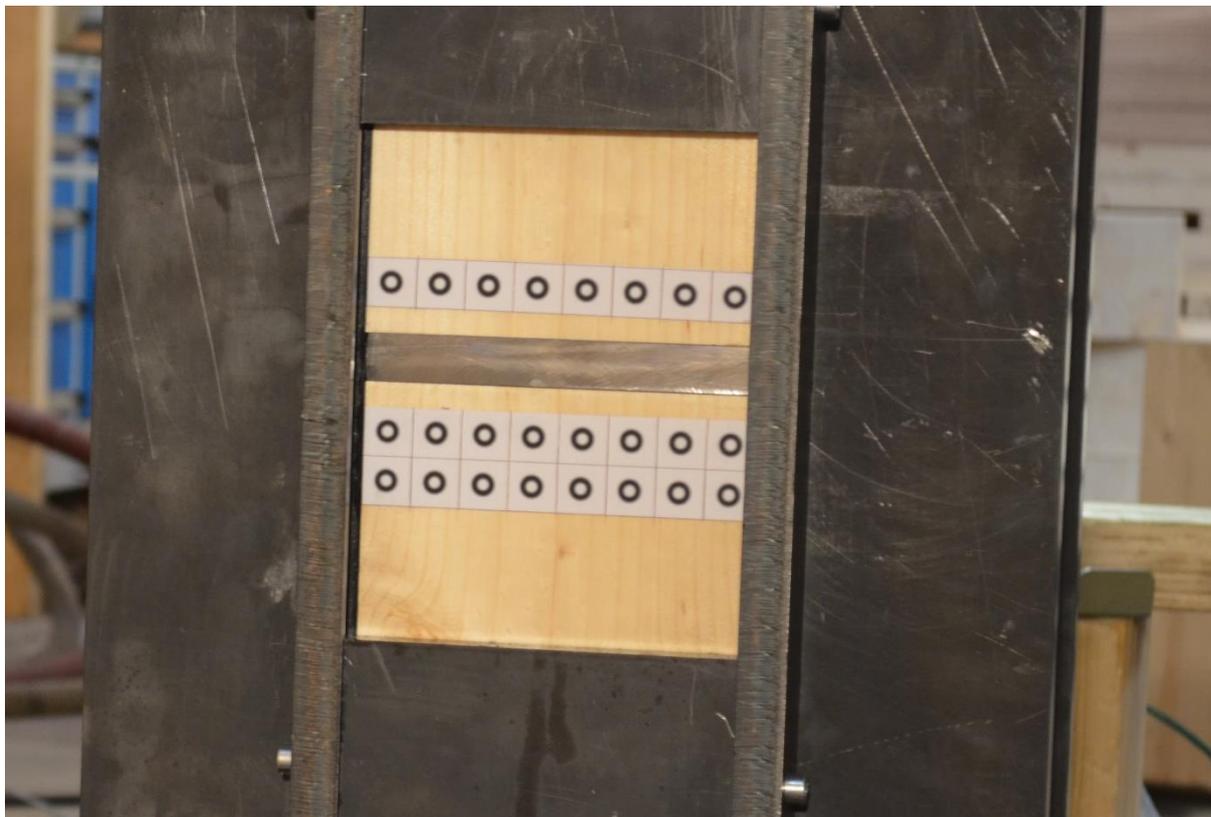


Figure 1-8 : Echantillon B-ME en contact parfait dans l'enceinte.

Le Tableau 1-6 présente la masse volumique des éléments constituant un échantillon et la moyenne de la masse volumique de l'échantillon ramenée à 12% d'humidité.

Tableau 1-6 : Masse volumique des éléments de la configuration B-ME

Configuration	Numéro d'échantillon	Masse volumique par élément [kg/m ³]	Masse volumique moyenne à 12 % [kg/m ³]
B-ME	1	399	395
		391	
	2	419	415
		410	
	3	418	425
		431	
	4	414	421
		427	
	5	426	418
		411	

1.1.2. Résultats

La Figure 1-9 présente les courbes de la contrainte de compression de la zone de contact en fonction du tassement brut moyen de celui-ci. Les comportements globaux sont très similaires en termes d'évolution sur ce type de contact. Un jeu se développe à faible niveau de contrainte, ce jeu provient de l'état de surface laissé par le passage de la lame. Cet état de surface était tout à fait standard pour une entreprise de charpente, sans pouvoir s'attendre à mieux raisonnablement. La rupture de l'échantillon se produit par compression et flambement de lits de trachéides en différent points dans la hauteur de l'éprouvette.

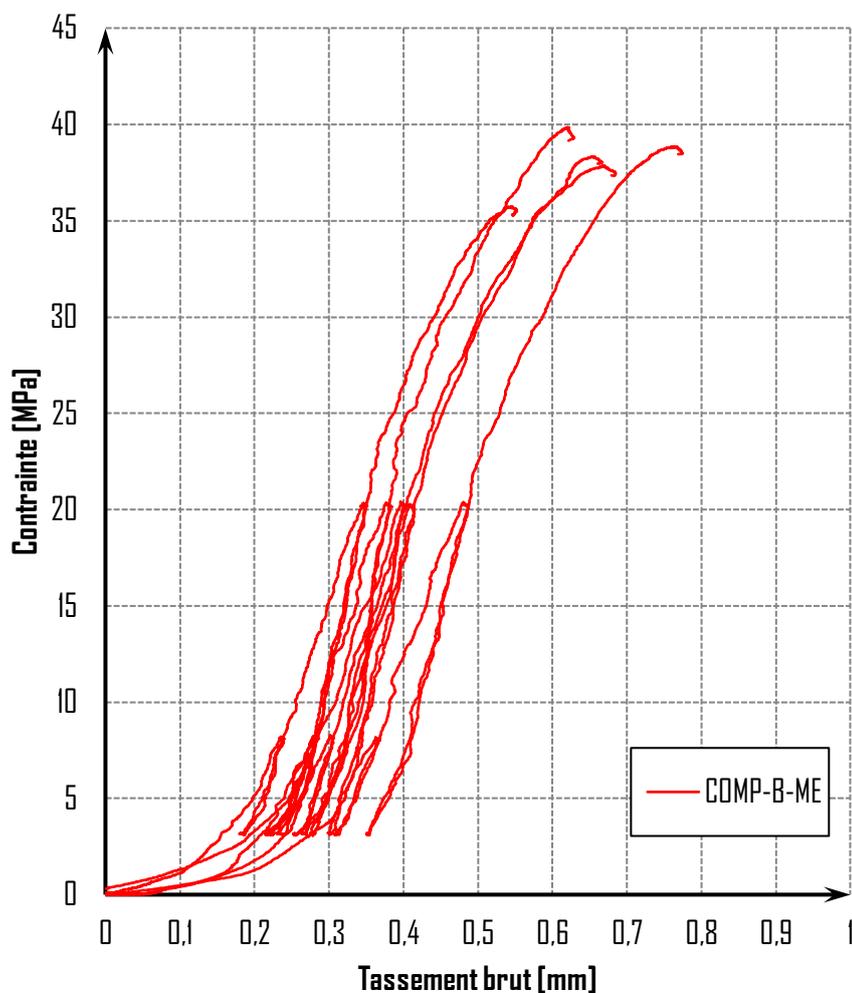


Figure 1-9 : Evolution de la contrainte de compression en fonction du tassement brut moyen des échantillons de la configuration B-ME

Le Tableau 1-7 présente la hauteur de bois H_{bois} retenue pour calculer la déformation nette de la zone de contact pour chaque essais.

Tableau 1-7 : Hauteur de bois moyenne entre les objets assemblage bois métal.

Echantillon	COMP-B-ME-1	COMP-B-ME-2	COMP-B-ME-3	COMP-B-ME-4	COMP-B-ME-5
H_{bois} mm	49.8	49.5	50.1	49.5	50.3

La Figure 1-10 présente les courbes de l'effort de compression de la zone de contact en fonction du tassement net moyen de celui-ci.

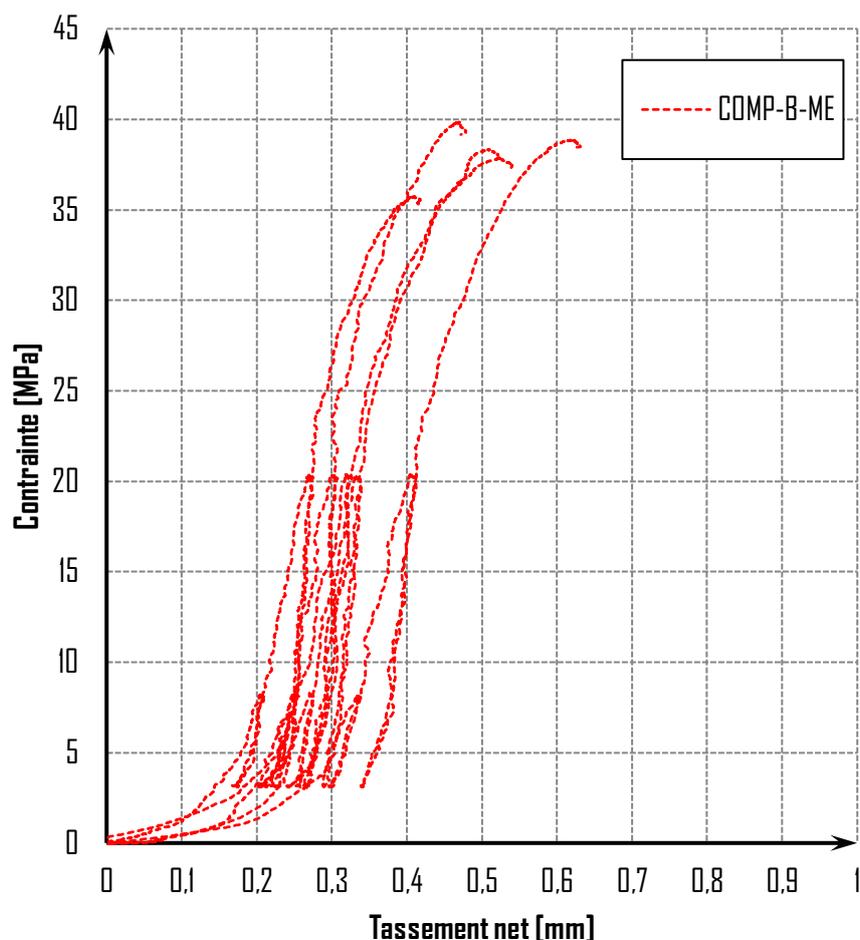


Figure I-10 : Evolution de la contrainte de compression en fonction du tassement net moyen des échantillons de la configuration B-ME

Les valeurs des contraintes à rupture de chaque échantillon ainsi que le mode de rupture sont répertoriés dans le Tableau I-9 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** La Figure I-11 présente le mode de rupture type observé de cette configuration sur chacun des échantillons.

Tableau I-8 : Résultats des contraintes à rupture et des modes de rupture des échantillons de la configuration B-ME

Echantillon	Effort	Masse volumique	Type de rupture
COMP-B-ME-1	35.8	418	Compression du bois
COMP-B-ME-2	39.9	408	Compression du bois
COMP-B-ME-3	38.4	391	Compression du bois
COMP-B-ME-4	38.9	418	Compression du bois
COMP-B-ME-5	37.9	447	Compression du bois
Moyenne	38.14	416.40	
Maximum	39.86	447.00	
Minimum	35.76	391.00	
Ecart type	1.52	20.35	
COV	3.99%	4.89%	



Figure I-II : Matage uniforme des surfaces de contact très peu perceptible et lignes de rupture par flambement de lits de trachéïdes en différents endroits de l'échantillon B-ME-5

Les valeurs de modules de fondation d'assemblage par contact sont répertoriées dans le Tableau I-9 selon la démarche rappelée en début de ce rapport.

Tableau I-9 : Résultats des modules de fondation d'assemblage par contact des échantillons de la configuration B-ME [MPa/mm]

Echantillon	$m_{el,0,1}$	$m_{el,1,4}$	Jeu	$m_{el,ELS,unload}$	$m_{el,ELS,reload}$	$m_{el,ELU,1,1,unload}$	$m_{el,ELU,1,1,reload}$
COMP-B-ME-1	23.92	135.50	0.13	153.2	140.8	287.8	312.8
COMP-B-ME-2	18.13	164.91	0.19	198.3	158.3	456.6	417.2
COMP-B-ME-3	15.99	164.44	0.22	277.5	250.2	362.7	354.9
COMP-B-ME-4	13.32	127.71	0.26	145.4	126.9	288.4	259.5
COMP-B-ME-5	18.95	122.87	0.17	97.5	93.9	234.6	218.8
Moyenne	18.06	143.08	0.19	174.39	154.02	326.02	312.65
Maximum	23.92	164.91	0.26	277.50	250.18	456.58	417.21
Minimum	13.32	122.87	0.13	97.46	93.88	234.61	218.80
Ecart type	3.94	20.22	0.05	67.85	58.72	86.05	78.01
COV	21.79%	14.13%	24.45%	38.90%	38.13%	26.39%	24.95%

1.1.3. Analyse statistique de la résistance

L'annexe D de la norme NF EN 1990 Partie D7 [3] fournit deux approches permettant de déterminer une propriété caractéristique d'un produit, dans le cas présent, la contrainte de compression du bois. Il a été choisi que les données soient dépouillées en suivant une loi Log Normale, ce qui, comme le précise l'annexe D [3], présente l'avantage d'exclure les valeurs négatives.

La première approche suppose que le coefficient de variation (COV) V_x est inconnu tandis que la deuxième approche suppose que le COV est parfaitement connu.

Dans le tableau ci-dessous, les valeurs des contraintes de compression à rupture sont présentées. A partir de ces valeurs, il est possible de déterminer une valeur caractéristique de la résistance de compression du matériau conformément au dépouillement statistique de l'Annexe D de la norme NF EN 1990 [3]. Le coefficient de variation V_x étant inférieur à 10%, il est nécessaire de passer par une approche V_x connu.

Tableau I-10 : Détermination de la valeur caractéristique de la résistance de compression du matériau de la configuration B-ME

Echantillon	m_i	$\ln(m_i)$	$(\ln(m_i) - \text{moy})^2$	N essai	k_n	s_y	Analogie	$s_y \text{ cor}$	k_s	m_k
COMP-B-ME-1	35.8	3.58	4.08E-03	5	Connu	3.99%	Non	10.00%	1.80	31.84
COMP-B-ME-2	39.9	3.69	2.01E-03							
COMP-B-ME-3	38.4	3.65	3.86E-05							
COMP-B-ME-4	38.9	3.66	3.71E-04							
COMP-B-ME-5	37.9	3.63	4.05E-05							
Moyenne	38.14	3.64								
Minimum	35.76									
Maximum	39.86									
Ecart type	1.52									
COV	3.99%									

A partir de ces hypothèses, il est possible de calculer la valeur caractéristique de la résistance de compression du matériau des essais de compression Bois / Métal selon l'équation suivante :

$$f_{c,0,k} = \exp(m_y - k_n \times 0,10) = \exp(3,64 - 1,80 \times 0,10) = 31,84 \text{ MPa}$$

1.2. - CONTACT BOIS-MORTIER

1.2.1. Echantillons

La configuration Contact Bois-Métal dénommé « B-ME » est constitué d'échantillons issus de poteaux de section 160/160mm². Ces poteaux ont juste été sciés en tronçons de 500 mm de longueur puis appérés afin de repérer deux à deux les tronçons successifs coupés d'une seul trait de scie plongeant. Il peut être remarqué que dans cette configuration, une fois les pièces placées bout à bout dans l'enceinte, le contact entre les pièces reste parfait avec le mortier de 20mm d'épaisseur intercalée entre les deux tronçons (cf. Figure I-12).

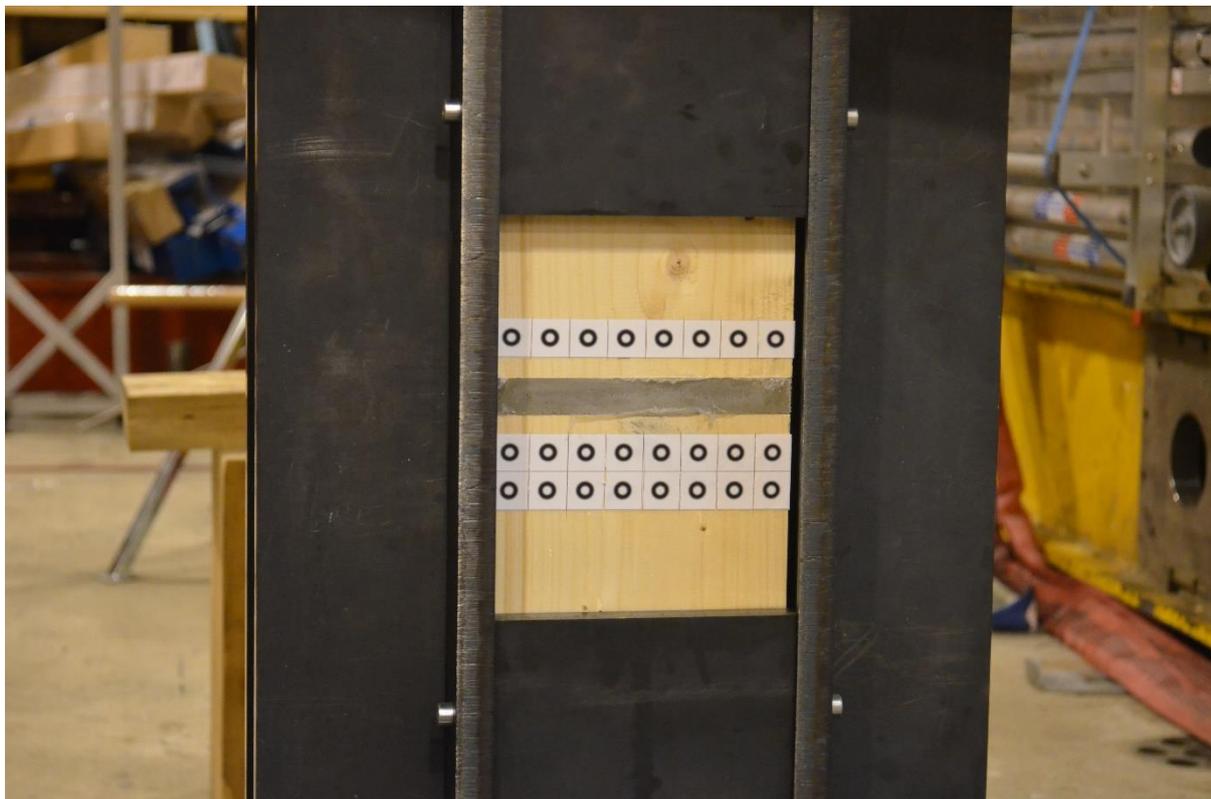


Figure I-12 : Echantillon B-MD en contact parfait dans l'enceinte.

Le Tableau I-II présente la masse volumique des éléments d'un échantillon et la moyenne de la masse volumique de l'échantillon ramenée à 12% d'humidité.

Tableau I-II : Masse volumique des éléments de la configuration B-MD.

Configuration	Numéro d'échantillon	Masse volumique par élément [kg/m ³]	Masse volumique moyenne à 12 % [kg/m ³]
7	1	395	398
		402	
	2	449	447
		445	
	3	426	426
		426	
	4	430	432
		434	
	5	418	420
		422	

1.2.2. Résultats des essais

La Figure 1-13 présente les courbes de la contrainte de compression de la zone de contact en fonction du tassement brut moyen de celui-ci. Les comportements globaux sont similaires en termes d'évolution sur ce type de contact. Un jeu se développe à faible niveau de contrainte, ce jeu provient de l'état de surface laissé par le passage de la lame. Cet état de surface était tout à fait standard pour une entreprise de charpente, sans pouvoir s'attendre à mieux. La rupture de l'échantillon se produit par compression et flambement de lits de trachéides en différents points dans la hauteur de l'éprouvette.

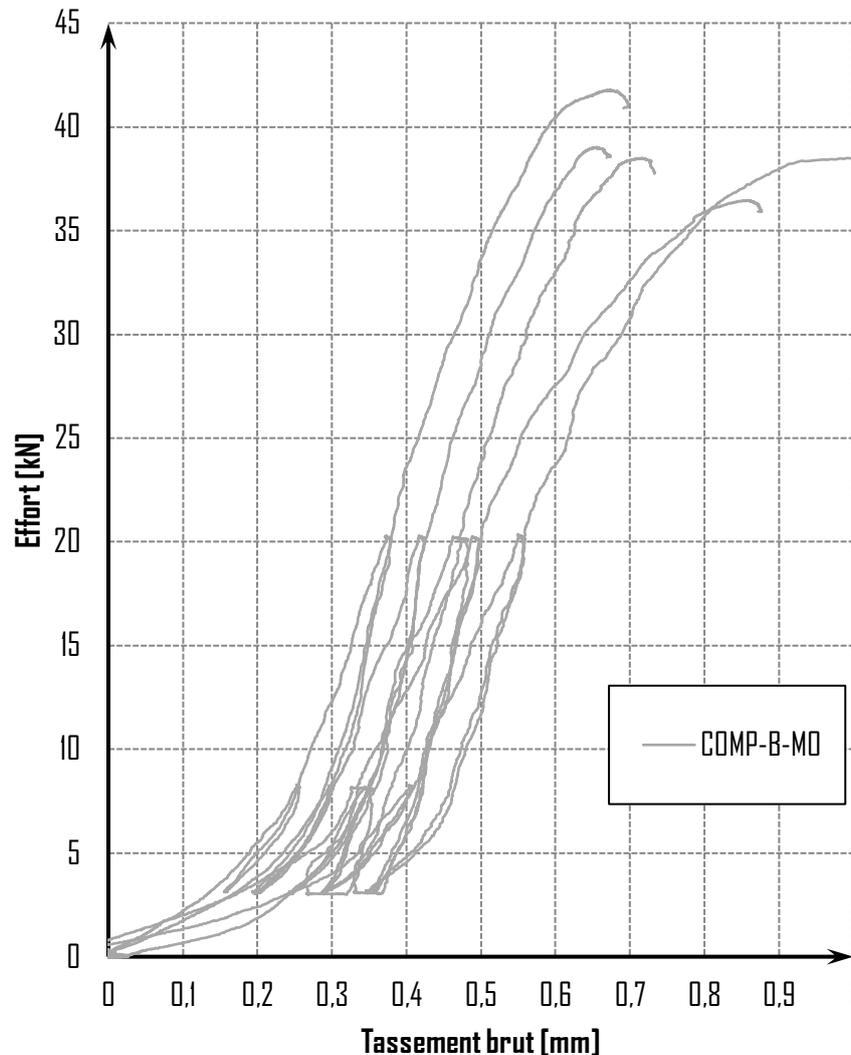


Figure 1-13 : Evolution de la contrainte de compression en fonction du tassement brut moyen des échantillons de la configuration B-MO

Le Tableau 1-12 présente la hauteur de bois H_{bois} retenue pour calculer la déformation net de la zone de contact pour chaque essais.

Tableau 1-12 : Hauteur de bois moyenne entre les objets, assemblage bois mortier.

Echantillon	COMP-B-ME-1	COMP-B-ME-2	COMP-B-ME-3	COMP-B-ME-4	COMP-B-ME-5
H_{bois} mm	51.2	50.5	50.4	51.3	50.5

La Figure 1-14 présente les courbes de l'effort de compression de la zone de contact en fonction du tassement net moyen de celui-ci.

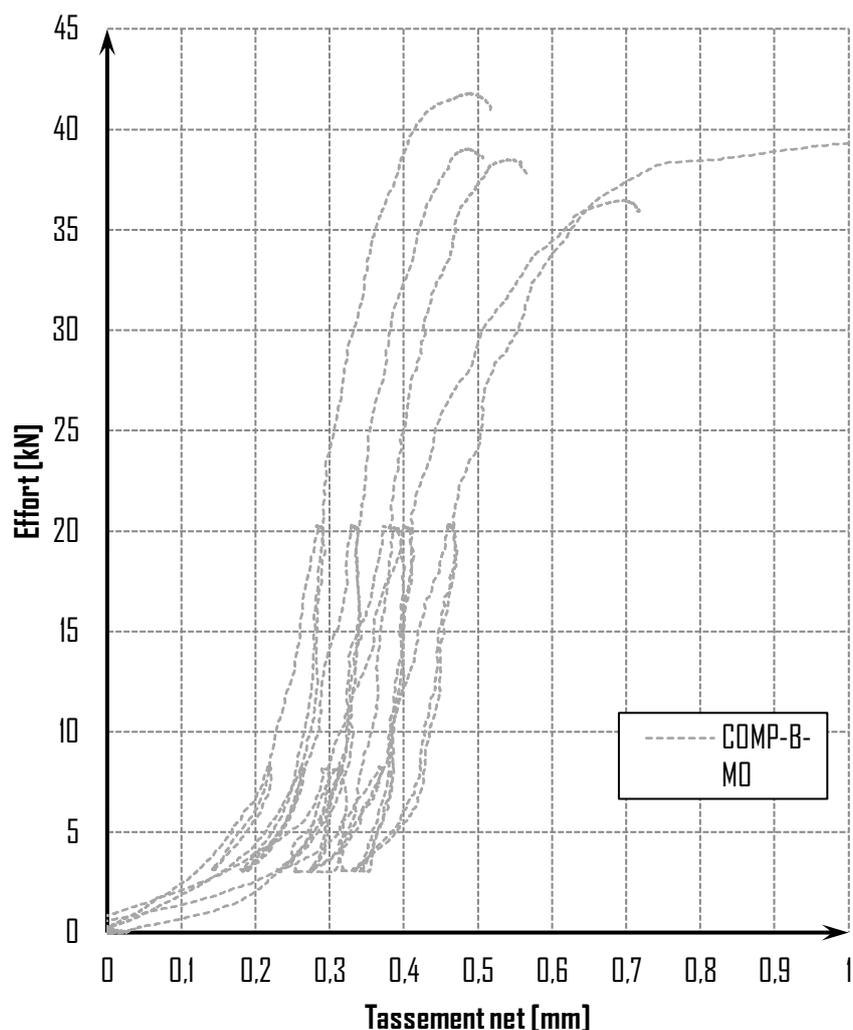


Figure 1-14 : Evolution de la contrainte de compression en fonction du tassement net moyen des échantillons de la configuration B-MO

Les valeurs des contraintes à rupture de chaque échantillon ainsi que le mode de rupture sont répertoriées dans le Tableau 1-13. La Figure 1-15 présente le mode de rupture type observé de cette configuration sur chacun des échantillons.

Tableau 1-13 : Résultats des contraintes à rupture et des modes de rupture des échantillons de la configuration B-MO

Echantillon	Contrainte [MPa]	Masse volumique [kg/m ³]	Type de rupture
COMP-B-MO-1	36.5	418	Compression du bois
COMP-B-MO-2	41.8	408	Compression du bois
COMP-B-MO-3	39.0	391	Compression du bois
COMP-B-MO-4	39.6	418	Compression du bois
COMP-B-MO-5	38.5	447	Compression du bois
Moyenne	39.10	416.40	
Maximum	41.82	447.00	
Minimum	36.48	391.00	
Ecart type	1.93	20.35	
COV	4.93%	4.89%	



Figure 1-15 : Aucun matage de surface n'est observable, les ruptures apparaissent par flambement de lits de trachéides en différents endroits de l'échantillon B-MO-5

Les valeurs de modules de fondation d'assemblage sont répertoriées dans le Tableau 1-14 selon la démarche rappelée dans ce présent rapport.

Tableau 1-14 : Résultats des modules de fondations d'assemblage des échantillons de la configuration B-MO [MPa/mm]

Echantillon	$m_{el,0,1}$	$m_{el,1,4}$	Jeu	$m_{el,unload}$	$m_{el,reload}$	$m_{el,ELU,1,1,unload}$	$m_{el,ELU,1,1,reload}$
COMP-B-MO-1	15.02	105.78	0.22	163.9	156.8	314.2	231.7
COMP-B-MO-2	26.95	95.51	0.10	73.5	58.3	162.1	150.6
COMP-B-MO-3	20.93	89.16	0.14	93.1	60.0	148.5	160.4
COMP-B-MO-4	13.96	76.58	0.22	72.2	48.7	148.6	124.3
COMP-B-MO-5	19.56	76.85	0.14	177.0	70.0	322.1	224.3
Moyenne	19.28	88.78	0.16	115.95	78.77	219.09	178.24
Maximum	26.95	105.78	0.22	177.03	156.85	322.06	231.66
Minimum	13.96	76.58	0.10	72.22	48.68	148.51	124.28
Ecart type	5.20	12.51	0.05	50.66	44.30	90.63	47.37
COV	26.96%	14.09%	31.87%	43.69%	56.24%	41.37%	26.58%

1.2.3. Analyse statistique de la résistance

L'annexe D de la norme NF EN 1990 Partie D7 [3] fournit deux approches permettant de déterminer une propriété caractéristique d'un produit, dans le cas présent, la contrainte de compression du bois. Il a été choisi que les données soient dépouillées en suivant une loi Log Normale, ce qui, comme le précise l'annexe D [3], présente l'avantage d'exclure les valeurs négatives.

La première approche suppose que le coefficient de variation (COV) V_x est inconnu tandis que la deuxième approche suppose que le COV est parfaitement connu.

Dans le tableau ci-dessous, les valeurs des contraintes de compression à rupture sont présentées. A partir de ces valeurs, il est possible de déterminer une valeur caractéristique de la résistance de compression du matériau conformément au dépouillement statistique de l'Annexe D de la norme NF EN 1990 [3]. Le coefficient de variation V_x étant inférieur à 10%, il est nécessaire de passer par une approche V_x connu.

Tableau I-15 : Détermination de la valeur caractéristique de la résistance de compression du matériau de la configuration B-MO

Echantillon	m_i	$\ln(m_i)$	$(\ln(m_i) - \text{moy})^2$	N essai	k_n	s_y	Analogie	$s_y \text{ cor}$	k_s	m_k
COMP-B-MO-1	36.5	3.60	4.66E-03	5	Connu	4.93%	Non	10.00%	1.80	32.62
COMP-B-MO-2	41.8	3.73	4.65E-03							
COMP-B-MO-3	39.0	3.66	1.48E-07							
COMP-B-MO-4	39.6	3.68	2.16E-04							
COMP-B-MO-5	38.5	3.65	2.04E-04							
Moyenne	39.10	3.67								
Minimum	36.48									
Maximum	41.82									
Ecart type	1.93									
COV	4.93%									

A partir de ces hypothèses, il est possible de calculer la valeur caractéristique de la résistance de compression du matériau avec contact bois mortier selon l'équation suivante :

$$f_{c,0,k} = \exp(m_y - k_n \times 0,10) = \exp(3,67 - 1,80 \times 0,10) = 32,62 \text{ MPa}$$

1.3. - ESSAIS DE CONTACT AVEC UN DEFAUT DE PERPENDICULARITE

1.3.1. Echantillons

Les deux lots d'échantillons permettant la réalisation d'essais avec des défauts d'usinage ont été constitués d'échantillons issus de poteaux de section 400x400 mm² (ANNEXE A). Ces poteaux ont été juste sciés en tronçons de 500mm de long avec un défaut d'usinage imposé de 1,7mm selon la diagonale tel qu'il avait été défini dans le protocole d'essais. Après le redécoupage des tronçons en barres de 160x160 mm chaque barre a été contrôlée afin de constituer des échantillons formés de deux éléments. Afin de quantifier le défaut réel de chaque partie de l'échantillon, un dispositif de mesure constitué de 9 comparateurs a été développé. Ce dispositif est présenté sur la Figure 1-16.

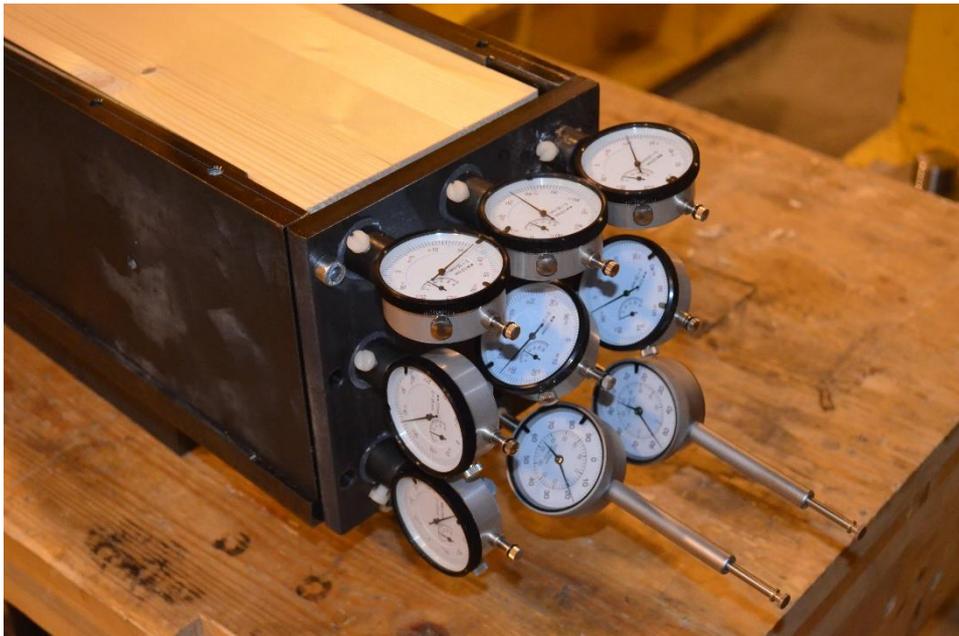


Figure 1-16 : Contrôle du défaut de perpendicularité de chaque tronçon de 160x160 mm.

A l'aide de ce dispositif, un ensemble de 9 mesures est relevé, ceci permet de tracer un graphique de mesures brutes, celui-ci se situe à gauche de la Figure 1-17 pour chacun des éléments bois. En minimisant l'écart des distances verticales mesurées à celles d'un plan idéal, un plan optimisé est obtenu : il permet de déterminer un jeu maximum du fait de l'inclinaison du plan. Celui-ci est présenté selon le graphique droit de la Figure 1-17. Ainsi, un défaut d'usinage théorique est caractérisé pour chaque barre bois. Le défaut mesuré sur un carré de 145 x 145 est extrapolé à 160x160 mm.

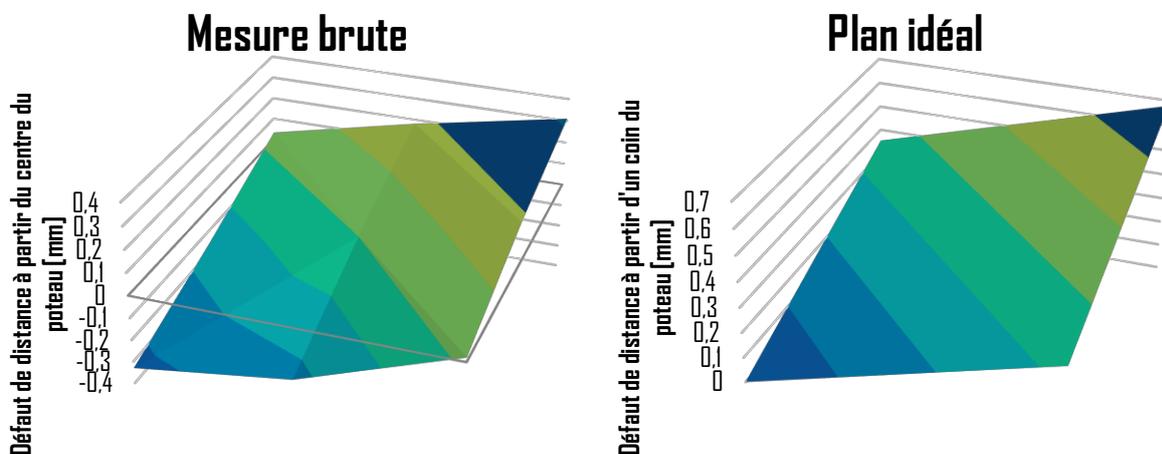


Figure 1-17 : Plan de mesure brute (à gauche), Plan optimisé du défaut de coupe (à droite)

Comme il a été évoqué précédemment, il était nécessaire de constituer deux lots d'échantillons afin de produire deux configurations d'essais avec défauts : une en contact bois /bois « B-B-D » et une en contact bois métal « B-ME-D ».

Suite au relevé des défauts d'usinage des éléments bois, les éprouvettes ont été appairées deux à deux afin d'obtenir un défaut d'usinage moyen le plus homogène possible sur l'ensemble des éprouvettes. Ce défaut devait s'apparenter par cumul au défaut max produit lors de la découpe des poteaux 400 mm x 400 mm : c'est-à-dire 1,7 mm suivant la diagonale. Ce choix a été fait afin que des simulations numériques puissent être conduites après les essais, afin de permettre l'extrapolation des comportements observés. Pour être certain du défaut obtenu par l'association de deux éléments bois, le défaut d'usinage des éprouvettes constituant le lot « B-B-D » ont été recontrôlé à l'aide de cales étalon lors de la mise en place des éléments bois dans l'enceinte métallique. Le Tableau I-16 présente ces différentes mesures pour les éprouvettes « B-B-D ». Un écart de 0,3 mm à 0,6 mm est cependant observé entre la somme des défauts théoriques obtenus par la minimisation avec le plan et le défaut réel mesuré avec les cales étalons dans l'angle devant présenter le plus de défaut.

Tableau I-16 : Défaut théorique et mesuré des échantillons du lot « B-B-D »

Echantillon	N° Element	Défaut théorique pièce supérieure	N° Element	Défaut théorique pièce inférieure	Somme théorique des défauts	Défaut maxi cale étalon
COMP-B-B-D-1	1213	1,03	4344	0,95	1,98	1,6
COMP-B-B-D-2	1411	0,76	2223	0,76	1,52	1,2
COMP-B-B-D-3	3132	0,73	3233	0,79	1,52	1,2
COMP-B-B-D-4	4441	0,64	2324	0,84	1,48	1,1
COMP-B-B-D-5	334	0,61	2122	0,95	1,56	1,0

Le tri des éprouvettes précédentes en fonction de leurs défauts d'usinage mesurés a permis de constituer un lot d'échantillons avec un défaut assez proche. Il n'a pas été possible de réitérer le même appareillage d'éprouvettes avec le reste des éprouvettes pour constituer le lot « B-ME-D » car les défauts relevés étaient beaucoup plus hétérogènes sur les surfaces : après tri est calage du plan optimal, les défauts n'arrivaient pas à être constitué correctement. Après de multiple tentatives d'appareillage, les échantillons « B-ME-D » ont été constitués d'éprouvettes ou la mesure directe par cales étalon se montrait reproductible, les jeux relevés sont indiqués dans le Tableau I-17.

Tableau I-17 : Défauts des éprouvettes B-ME-D

Echantillon	Défaut cale étalon
COMP-B-ME-D-1	0,56
COMP-B-ME-D-2	0,6
COMP-B-ME-D-3	0,7
COMP-B-ME-D-4	0,9
COMP-B-ME-D-5	0,95

1.3.2. Résultats des essais de contact sur les échantillons du lot «B-B-D »

La Figure 1-18 présente les courbes de la contrainte de compression homogène théorique de la zone de contact en fonction du tassement brut moyen de celui-ci. Les comportements globaux sont similaires en termes d'évolution sur ce type de contact même avec le jeu, une éprouvette sort cependant du lot. Un jeu se développe à faible niveau de contrainte, ce jeu provient de l'état de surface laissé par le passage de la lame. Cet état de surface était tout à fait standard pour une entreprise de charpente, sans pouvoir s'attendre à mieux. La rupture de l'échantillon se produit par compression et flambement de lits de trachéides en différents points dans la hauteur de l'éprouvette. Il est remarqué que le jeu apparent après mise en contact est plus petit que le jeu max mesuré entre les points bas des surfaces en contact. Dans la zone de contact initiale (début du chargement), les fibres s'enchevêtrent ce qui permet de réduire globalement 2 fois plus rapidement le jeu. Dès que toute la surface est en contact la raideur se met à croître rapidement.

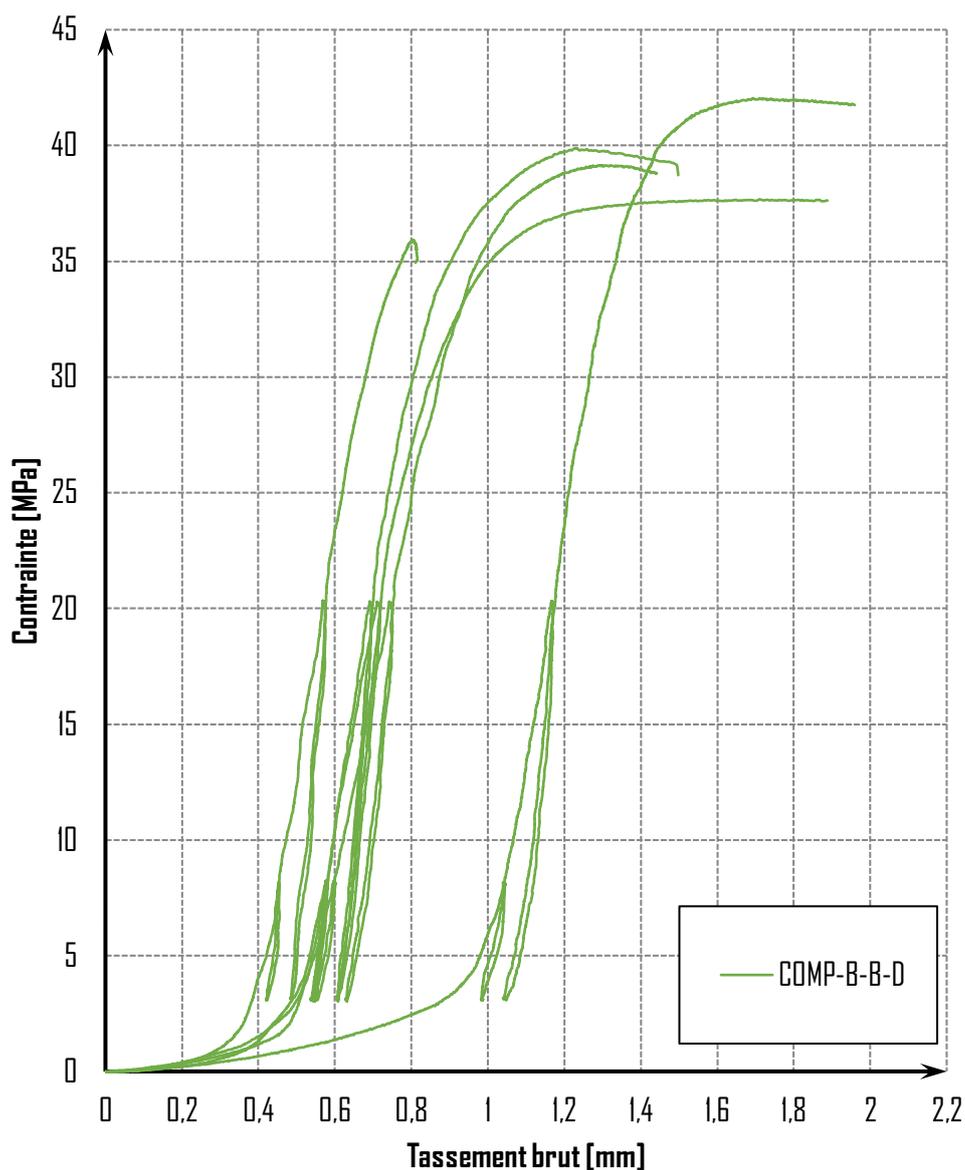


Figure 1-18 : Evolution de la contrainte de compression en fonction du tassement brut moyen des échantillons de la configuration B-B-D

Le Tableau I-20 présente la hauteur de bois H_{bois} retenue pour calculer la déformation net de la zone de contact pour chaque essai.

Tableau I-18 : Hauteur de bois moyenne entre les objets, assemblage bois bois avec défaut.

Echantillon	COMP-B-ME-1	COMP-B-ME-2	COMP-B-ME-3	COMP-B-ME-4	COMP-B-ME-5
H_{bois} mm	51,2	49,8	49,2	50,5	50,2

La Figure I-19 présente les courbes de la contrainte de compression de la zone de contact en fonction du tassement net moyen de celui-ci.

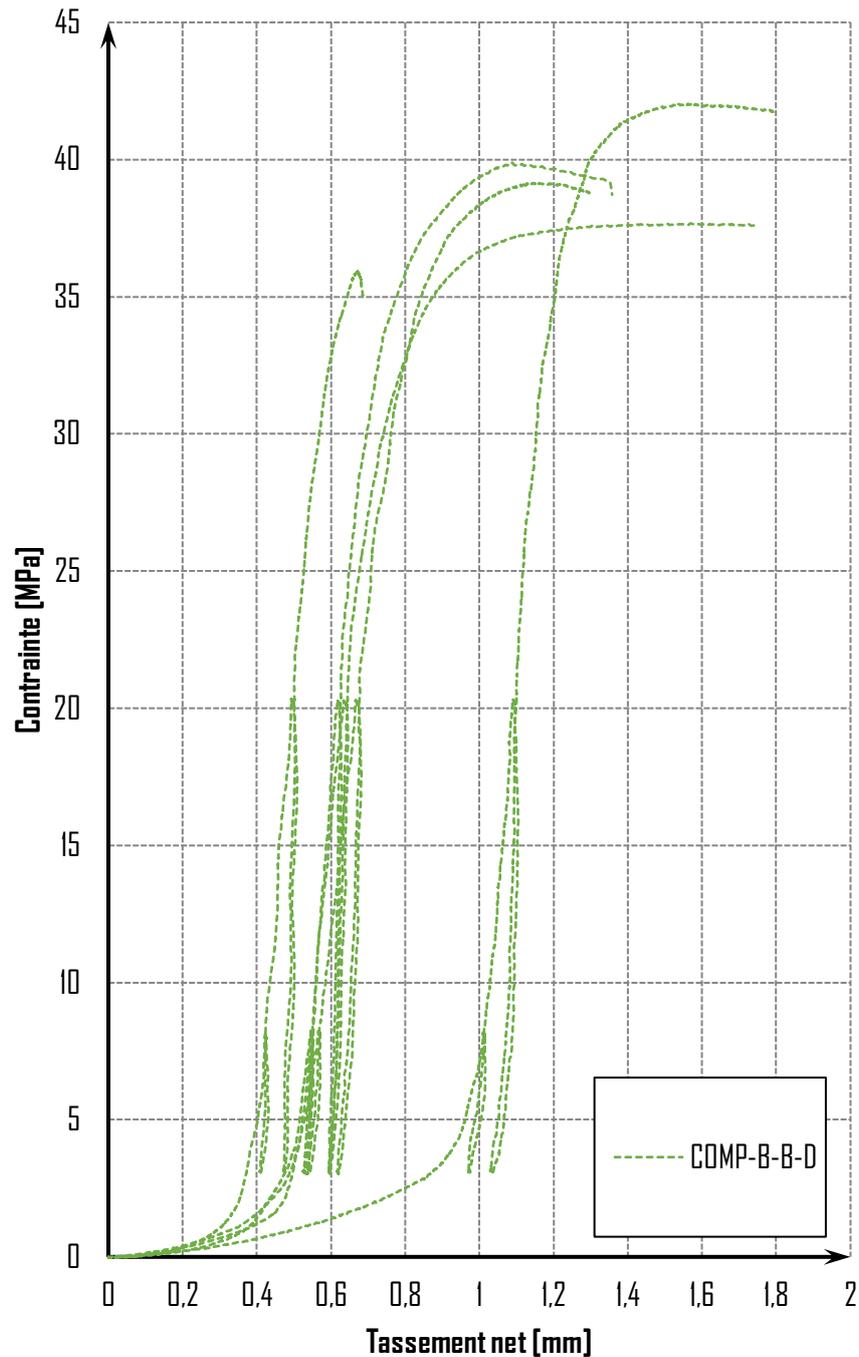


Figure I-19 : Evolution de la contrainte de compression en fonction du tassement net moyen des échantillons de la configuration B-B-D

Les valeurs des contraintes à rupture des échantillons ainsi que le mode de rupture sont répertoriés dans le Tableau I-19. La Figure I-20 présente le mode de rupture type observé de cette configuration sur chacun des échantillons.

Tableau I-19 : Résultats des contraintes à rupture et des modes de rupture des échantillons de la configuration « B-B-D »

Echantillon	Contrainte en Mpa	Masse volumique kg/m ³	Type de rupture
COMP-B-B-D-1	42.0	418	Compression de interface
COMP-B-B-D-2	37.7	408	Compression de interface
COMP-B-B-D-3	35.9	391	Compression de interface
COMP-B-B-D-4	39.1	418	Compression de interface
COMP-B-B-D-5	39.9	447	Compression de interface
Moyenne	38.94	416.40	
Maximum	42.05	447.00	
Minimum	35.93	391.00	
Ecart type	2.31	20.35	
COV	5.92%	4.89%	



Figure I-20 : Exemple de matage en compression de l'interface des échantillons « B-B-D »

Pour faire écho à l'observation des courbes d'essais, le Tableau I-20 présente la différence entre les défauts mesurés sur les courbes expérimentales et les défauts relevés avec les cales étalons. Un écart de - 50% à - 70% est observée entre le défaut expérimental et le défaut étalon.

Tableau I-20 : Défaut mesuré à la cale étalon vs défaut expérimental

Echantillon	Défaut étalon	Défaut expérimental	Ecart %
COMP-B-B-D-1	1,6	0,87	-46%
COMP-B-B-D-2	1,2	0,47	-61%
COMP-B-B-D-3	1,2	0,36	-70%
COMP-B-B-D-4	1,1	0,47	-57%
COMP-B-B-D-5	1,0	0,48	-52%

Ceci indique que la modélisation de la rupture de la surface de contact n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît. Sur les essais sans défaut bois/bois, les bois avaient été replacés exactement face à face, l'enchevêtrement n'est pas apparu. Le comportement en compression à l'interface ne peut se résumer à un comportement élastoplastique, il faut tenir compte de cet enchevêtrement possible et définir en plus un comportement d'interface afin d'aboutir à un modèle prédictif.

Les valeurs des modules de fondation d'assemblage sont répertoriées dans le Tableau I-1 selon la démarche rappelée en début de ce rapport.

Tableau I-21 : Résultats des modules de fondations d'assemblage des échantillons de la configuration B-B-D [MPa/mm]

Echantillon	$m_{el,0,1}$	$m_{el,1,4}$	Jeu	$m_{el,unload}$	$m_{el,reload}$	$m_{el,ELU,1,1 unload}$	$m_{el,ELU,1,1 reload}$
COMP-B-B-D-1	4.10	78.03	0.87	93.2	91.7	247.1	235.0
COMP-B-B-D-2	7.68	116.92	0.47	196.8	244.5	379.1	361.7
COMP-B-B-D-3	9.95	142.54	0.36	126.6	265.9	495.7	480.5
COMP-B-B-D-4	7.50	95.63	0.47	170.1	154.5	299.0	260.0
COMP-B-B-D-5	7.54	138.62	0.48	321.1	324.3	578.8	527.1
Moyenne	7.35	114.35	0.53	181.54	216.18	399.93	372.84
Maximum	9.95	142.54	0.87	321.13	324.28	578.75	527.10
Minimum	4.10	78.03	0.36	93.16	91.66	247.12	234.96
Ecart type	2.09	27.66	0.20	87.58	92.56	137.06	129.68
COV	28.42%	24.19%	37.46%	48.24%	42.82%	34.27%	34.78%

1.3.3. Analyse statistique

L'annexe D de la norme NF EN 1990 Partie D7 [3] fournit deux approches permettant de déterminer une propriété caractéristique d'un produit, dans le cas présent, la contrainte de compression du bois. Il a été choisi que les données soient dépouillées en suivant une loi Log Normale, ce qui, comme le précise l'annexe D [3], présente l'avantage d'exclure les valeurs négatives.

La première approche suppose que le coefficient de variation (COV) V_x est inconnu tandis que la deuxième approche suppose que le COV est parfaitement connu.

Dans le tableau ci-dessous, les valeurs des contraintes de compression à rupture sont présentées. A partir de ces valeurs, il est possible de déterminer une valeur caractéristique de la résistance de compression de l'interface conformément au dépouillement statistique de l'Annexe D de la norme NF EN 1990 [3]. Le coefficient de variation V_x étant inférieur à 10%, il est nécessaire de passer par une approche V_x connu.

Tableau 1-22 : Détermination de la valeur caractéristique de la résistance de compression du matériau de la configuration « B-B-D »

Echantillon	m_i	$\ln(m_i)$	$(\ln(m_i) - \text{moy})^2$	N essai	k_n	s_y	Analogie	$s_y \text{ cor}$	k_s	m_k
COMP-B-B-D-1	42.0	3.74	6.13E-03	5	Connu	5.92%	Non	10.00%	1.80	32.48
COMP-B-B-D-2	37.7	3.63	9.92E-04							
COMP-B-B-D-3	35.9	3.58	6.26E-03							
COMP-B-B-D-4	39.1	3.67	4.67E-05							
COMP-B-B-D-5	39.9	3.69	6.50E-04							
Moyenne	38.94	3.66								
Minimum	35.93									
Maximum	42.05									
Ecart type	2.31									
COV	5.92%									

A partir de ces hypothèses, il est possible de calculer la valeur caractéristique de la résistance de compression de l'interface avec défaut selon l'équation suivante :

$$f_{c,0,k} = \exp(m_y - k_n \times 0,10) = \exp(3,66 - 1,80 \times 0,10) = 32,48 \text{ MPa}$$

1.3.4. Résultats des éprouvettes B-ME-D

La Figure 1-21 présente les courbes de la contrainte de compression de la zone de contact en fonction du tassement brut moyen de celui-ci. Les comportements globaux sont similaires en termes d'évolution sur ce type de contact même avec le jeu, une éprouvette sort cependant du lot. Un jeu se développe à faible niveau de contrainte, ce jeu provient de l'état de surface laissé par le passage de la lame. Cet état de surface était tout à fait standard pour une entreprise de charpente, sans pouvoir s'attendre à mieux. La rupture de l'échantillon se produit par compression et flambement de lits de trachéides en différents points dans la hauteur de l'éprouvette. Il est remarqué que le jeu apparent après mise en contact est plus petit que le jeu max mesuré entre les points bas des surfaces en contact avec la cale étalon.

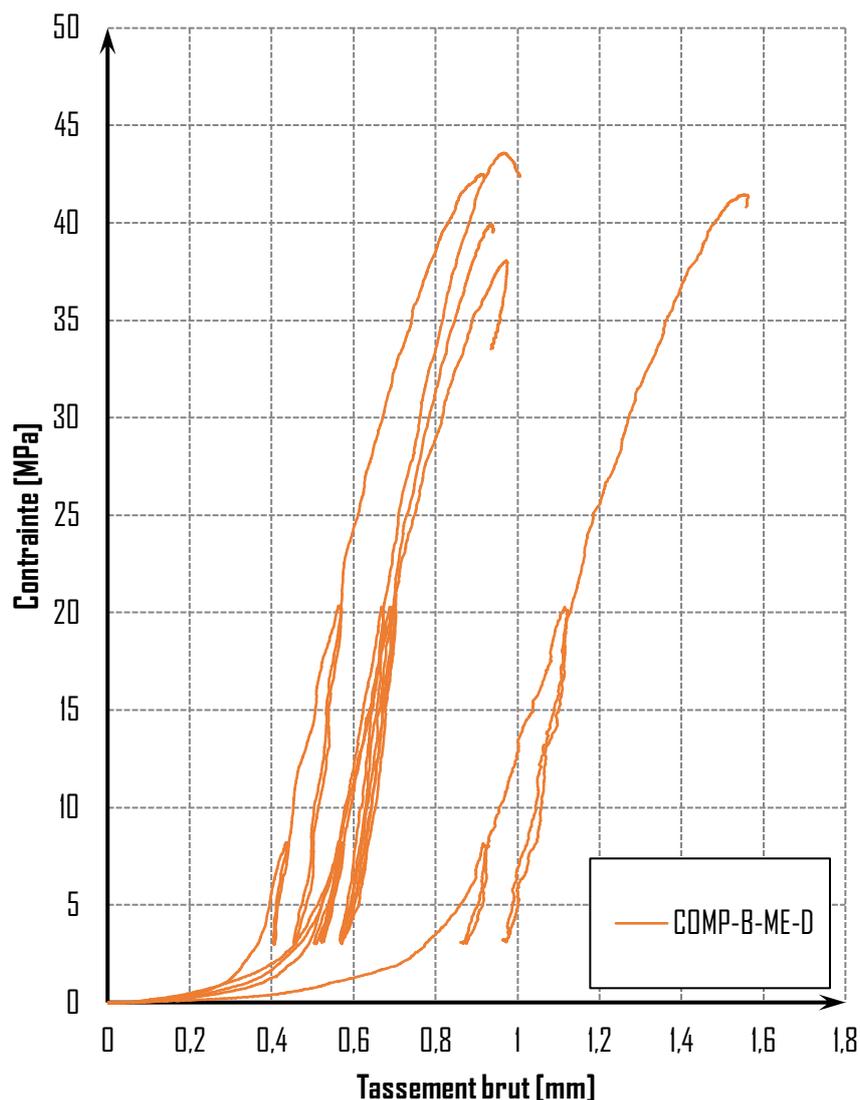


Figure 1-21 : Evolution de la contrainte de compression en fonction du tassement brut moyen des échantillons de la configuration B-ME-D

La Figure 1-22 présente les courbes de l'effort de compression de la zone de contact en fonction du tassement net moyen de celui-ci.

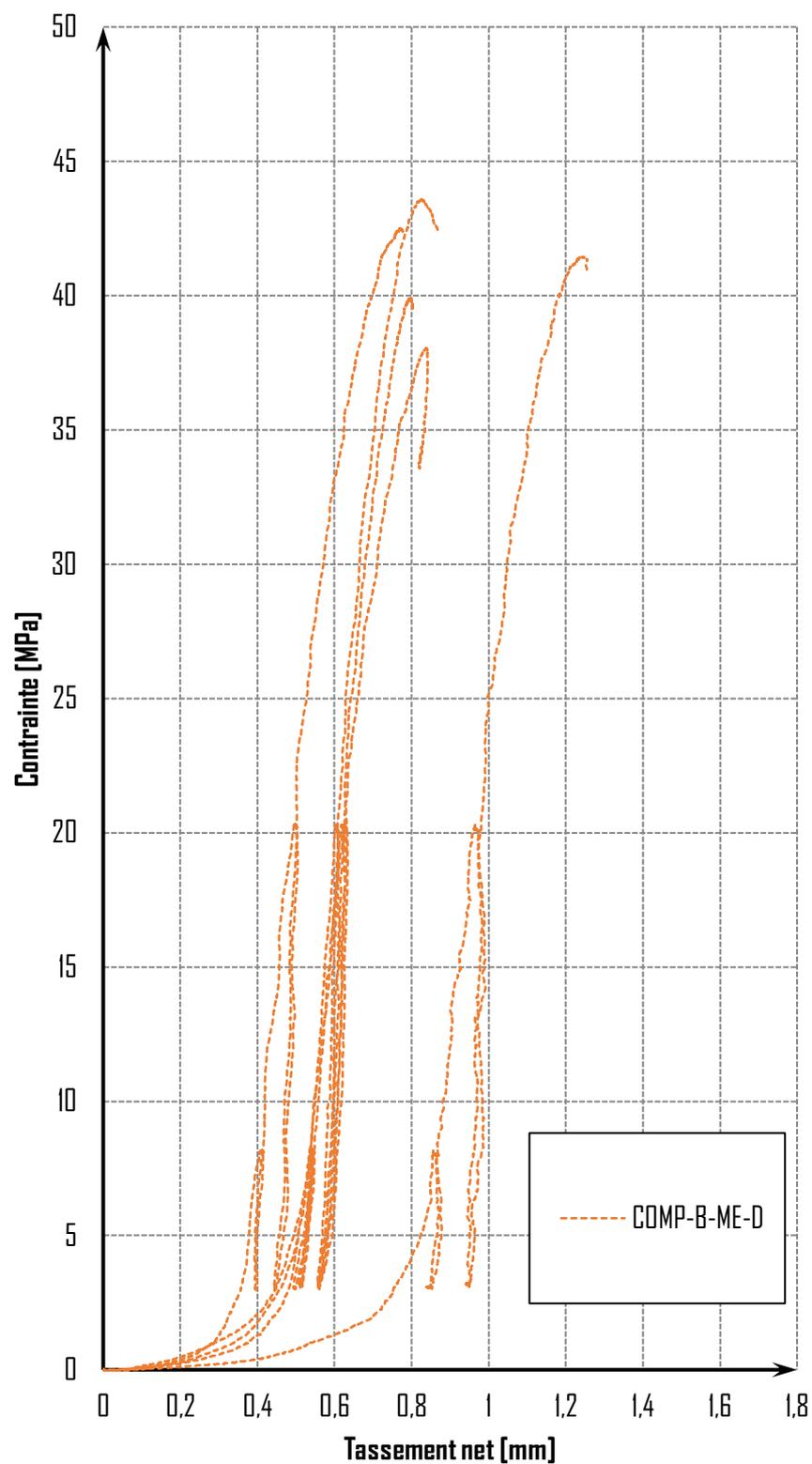


Figure I-22 : Evolution de la contrainte de compression en fonction du tassement net moyen des échantillons de la configuration B-ME-D

Les valeurs des contraintes à rupture des échantillons ainsi que le mode de rupture sont répertoriés dans le Tableau I-23. La Figure I-23 présente le mode de rupture type de cette configuration observé sur chacun des échantillons.

Tableau I-23 : Résultats des contraintes à rupture et des modes de rupture des échantillons de la configuration B-ME-D

Echantillon	Effort	Masse volumique	Type de rupture
COMP-B-ME-D-1	42.5	418	Compression du bois
COMP-B-ME-D-2	41.5	408	Compression du bois
COMP-B-ME-D-3	43.6	391	Compression du bois
COMP-B-ME-D-4	38.1	418	Compression du bois
COMP-B-ME-D-5	39.9	447	Compression du bois
Moyenne	41.11	416.40	
Maximum	43.60	447.00	
Minimum	38.07	391.00	
Ecart type	2.18	20.35	
COV	5.29%	4.89%	



Figure I-23 : Rupture en compression de l'échantillon B-ME-D-5

Les valeurs de modules de fondation d'assemblage sont répertoriées dans le Tableau I-24 selon la démarche rappelée en début du présent rapport.

Tableau I-24 : Résultats des modules de fondations d'assemblage des échantillons de la configuration B-ME-D [MPa/mm]

Echantillon	$m_{el,0,1}$	$m_{el,1,4}$	Jeu	$m_{el,unload}$	$m_{el,reload}$	$m_{el,ELU,unload}$	$m_{el,ELU,reload}$
COMP-B-ME-D-1	10.31	129.10	0.34	215.9	250.5	341.5	321.9
COMP-B-ME-D-2	4.86	82.43	0.74	-11.8	164.9	290.2	391.2
COMP-B-ME-D-3	7.70	138.67	0.47	203.5	185.2	380.2	340.8
COMP-B-ME-D-4	8.19	95.78	0.43	104.4	101.0	233.7	232.3
COMP-B-ME-D-5	7.92	105.34	0.45	131.8	131.5	278.5	268.3
Moyenne	7.80	110.26	0.48	128.77	166.63	304.81	310.93
Maximum	10.31	138.67	0.74	215.91	250.48	380.15	391.23
Minimum	4.86	82.43	0.34	-11.81	101.04	233.70	232.30
Ecart type	1.95	23.29	0.15	91.57	56.83	56.97	62.17
COV	24.96%	21.13%	31.28%	71.11%	34.11%	18.69%	20.00%

1.3.5. Analyse statistique

L'annexe D de la norme NF EN 1990 Partie D7 [3] fournit deux approches permettant de déterminer une propriété caractéristique d'un produit, dans le cas présent, la contrainte de compression du bois. Il a été choisi que les données soient dépouillées en suivant une loi Log Normale, ce qui, comme le précise l'annexe D [3], présente l'avantage d'exclure les valeurs négatives.

La première approche suppose que le coefficient de variation (COV) V_x est inconnu tandis que la deuxième approche suppose que le COV est parfaitement connu.

Dans le tableau ci-dessous, les valeurs des contraintes de compression à rupture sont présentées. A partir de ces valeurs, il est possible de déterminer une valeur caractéristique de la résistance de compression de l'interface conformément au dépouillement statistique de l'Annexe D de la norme NF EN 1990 [3]. Le coefficient de variation V_x étant inférieur à 10%, il est nécessaire de passer par une approche V_x connu.

Tableau I-25 : Détermination de la valeur caractéristique de la résistance de compression du matériau de la configuration « B-ME-D »

Echantillon	m_i	$\ln(m_i)$	$(\ln(m_i) - \text{moy})^2$	N essai	k_n	s_y	Analogie	$s_y \text{ cor}$	k_s	m_k
COMP-B-ME-D-1	42.5	3.75	1.19E-03	5	Connu	5.29%	Non	10.00%	1.80	34.30
COMP-B-ME-D-2	41.5	3.72	8.95E-05							
COMP-B-ME-D-3	43.6	3.78	3.60E-03							
COMP-B-ME-D-4	38.1	3.64	5.73E-03							
COMP-B-ME-D-5	39.9	3.69	7.99E-04							
Moyenne	41.1	3.72								
Minimum	38.07									
Maximum	43.60									
Ecart type	2.18									
COV	5.29%									

A partir de ces hypothèses, il est possible de calculer la valeur caractéristique de la résistance de compression de l'interface avec défaut selon l'équation suivante :

$$f_{c,0,k} = \exp(m_y - k_n \times 0,10) = \exp(3,72 - 1,80 \times 0,10) = 34,30 \text{ MPa}$$

1.4. SYNTHESE

Le Tableau I-26 présente la différence entre les défauts mesurés à l'aide des cales étalon et le défaut relevé après analyse des essais. Un écart de - 30% et - 50% est observée entre le défaut expérimental et le défaut étalon. La réduction du jeu initial n'est donc pas aussi conséquente que celle observée en contact directe bois sur bois. Ceci est dû au fait que l'enchevêtrement des fibres ne peut pas se produire avec la plaque métallique.

Tableau I-26 : Défaut mesuré par cale étalon vs défaut mesuré expérimentalement

Echantillon	Défaut étalon	Défaut expérimental	Ecart %
COMP-B-ME-D-1	0,56	0,34	-39%
COMP-B-ME-D-2	0,6	0,74	23%
COMP-B-ME-D-3	0,7	0,47	-33%
COMP-B-ME-D-4	0,9	0,43	-52%
COMP-B-ME-D-5	0,95	0,45	-53%

2. SYNTHÈSE DES RESULTATS

2.1. ANALYSE DES ESSAIS B/B, B/M ET B/ME SANS DEFAUT

La Figure 2-1 synthétise l'ensemble des évolutions de la contrainte en fonction du tassement net moyen des éprouvettes sans défaut. L'ensemble des courbes présente les mêmes évolutions avec des jeux plus ou moins important. Le seuil de rupture est quasi identique quel que soit le contact puisque pour tous les échantillons, la rupture est apparue dans le bois. Il apparaît que les essais bois/bois sont plus rigides que les essais bois métal et bois mortier. Il faut rappeler ici que les éprouvettes ont été remplacées en continuité de leur découpe : les cernes sont exactement en face les uns de autres dans les assemblages bois/bois. Aucun enchevêtrement de cernes n'a été observé.

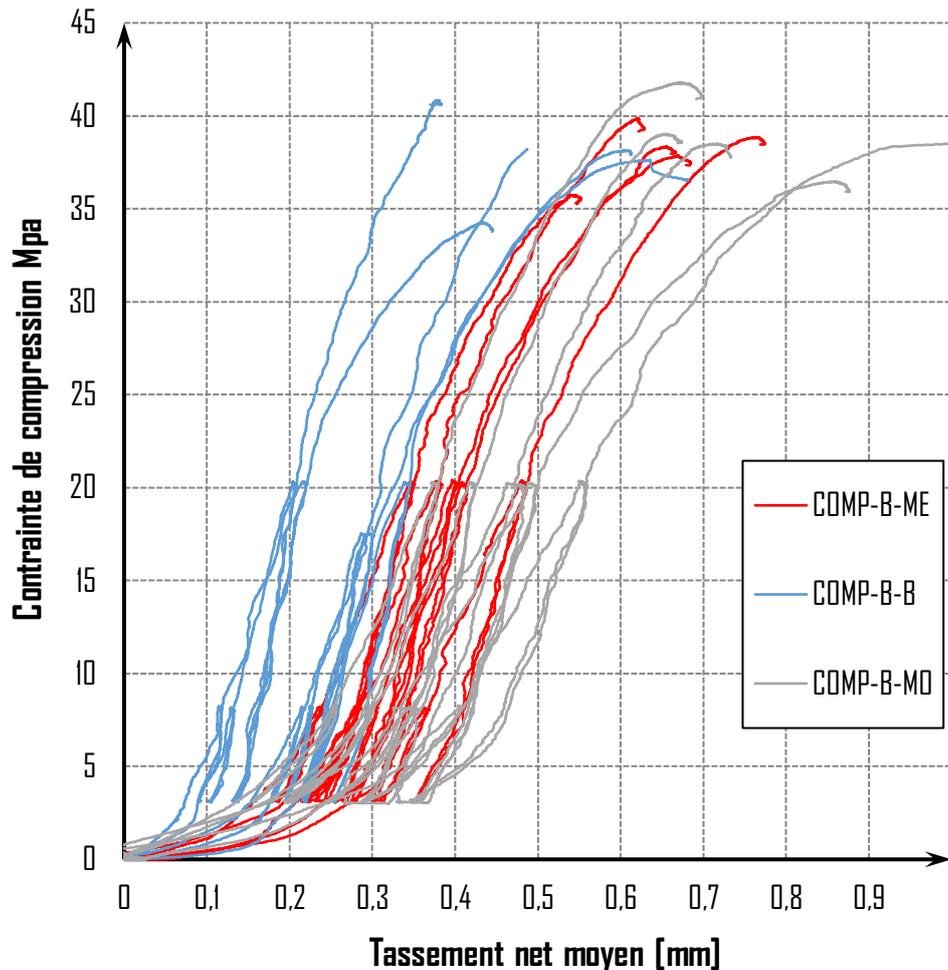


Figure 2-1: Evolution de la contrainte en fonction du tassement net moyen de toutes les éprouvettes sans défaut

Le Tableau 2-1 présente les modules de fondations $m_{e,1,4}$ pour les configurations sans défauts. Le module de fondation le plus élevé est obtenu pour le contact Bois-Bois. A partir de cette valeur, une différence de 41% et 63% est observée par rapport au contact Bois-Métal et Bois-Mortier respectivement. Cependant, les modules de fondations sont moins variables sur ces deux derniers types de contact.

Tableau 2-1 : Comparaison des modules de fondations $m_{el,1,4}$ de contact des éprouvettes sans défaut [N/mm^3]

Echantillon	COMP-B-B	COMP-B-ME	COMP-B-MO
Moyenne	242.12	143.08	88.78
Minimum	324.85	164.91	105.78
Maximum	153.18	122.87	76.58
Ecart type	62.78	20.22	12.51
COV	25.93%	14.13%	14.09%

Le Tableau 2-2 présente la valeur des jeux pour les configurations sans défauts. Ces jeux sont similaires sur l'ensemble des configurations. Cependant, le coefficient de variation caractérisant les jeux sont assez importants.

Tableau 2-2 : Comparaison du jeux initiale des éprouvettes sans défauts

Echantillon	COMP-B-B	COMP-B-ME	COMP-B-MO
Moyenne	0.12	0.19	0.16
Maximum	0.19	0.26	0.22
Minimum	0.05	0.13	0.10
Ecart type	0.06	0.05	0.05
COV	49.73%	24.45%	31.87%

2.2. ANALYSE DES EPROUVETTES BOIS-BOIS

La Figure 2-2 synthétise l'ensemble des évolutions de la contrainte en fonction du tassement net moyen des éprouvettes Bois-Bois. Le défaut d'usinage est tout de suite visible sur le comportement de la zone de contact. Il est curieux d'observer que le défaut entraîne une certaine ductilité du comportement lorsque la contrainte de compression maximale est atteinte. Il est possible que le défaut d'interface permette de moins solliciter les points durs de la section de 160 x 160 mm ce qui permet une rupture plus progressive du bois dans la zone de contact.

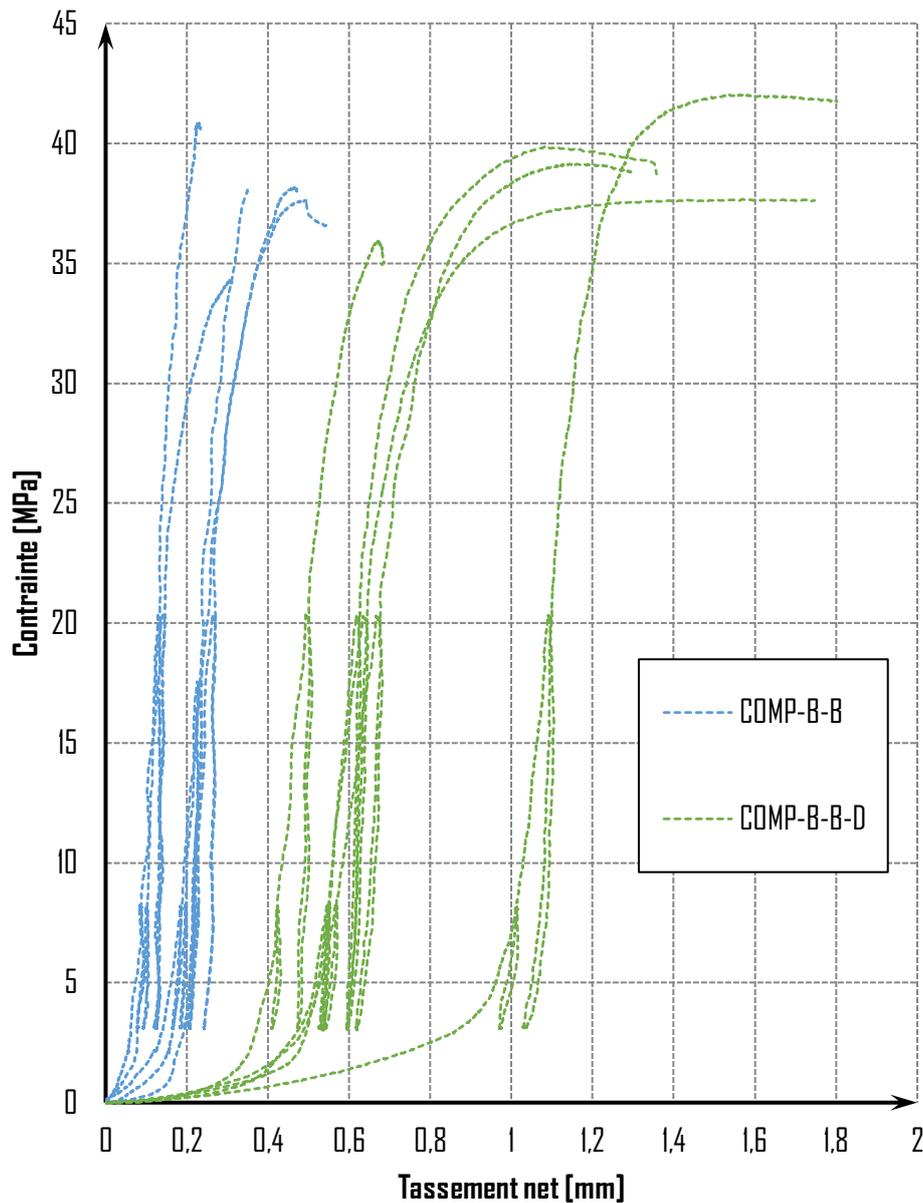


Figure 2-2: Evolution de la contrainte en fonction du tassement net moyen de l'ensemble des éprouvettes Bois-Bois

Le Tableau 2-3 présente les modules de fondations $m_{el,1,4}$ pour les configurations Bois-Bois. Une perte de rigidité d'environ 50% est observée pour la configuration avec défaut montrant l'incidence du défaut sur le comportement de la zone de contact.

Tableau 2-3 : Comparaison des modules de fondations $m_{el,1,4}$ de contact des éprouvettes Bois-Bois

Echantillon	COMP-B-B	COMP-B-B-D
Moyenne	242.12	114.35
Minimum	324.85	142.54
Maximum	153.18	78.03
Ecart type	62.78	27.66
COV	25.93%	24.19%

2.3. ANALYSE DES EPROUVETTES BOIS-MÉTAL

La Figure 2-3 synthétise l'ensemble des évolutions de la contrainte en fonction du tassement net moyen des éprouvettes Bois-Métal. Le défaut d'usinage est tout de suite visible sur le comportement de la zone de contact. Contrairement à la configuration Bois-Bois avec défaut, la rupture des éprouvettes se produit dans le bois et non à la surface de contact.

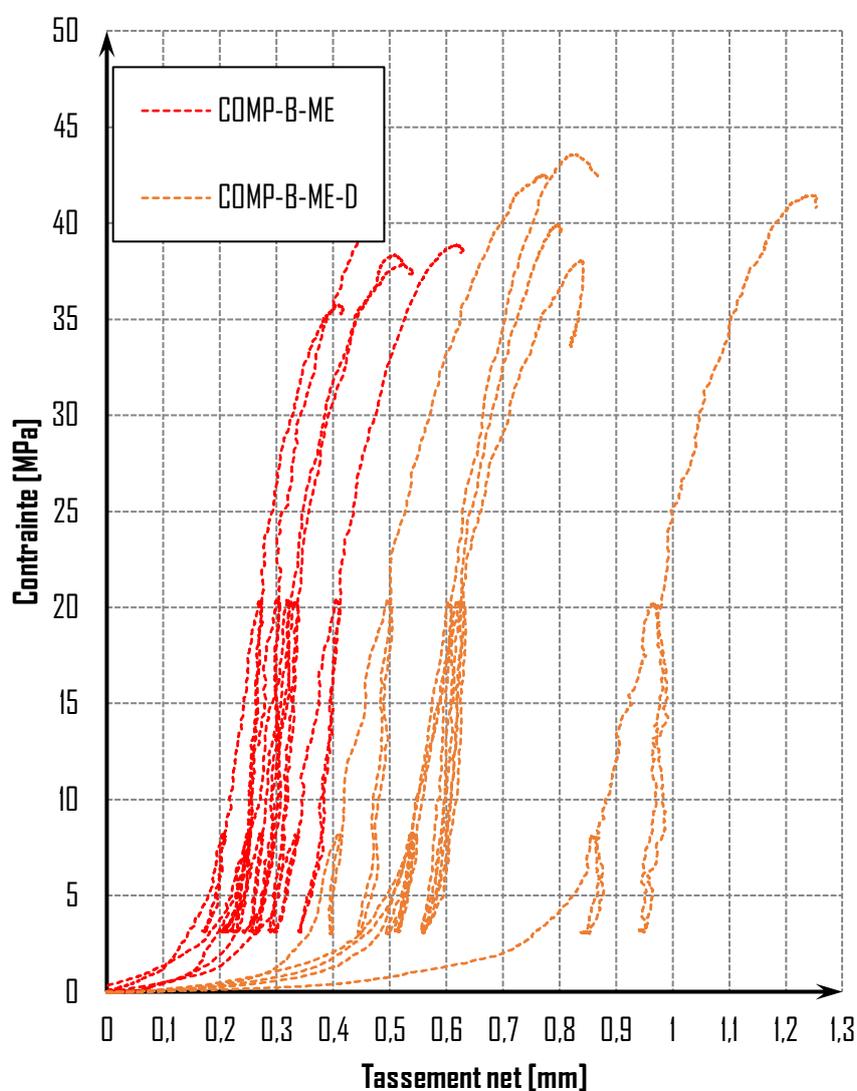


Figure 2-3 : Evolution de la contrainte en fonction du tassement net moyen de l'ensemble des éprouvettes Bois-Métal

Le Tableau 2-4 présente les modules de fondations $m_{el,1,4}$ pour les configurations Bois-Métal. Une perte de 23% est observé pour la configuration avec défaut montrant l'incidence du défaut sur le comportement de la surface de contact.

Tableau 2-4 : Comparaison des modules de fondations $m_{el,1,4}$ de contact des éprouvettes Bois-Métal

Echantillon	COMP-B-ME	COMP-B-ME-D
Moyenne	143.08	110.26
Minimum	164.91	138.67
Maximum	122.87	82.43
Ecart type	20.22	23.29
COV	14.13%	21.13%

3.- CONCLUSIONS

Cette campagne d'essais avait pour but de caractériser le comportement de la surface de contact en bout de poteau pour la transmission d'effort direct de poteau à poteau bois dans des constructions à plusieurs niveaux. Un protocole d'essai a été mis en place pour pouvoir appliquer une charge parfaitement axée sur des barres de 160 x 160 mm. Cette section avait été définie dans le but de limiter la capacité de résistance des pièces aux alentours de 100 tonnes. Afin de pouvoir appliquer l'effort jusqu'à la rupture et de pouvoir introduire un défaut de perpendicularité à l'interface, il a été choisi de réaliser ces tests dans une enceinte métallique capable de maintenir les pièces parfaitement alignées durant le chargement. Un soin très particulier a été apporté à la confection des éprouvettes pour réaliser ces essais afin que les pièces soient parfaitement ajustées. Les usinages ont été réalisés dans un cadre de production industriel.

En premier lieu, il a été vérifié dans une entreprise performante du domaine de la construction bois que le tolérancement maximum relevé dans le projet de norme d'exécution était atteignable. Un soin et un contrôle régulier de l'outil de production permet d'atteindre une réalisation quasi parfaite, c'est à dire limiter à quelques dixième de millimètre le défaut suivant la diagonale de la section. Ainsi, les éprouvettes utilisées durant les essais ont pu être produites avec le défaut maximum souhaité c'est-à-dire par programmation de la machine. Ceci veut aussi dire que si l'on souhaite produire sans défaut, un contrôle de production doit être mis en place.

Les essais de compression des surfaces de contact ont permis de caractériser l'interface par des modules de fondation et des jeux que l'ingénieur pourra retranscrire dans ses calculs afin d'intégrer ses souplesses dans l'estimation du tassement global des ouvrages. Il est à remarquer que le trait de scie d'un outil affûté conduit toujours à un jeu de mise en place au début du chargement. Le module de fondation, après l'élimination de ce jeu initial est plus important dans les contacts parfait bois sur bois que bois métal et bois mortier. Il est utile de préciser que pour les contacts bois/bois, les surfaces en contact étaient les pièces jumelles obtenues par le trait de scie. Afin de ne pas avoir de défaut de perpendicularité les pièces ont été placées en enceinte sans retournement autour de leur axe 2 mois après avoir été usinées. Dans la situation où les pièces de bois ne sont pas replacées en continuité, il apparaît un effet d'enchevêtrement au niveau de la surface tel qu'il avait été montré dans l'étude bibliographique. Il a été observé que cet enchevêtrement affaiblissait la résistance de la surface et provoquait la rupture de l'interface ce qui conduit curieusement à une rupture un peu plus ductile du poteau bois. Sans cet enchevêtrement, pour toutes les autres éprouvettes, la rupture se produit à des niveaux décalés dans la hauteur de l'éprouvette par flambement des lits de trachéides du fait du caractère variable du bois en module et résistance : rupture qui peut être qualifié de classique.

Ce travail terminé d'un point de vue expérimental, ne l'est cependant pas complètement d'un point de vue utilisation pratique pour l'ingénieur. En effet si l'effet du défaut de réalisation a été mis en évidence ainsi que le phénomène d'enchevêtrement en contact bois bois direct, il s'agit maintenant de quantifier son effet sur l'excentrement de la charge dans les poteaux afin d'évaluer les effets de la flexion qu'il va falloir considérer dans les calculs.

La caractérisation de cet excentrement doit être réalisée en fonction du niveau de chargement afin d'estimer les effets de flexion sur la rectitude des poteaux pour estimer la déformée initiale et son augmentation dans le temps. Ceci sera utile pour évaluer son caractère négligeable ou pas sur la stabilité. La valeur du moment au seuil ELU, après que les pièces aient fléchies, doit être aussi déterminé pour évaluer l'interaction flexion compression dans les poteaux. La détermination de l'excentricité sera fonction

- du seuil de chargement,
- de l'importance du défaut
- des dimensions du poteau (dimension section et hauteur)

Une approche par éléments finis 2,5 D (modèle hybride incluant éléments finis 2D et éléments finis 1D) non linéaire doit permettre par une programmation paramétrique de définir cette excentricité en calant celle-ci sur les résultats des essais obtenus. Il conviendra de travailler à idéaliser le phénomène d'enchevêtrement au préalable.

Fait à EPINAL le 17/02/2022

Jean-François BOCQUET

Maître de Conférences à l'**ENSTIB**

Enseignant chercheur du **LERMAB**



Damien LATHUILLIERE

Ingénieur de Recherche au **LERMAB**

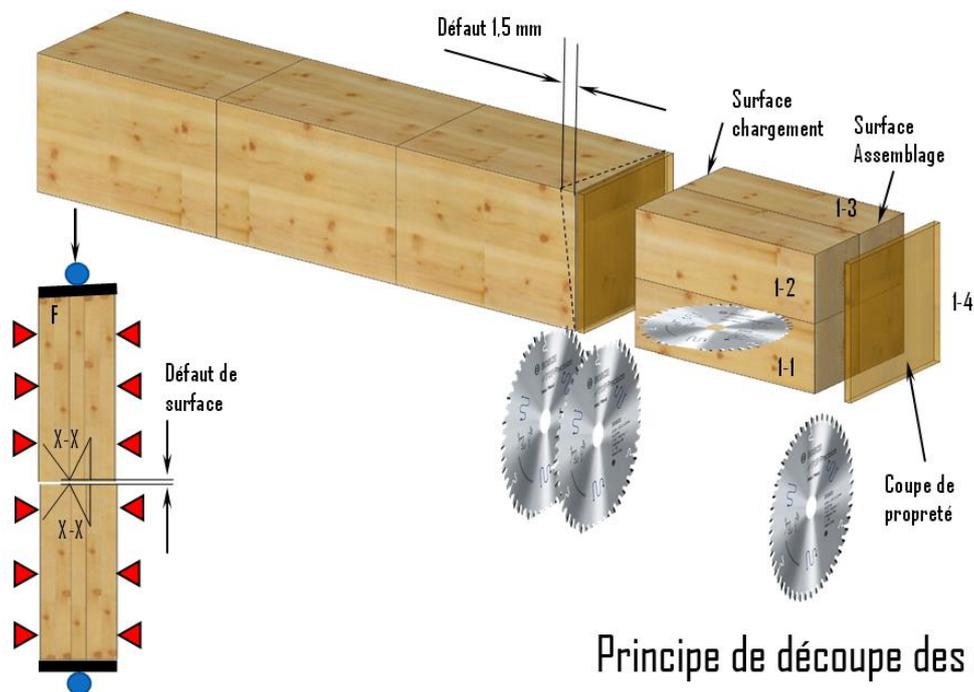
4.- BIBLIOGRAPHIE :

- [1] LERMAB, "PRO-1 - Protocole d'essais des assemblages par vis," Feb. 2021.
- [2] AFNOR, *NF EN 26891: Structure en bois Assemblages réalisés avec des éléments de fixation - Principes généraux pour la détermination des caractéristiques de résistance et de déformation.* 1991.
- [3] AFNOR, *NF EN 1990: ECD - Eurocode structureaux : Base de calcul des structures.* 2003.
- [4] LERMAB, "NOTE-1 - Note de calculs des assemblages par vis," Feb. 2021.
- [5] AFNOR, *NF EN 1995-1-1: EC 5 - Eurocode 5 - Calcul des structures en bois - Partie 1-1 - Règles générales et règles pour les bâtiments.* 2005.
- [6] R. Lemaître, "Développement d'un outil de calcul non linéaire de dimensionnement d'assemblages bois tridimensionnels soumis à des torseurs plans," Université de Lorraine, 2020.
- [7] R. Foschi, "Load-slip characteristics of nails," *Wood Science and Technology*, pp. 69-76, 1974.
- [8] R. M. Richard and B. J. Abbott, "Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 101, no. 4, pp. 511-515, 1975.
- [9] LERMAB, "BIBLIO-1 - Rapport bibliographique des assemblages par vis," Feb. 2021.

- ANNEXE A -- DECOUPE DES EPROUVETTES

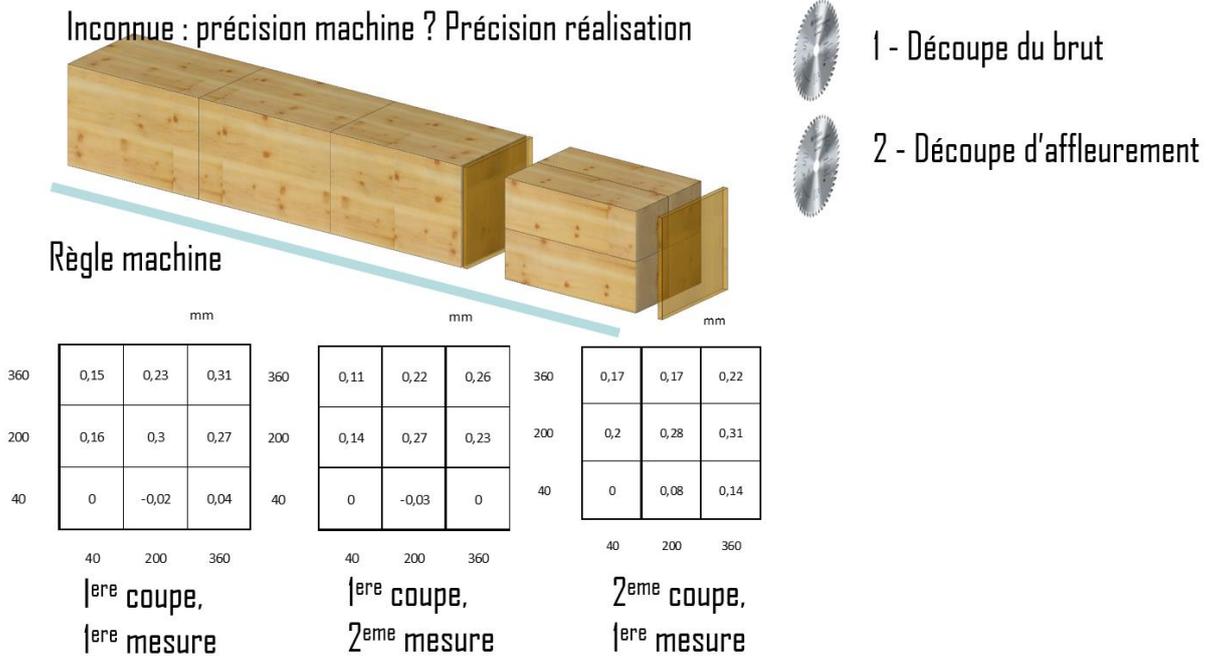
Les pièces de bois ayant servies aux essais ont été réalisées par la société SIMONIN. Une première série a été réalisée par découpe directe par trait de scie plongeant afin de produire des éprouvettes jumelles dans une barre de 200 mm x 200 mm. Ceci s'est passé sans problème. La deuxième série a été réalisée en débitant les éprouvettes dans une section recollée de 400 mm x 400 mm. Afin de produire des surfaces propres, il a été d'abord réalisé une coupe pour « blanchir la surface ». Des traits de scie ont tout d'abord été réalisées afin que lors du tranchage par niveau les chutes puissent tomber d'elles-mêmes sans gêner la scie. La coupe de finition s'est alors effectuée en une fois, en plongeant la lame de 2 millimètres dans la surface afin d'éviter que celle-ci ne pousse au vide.

Débit et repérage des barres de bois lamellé-collé section > 160 x 160 pour essais de contacts avec jeu dans poteau 400 x 400

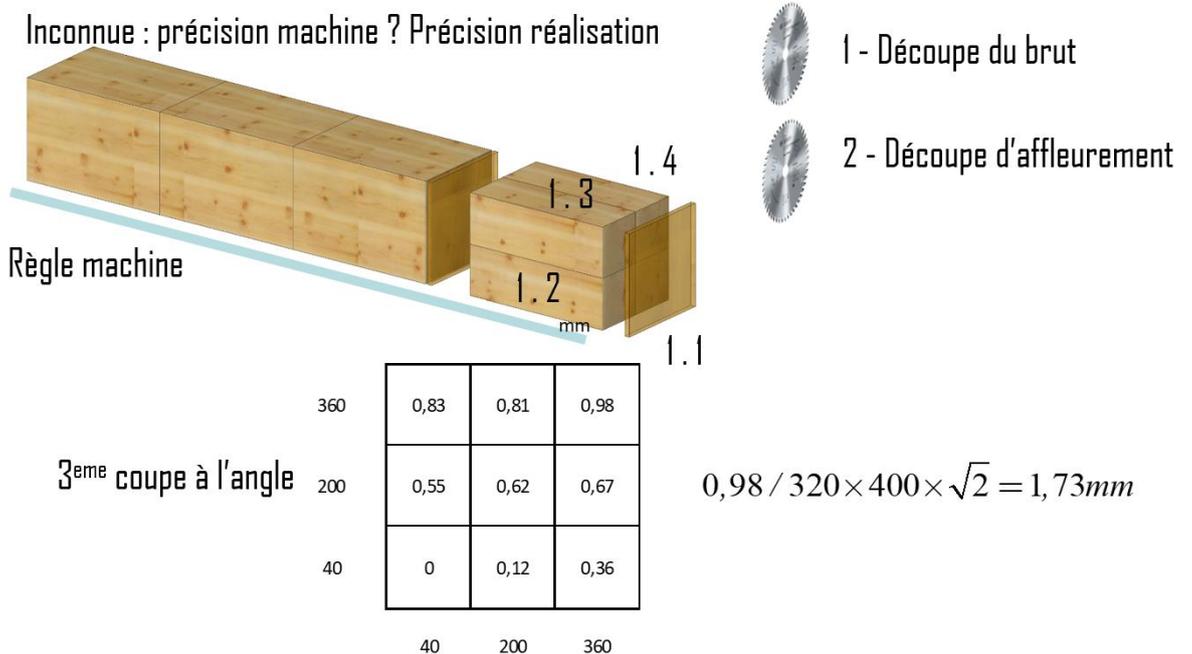


Principe de découpe des éprouvettes

Après cette première coupe, le défaut de la surface a été relevé à l'aide d'un comparateur, un défaut maximum de 31 centième a été mesuré. La mesure a été répétée une deuxième fois le défaut maximum s'est élevée à 26 centièmes. Le principe de découpe a alors été répété, le défaut maximum relevé s'est élevé à 31 centièmes.



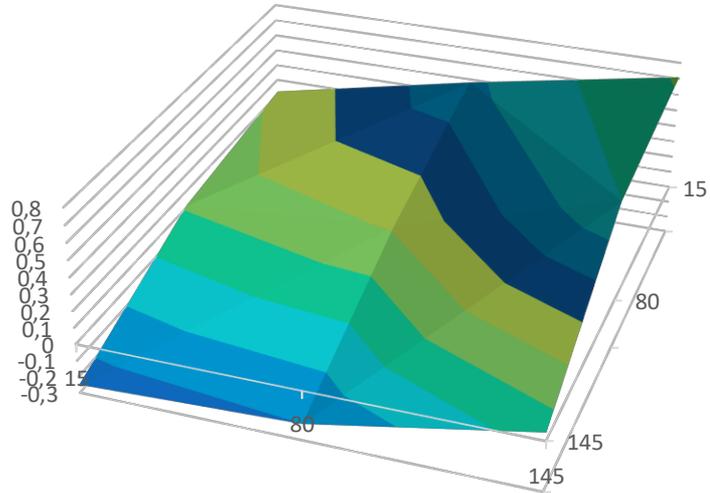
La lame a alors été inclinée, le protocole de découpe appliqué et le défaut max mesuré dans la diagonale. Celui-ci s'est élevé à 0,98 mm. L'interpolation du défaut selon la diagonale s'est alors élevée à 1,73 centièmes ce qui a été retenu comme tout à fait acceptable.



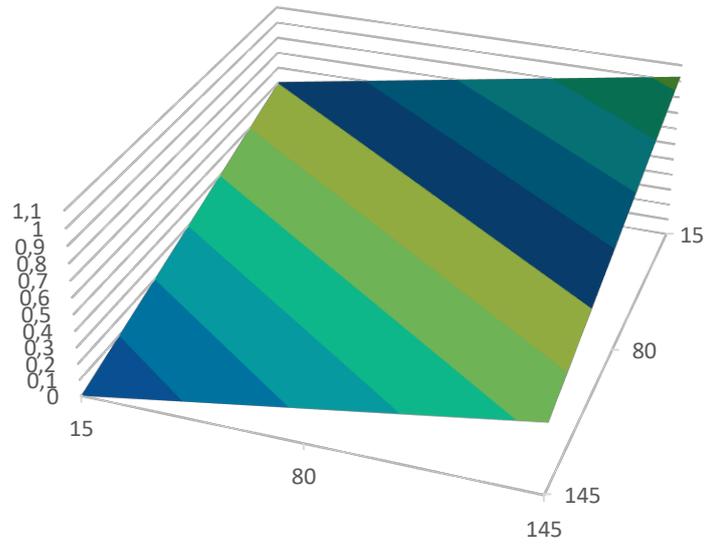
- ANNEXE B -- MESURES DES DEFAUTS

B.1. ELEMENT 1213

Plan brut 1213

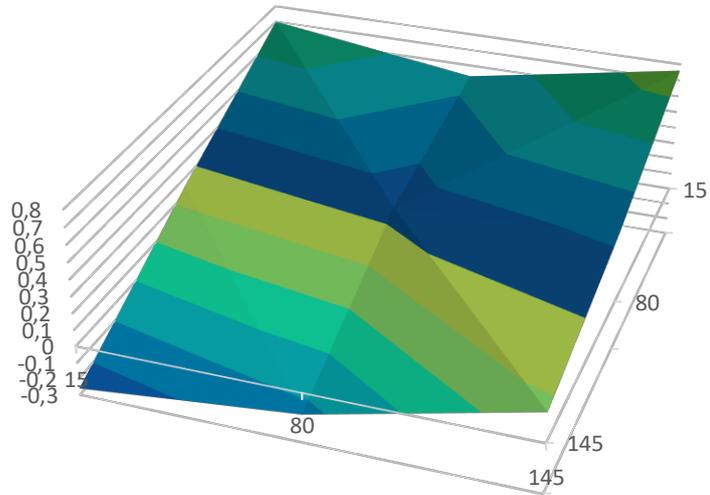


Plan corrigé 1213

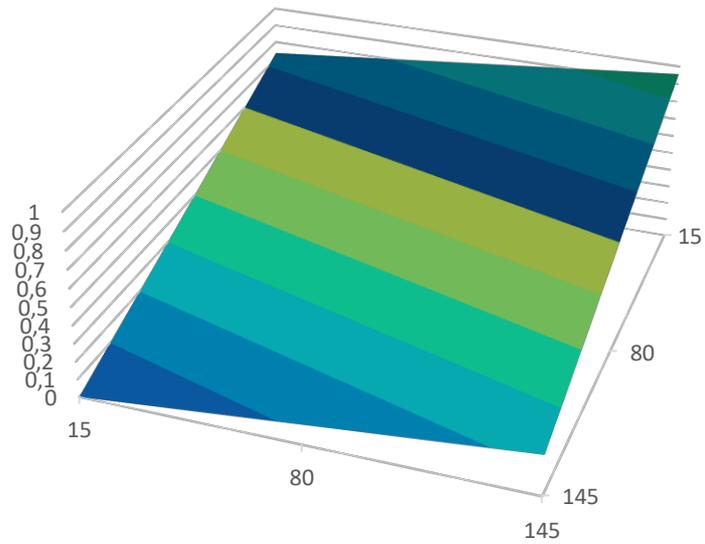


B.2. ELEMENT 4344

Plan brut 4344

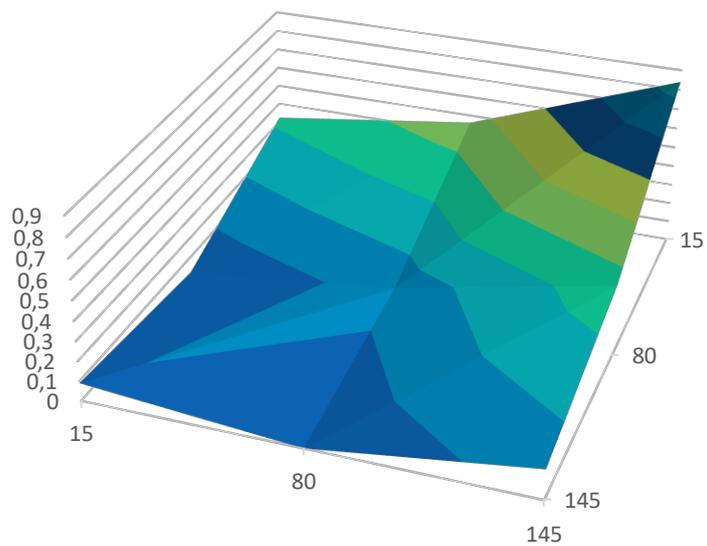


Plan corrigé 4344

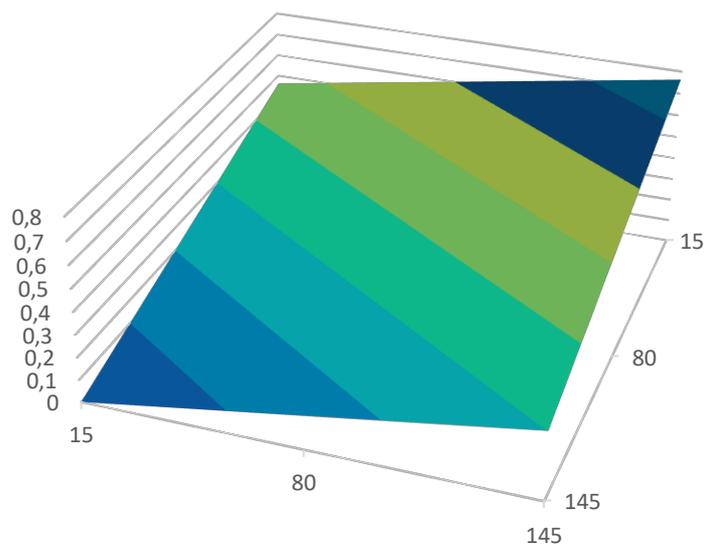


B.3. ELEMENT 1411

Plan brut 1411

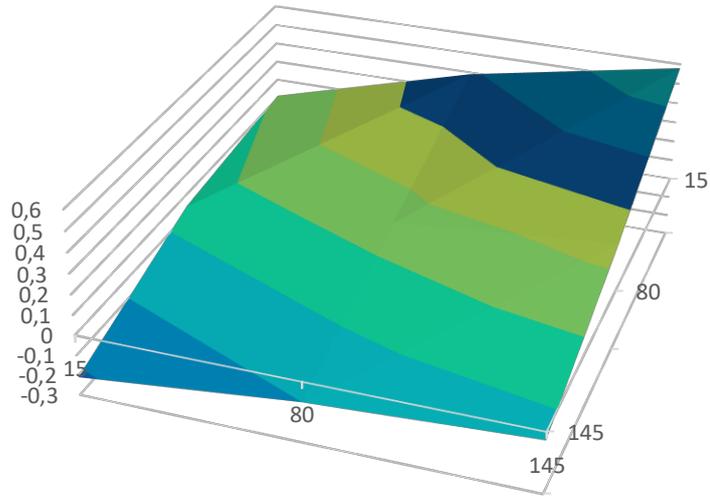


Plan corrigé 1411

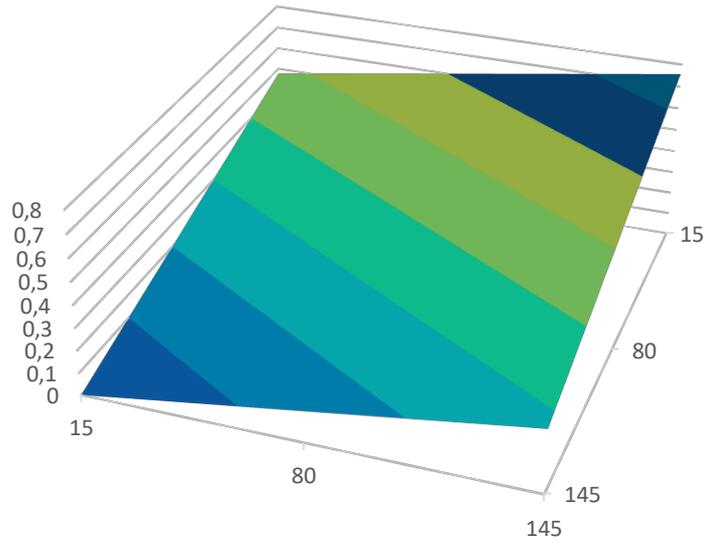


B.4. ELEMENT 2223

Plan brut 2223

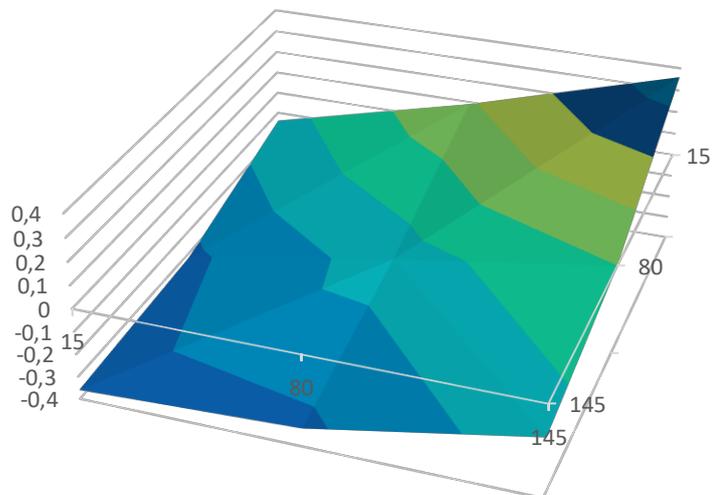


Plan corrigé 2223

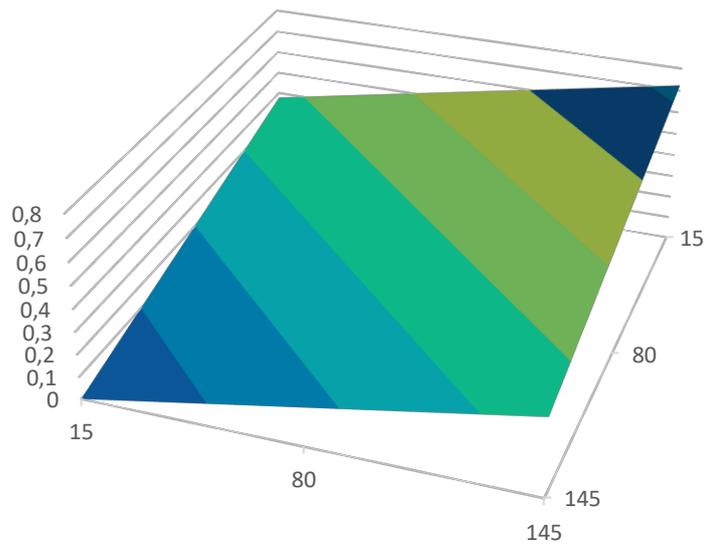


B.5. ELEMENT 3132

Plan brut 3132

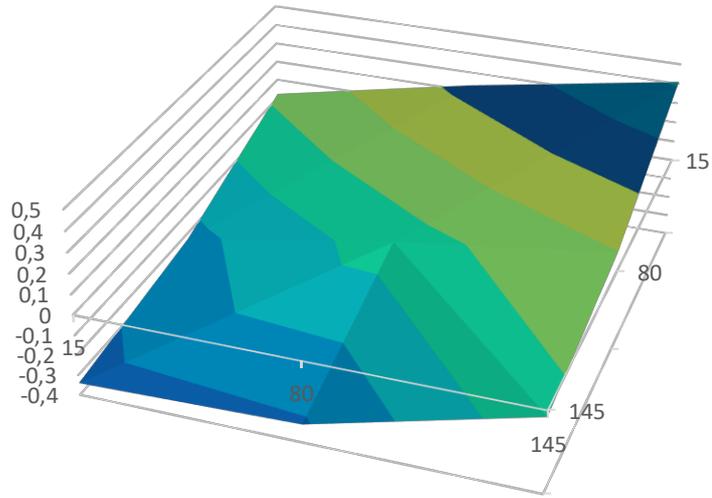


Plan corrigé 3132

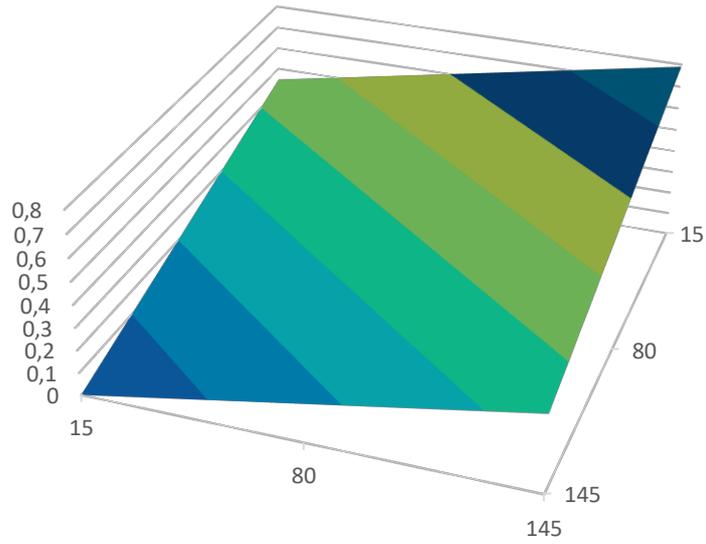


B.6. ELEMENT 3233

Plan brut 3233

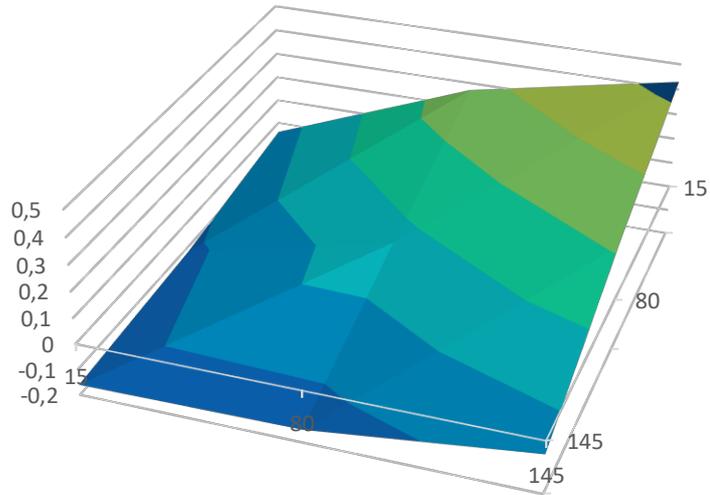


Plan corrigé 3233

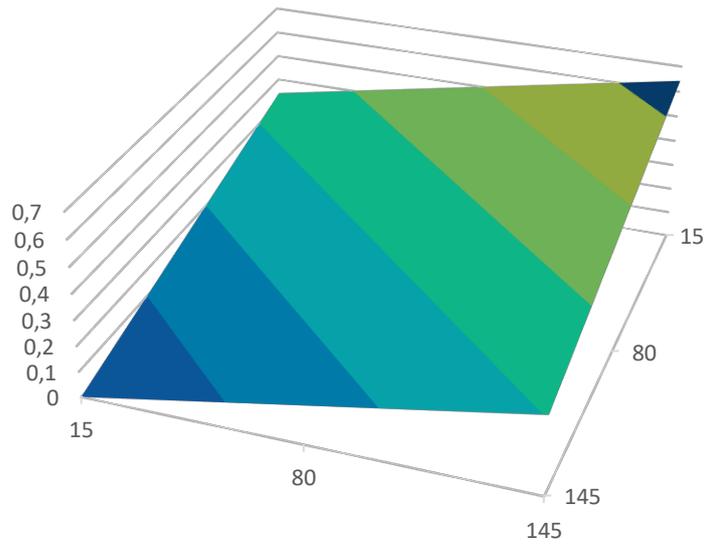


B.7. ELEMENT 4441

Plan brut 4441

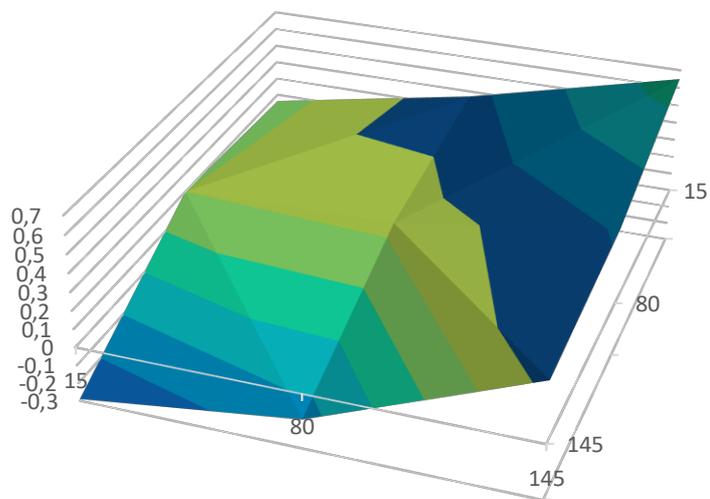


Plan corrigé 4441

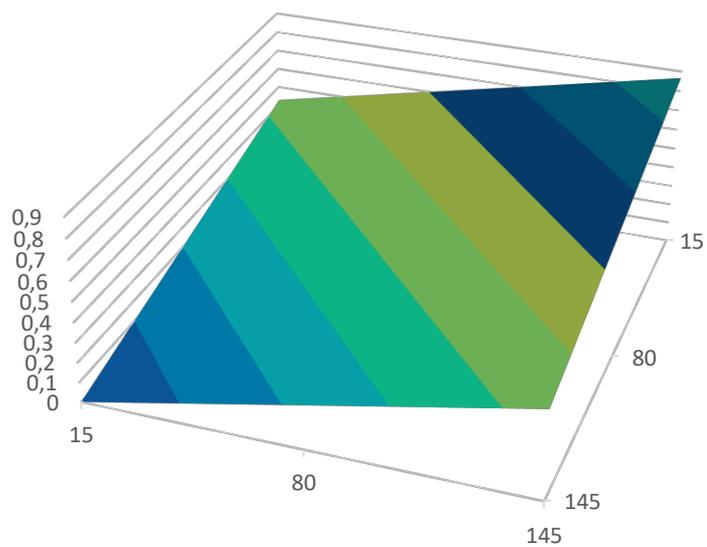


B.8. ELEMENT 2324

Plan brut 2324

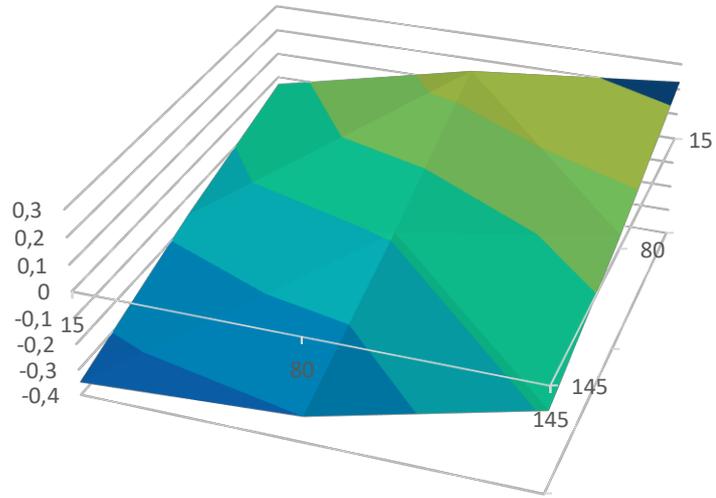


Plan corrigé 2324

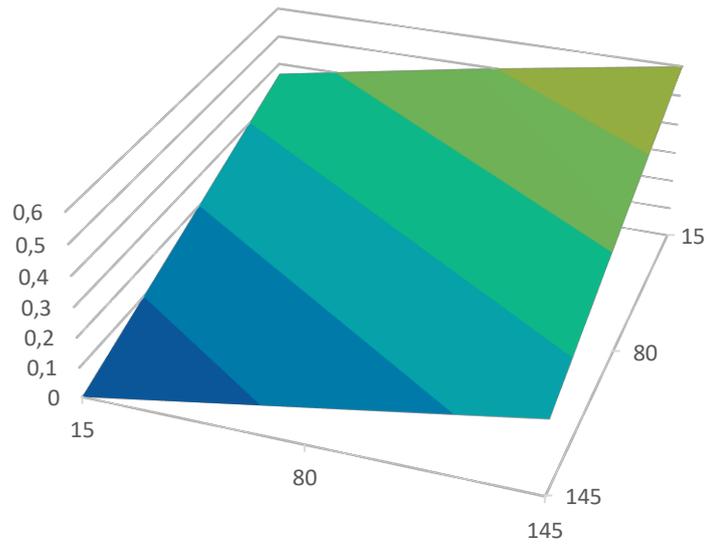


B.9. ELEMENT 3334

Plan brut 3334

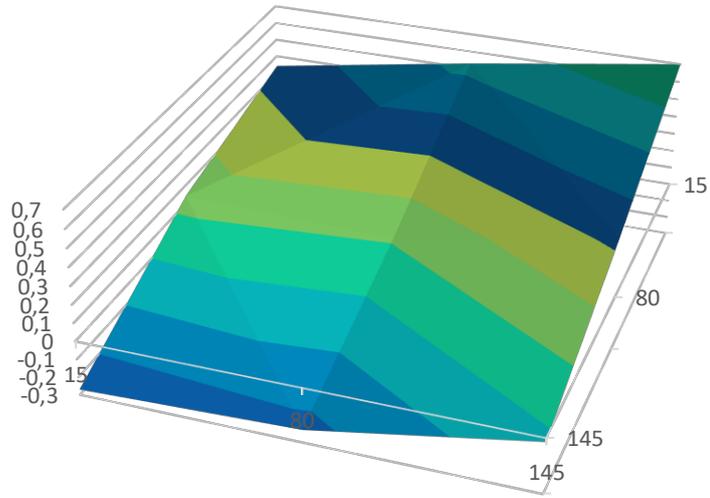


Plan corrigé 3334

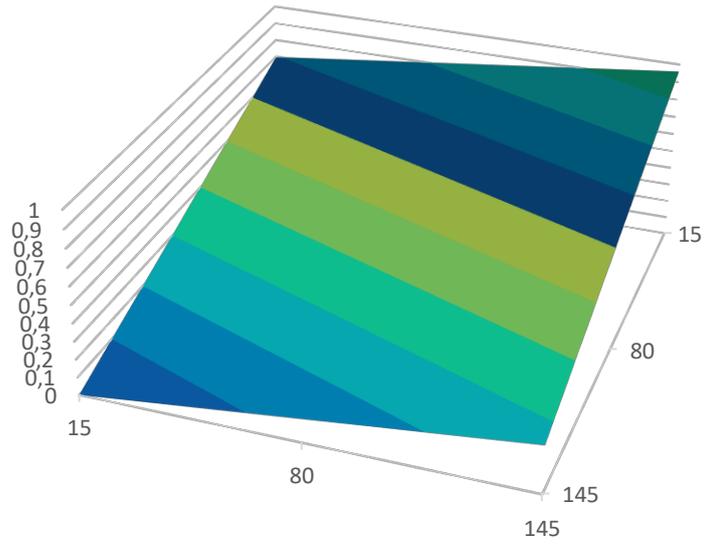


B.10.ELEMENT 2122

Plan brut 2122



Plan corrigé 2122





A D I V B O I S
www.ativbois.org