

ForestValue

hardwood_joint

WP3 – Tâche 4

Essais d'arrachement

Élise BALBO



Contexte

Ce travail s'inscrit dans un projet européen ForestValue : le projet hardwood_joint – innovative joints in hardwoods. Ce projet réunit plusieurs équipes de recherche : l'équipe Timber Structures and Building Construction de l'Institut de technologie de Karlsruhe (Allemagne) qui est le coordinateur du projet, le Department of Building Technology de l'Université de Linnaeus (Suède), l'Institute of Timber Engineering and Wood Technology de l'Université de technologie de Graz (Autriche) et le Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le MATériau Bois (LERMAB) de l'Université de Lorraine (France). La finalité du projet est de favoriser la construction de structures à haute performance en bois de feuillus dans le secteur européen du bâtiment en développant des technologies d'assemblages communes, économiques, fiables et innovantes. Afin d'atteindre cet objectif des études mécaniques et thermiques sont menées sur trois essences de bois de feuillus : le chêne, le hêtre et le bouleau, ainsi que sur du LVL de hêtre. Ce document présente une partie de la participation française à ce projet et concerne l'étude à l'arrachement des vis utilisées pour les assemblages rainurés.

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), l'organisme France Bois Forêt (FBF) et le Comité Professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois (CODIFAB) participent au financement de la partie française du projet hardwood_joint. De même, deux industriels français accompagnent ce projet, la société SIMONIN et la société Würth France.

Sommaire

1	Introduction	7
2	Matériaux et méthode.....	9
2.1	Vis utilisées.....	9
2.2	Essences de bois utilisées.....	10
3	Protocole des essais d'arrachement simple	13
3.1	Eprouvettes : dimensionnement et fabrication	13
3.2	Chaîne d'acquisition des essais	16
3.3	Dispositif de montage.....	16
3.4	Mode opératoire.....	17
3.5	Caractérisation.....	20
4	Protocole des essais d'arrachement double	23
4.1	Eprouvettes : dimensionnement et fabrication	23
4.2	Chaîne d'acquisition des essais	25
4.3	Mode opératoire.....	26
4.4	Caractérisation.....	27
5	Résultats essais arrachement simple	31
5.1	Détermination de la résistance à l'arrachement du filet dans le bois	31
5.2	Résultats : résistance à l'arrachement de la vis ASSY 3.0Ø5,0*80/72 (Würth)	35
6	Résultats arrachement double.....	47
6.1	Détermination de la résistance à l'arrachement en fonction des distances aux bords.....	47
6.2	Résultats : résistance à l'arrachement des vis en configuration 1	48
6.3	Résultats : résistance à l'arrachement des vis en configuration 2.....	59
7	Synthèse.....	72
8	Bibliographie	75

Annexe A	Résultats essais d'arrachement simple	77
Annexe B	Résultats essais arrachement double	83

1 Introduction

Selon l'IGN¹, en 2018, la forêt française métropolitaine est représentée par des peuplements à deux tiers de type feuillus (soit, 9,9 millions d'hectares) pour un tiers de résineux [1]. Le secteur de la construction bois, principal consommateur du bois de résineux, est de plus en plus sollicité pour s'intégrer dans une démarche de développement durable à travers l'usage de matériaux locaux et de matières peu nocives pour l'environnement. Le développement de produit d'ingénierie est primordial pour rester compétitif.

Le projet hardwood_joint a pour objectif de valoriser l'usage du feuillu en France comme dans toute l'Europe, notamment à travers les assemblages rainurés. Les études menées par le LERMAB portent sur trois essences : le hêtre, le chêne et le bouleau, ainsi que sur un produit industriel, le LVL à plis croisés de hêtre.

Une description détaillée de l'assemblage dit rainuré est effectuée au sein du rapport WP4-T4.1-RT-2021. Néanmoins il est nécessaire de rappeler ici que cet assemblage est un assemblage bois-bois, dont les surfaces de contact entre les éléments bois sont rainurées. Le maintien du contact entre les éléments est réalisé à l'aide de vis. Ainsi, ce rapport présente l'étude du comportement mécanique des vis utilisées pour l'assemblage rainuré étudié dans le cadre du projet hardwood_joint.

Pour l'étude mécanique des assemblages (voir rapport WP3-T3.4-RT_Assemblages-2022) il est d'abord nécessaire de caractériser l'arrachement des vis pour chaque essence de bois étudiées. À cette fin des essais d'arrachement seront effectués avec une vis, ces essais sont appelés dans la suite du document essais d'arrachement simple. Ensuite, lors de l'assemblage d'au moins trois éléments bois, des vis sont positionnées côte à côte (voir (a) Figure 1-1) et des essais d'arrachement seront effectués pour étudier l'influence de la proximité des vis, ces essais seront appelés dans la suite de ce document essais d'arrachement double. Les essais d'arrachement double concernent aussi des essais d'arrachement afin d'étudier l'influence du positionnement des vis par rapport au bords des éléments bois (voir (b) Figure 1-1).

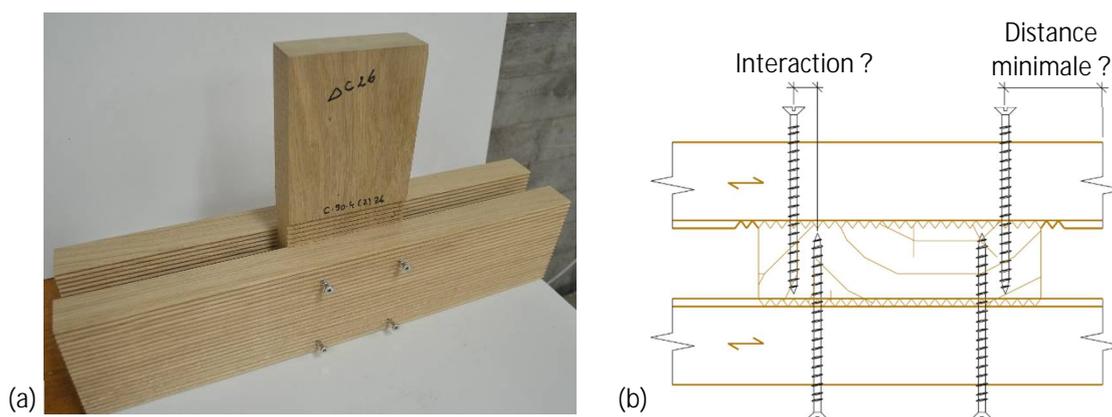


Figure 1-1 Assemblage rainuré avec 4 vis par plan de cisaillement : (a) photo, (b) coupe horizontale avec positionnement des vis.

La première partie de ce rapport présente le principe général des essais ainsi que les matériaux étudiés. Les deux parties suivantes sont consacrées à la description des différents protocoles d'essais, arrachement simple puis arrachement double. Ensuite deux parties présentent les résultats pour chaque type d'essais. Enfin la dernière partie fait la synthèse des résultats.

¹ IGN : Institut National de l'Information Géographique et Forestière

2 Matériaux et méthode

Dans le cadre du projet Forest Value, des essais de résistance d'assemblages par rainures-vis sont menés. Des études antérieures conduites au LERMAB ont montré que les vis travaillent principalement en arrachement et jouent ainsi un rôle majeur de maintien des rainures en contact. La caractérisation de la résistance à l'arrachement de ces vis est une nécessité pour maîtriser correctement la résistance de l'assemblage.

Les assemblages sont composés de lames de bois maintenues par des vis. La conception de ces assemblages est telle que les vis sont toujours perpendiculaires au fil du bois. Les essais d'arrachement concernent donc une sollicitation à un angle α de 90° par rapport au sens du fil (voir Figure 2-1). Les autres caractéristiques géométriques de l'éprouvette et la force à rupture nécessaire F_{ax} sont déterminées pour chaque type d'essais dans les parties suivantes.

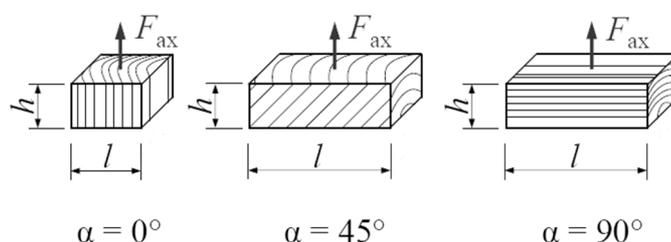


Figure 2-1 Orientation de l'organe soumis à l'essai d'arrachement en fonction de l'angle du fil du bois

2.1 Vis utilisées

La Figure 2-2 donne la définition des grandeurs spécifiques des vis ASSY 3.0 à pointe autoforeuse $\varnothing 5,0 \times 80/72$ de Würth utilisées pour les assemblages rainurés.

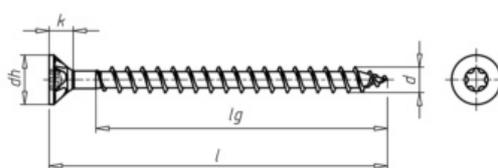


Figure 2-2 Définition des grandeurs spécifiques de la vis ASSY 3.0 $\varnothing 5,0 \times 80/72$, Würth

Les caractéristiques géométriques, issues du catalogue du fournisseur Würth, de la vis utilisée pour l'ensemble des essais sont présentées dans le Tableau 2-1. Les caractéristiques mécaniques issues de l'Avis Technique Européen ATE-11/0190 [1] sont présentées dans le Tableau 2-2.

Tableau 2-1 Caractéristiques géométriques des vis

		UNITE	5,0X80/72
LONGUEUR	l	mm	80
LONGUEUR DE FILETAGE	l_g	mm	72
DIAMETRE NOMINAL	d	mm	5,0
DIAMETRE DE LA TETE	d_h	mm	9,6
HAUTEUR DE LA TETE	k	mm	3,2
DIAMETRE DU NOYAU	d_i	mm	3,2

Tableau 2-2 Caractéristiques mécaniques des vis

		UNITE	5,0X80/72
VALEUR CARACTERISTIQUE DU MOMENT PLASTIQUE*	$M_{y,k}$	N.m	5,9
VALEUR CARACTERISTIQUE DE LA RESISTANCE EN TRACTION*	$f_{tens,k}$	kN	7,9
VALEUR CARACTERISTIQUE DU COUPLE DE RUPTURE*	$f_{tor,k}$	N.m	6,0
VALEUR CARACTERISTIQUE DE LA RESISTANCE EN TRACTION	f_u	MPa	≈ 950

* Valeurs issues du Tableau 1.1 de l'Annexe 1 de l'avis technique européen ETA-11/0190 [2]

2.2 Essences de bois utilisées

Les bois étudiés dans le projet `hardwood_joint` sont le hêtre, le chêne, le bouleau, et le LVL de hêtre à plis croisés de Pollmeier. Les lots de bois bruts sont composés de planches de 4 m de long pour une section de 50x150 mm. Le LVL quant à lui est disponible en panneaux de 42 mm d'épaisseur.



Figure 2-3 : Vue macroscopique (de gauche à droite) du hêtre, du chêne, du bouleau, du LVL à plis croisés

Le hêtre et le chêne ont été étudiés dans le cadre de différents projets au LERMAB, notamment dans le projet d'EFFEUR 5 [3]. Des données préexistantes fournies par le CIRAD sont disponibles par le biais des fiches TROPIX *Hêtre* [4] et *Chêne* [5].

Le LVL étant un produit issu de l'ingénierie, il est soumis à une déclaration de performance de son fournisseur [6]. Ses principales caractéristiques mécaniques sont répertoriées dans le Tableau 2-3. Le LVL à plis croisés est composé d'une succession de couches issues du déroulage du bois, dont le sens des plis varie. Par exemple, pour une épaisseur de 42 mm, la géométrie des plis est telle que : III-IIIIII-III avec une épaisseur par pli de 3 mm.

La masse volumique et la résistance au cisaillement connues de ces essences sont répertoriées dans le Tableau 2-3.

Tableau 2-3 Caractéristiques des bois utilisés dans le projet Forest Value

		UNITE	CHENE	BOULEAU	HETRE	LVL-Q
Masse volumique caractéristique	ρ_k	kg/m^3		547	625	730
Masse volumique moyenne	ρ_{mean}	kg/m^3	740	615	710	800
Cisaillement longitudinal	$f_{v,k}$	N/mm^2	4,5 (6,6)*	12	4,2	7,8
Cisaillement roulant moyen	$f_{r,mean}$	N/mm^2	3,31	3,45	8,3	
Cisaillement à un angle α	$f_{v,\alpha}$	N/mm^2	-	-	-	
Module d'élasticité moyen en flexion axiale	$E_{0,mean}$	N/mm^2	14 000	17 300	9 860	13 200

* $f_{v,min}$ defined by Wagenführ R. (2007), "HolzAtlas", 6., neu bearb. u. erw. Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2007- ISBN 978-3-446-40649-0

3 Protocole des essais d'arrachement simple

3.1 Eprouvettes : dimensionnement et fabrication

Les essais de résistance à l'arrachement seront réalisés dans du bois massif de bois durs et dans du LVL de hêtre. La norme NF EN 1382 [6] donne les dimensions minimales réglementaires pour réaliser les éprouvettes, pour des organes de fixations de type pointe et vis.

Les grandeurs spécifiques d'une éprouvette pour une pointe perpendiculaire aux fibres du bois sont représentées en Figure 3-1. Des contraintes de distances aux rives et de profondeur minimale d'enfoncement influencent ces grandeurs spécifiques. En effet, la longueur de l'éprouvette doit permettre un positionnement de la pointe à au moins $10d$ des bords. De la même manière, la largeur de l'éprouvette doit permettre un positionnement de la pointe à au moins $5d$ des bords. L'épaisseur quant à elle doit être suffisante pour permettre un enfoncement de la pointe sur une profondeur de $8d$.

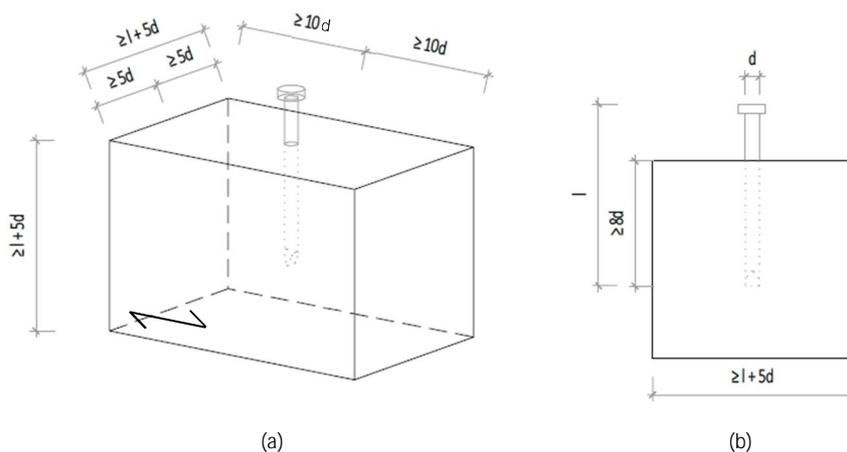


Figure 3-1 Grandeur spécifique de l'éprouvette (a), de l'enfoncement de la vis (b)

La tête de la vis n'étant pas prise en compte dans l'étude de l'assemblage, la longueur de la partie filetée est considérée comme la longueur totale de la vis, à laquelle la longueur de la pointe de la vis $L_{\text{pointe}} = 4 \text{ mm}$ est soustraite, soit $L = 68 \text{ mm}$. Les caractéristiques géométriques des éprouvettes sont répertoriées dans le Tableau 3-1, pour la vis étudiée.

Dans le cadre normatif, la hauteur minimale des éprouvettes pour la vis $\text{Ø}5,0 \times 80/72$ est de 93 mm . Cependant, le projet `hardwood_joint` est alimenté en planches de sections brutes de $50 \times 150 \text{ mm}$. Afin de caractériser la résistance à l'arrachement dans des éprouvettes issues des lots de bois du projet, il est nécessaire de réaliser les essais dans un cadre hors normatif puisque les planches n'ont pas suffisamment d'épaisseur pour réaliser les éprouvettes aux dimensions normées. De plus, le montage d'essai impose des dimensions facilitant la mise en place et le maintien de l'éprouvette. Les nouvelles dimensions de l'éprouvette sont disponibles dans le Tableau 3-1, colonne « *Dimensions retenues* », avec une hauteur imposée à 37 mm .

Tableau 3-1 : Caractéristiques géométriques d'une éprouvette pour des vis de type ASSY 3.0 Ø5,0X80/72

		UNITE	DIMENSIONS MINIMALES EN CADRE NORMATIF	DIMENSIONS RETENUES
HAUTEUR	$\geq l + 5d \geq 8d$	mm	93	37*
LARGEUR	$\geq l + 5d \geq 5d \times 2$	mm	93	100
LONGUEUR	$\geq 10d \times 2$	mm	100	200
LONGUEUR D'ENFONCEMENT	$\geq 8d$	mm	40	25

*H = 37 mm avec rainures, soit 30 mm hors rainures

3.1.1 Rainurage et débit

Les assemblages rainurés sont composés d'autant de zone de contact qu'il y a de lame. Chaque zone de contact est réalisée par l'emboîtement de deux surfaces rainurées. Ainsi, la première lame sera traversée par la vis dans un « creux » de rainure, et la seconde lame est traversée par la même vis dans une « pointe » de rainure (Figure 3-2). Cette alternance permettrait de négliger l'influence de la rainure lors des essais d'arrachement et d'avoir une géométrie d'éprouvette de type « option 1 » (voir Tableau 3-2).

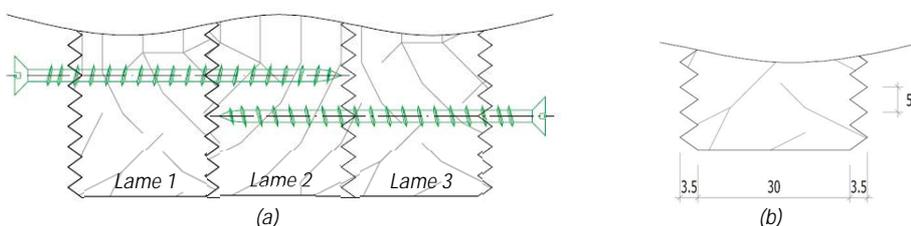


Figure 3-2 Logique d'assemblage (a) et dimension des rainures (b)

Cependant, les essais d'arrachement ont comme premier objectif de caractériser la résistance à l'arrachement des vis selon les essences et comme second objectif de déterminer les pinces et distances au bord optimales en conservant la logique de l'assemblage. Ainsi, la prise en compte du risque de fendage est nécessaire. Ce risque de fendage étant dépendant de la perte de matière liée aux rainures, pour être au plus proche de la réalité, les éprouvettes se doivent d'être rainurées dessus et dessous. Le type d'usinage « option 3 » est donc la mise en situation la plus défavorable, et donc celle étudiée (voir Tableau 3-2) pour l'intégralité des essais d'arrachement.

Tableau 3-2 Prise en compte du risque de fendage en fonction de l'usinage

	OPTION 1	OPTION 2	OPTION 3
TYPE D'USINAGE			
DIMENSIONS TOTALES (H*LARG*LONG)	37*100*200	37*100*200	37*100*200
DIMENSIONS HORS RAINURES (H*LARG*LONG)	37*100*200	33,5*100*200	30*100*200
PRISE EN COMPTE DU RISQUE DE FENDAGE	Faible	Modérée	Elevée

Les rainures sont réalisées sur une des machines corroyeuses, dites « 4 faces » disponibles sur le parc machine du Campus bois.

Le débit des éprouvettes s'effectue tout usinage fait, sur la scie à format, disponible sur le parc machine du Campus bois.

Le nombre d'essais d'arrachement simple par essence est fixée à 20. Il est donc nécessaire d'avoir 20 éprouvettes pour chaque essence. Cependant par soucis de « sécurité » un minimum de 5 éprouvettes supplémentaires est réalisé afin de s'affranchir de tout défaut dans le matériau, d'une mauvaise conception d'éprouvette ou d'une erreur technique lors de l'essai venant réduire le nombre d'essais exploitables. La quantité d'éprouvettes à réaliser est résumée dans le Tableau 3-3.

Tableau 3-3 Quantité d'éprouvette usinée par essence pour les essais d'arrachement simple

	HETRE	CHENE	BOULEAU	LVL
QTT D'ESSAI	20	20	20	20
QTT D'ÉPROUVETTES	25	25	25	40*

*Le surplus d'éprouvette en LVL servira à réaliser des pré-test

3.1.2 Mise en place de la vis

La qualité des résultats dépend d'un enfoncement de la vis à une profondeur et à un positionnement régulier d'une éprouvette à l'autre. Pour faciliter cette étape, un gabarit est réalisé (voir Figure 3-3). Il comprend une fente toute hauteur pour accueillir la vis, une fente en partie supérieure laissant passer la rondelle, et des rainures en partie basse pour se positionner automatiquement au centre de l'éprouvette.

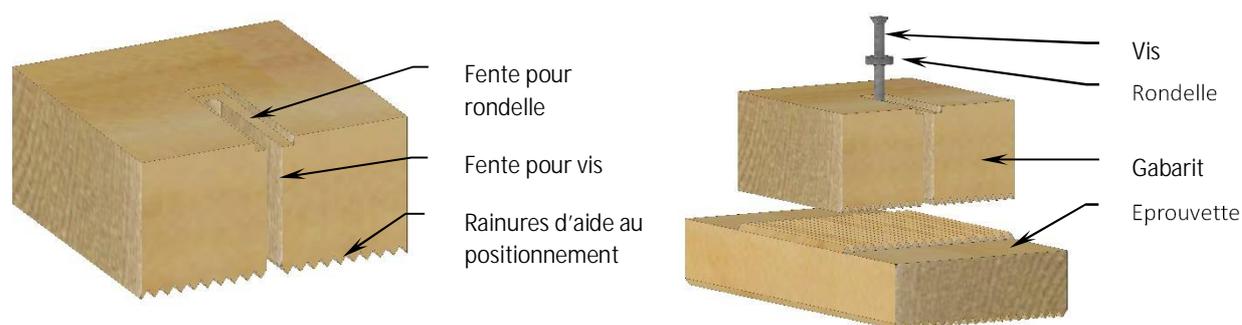


Figure 3-3 : Gabarit de mise en place de la vis

Le montage d'essai d'arrachement étant composée d'une plaque fendue venant accueillir la tête de la vis (Figure 3-4), un matage de cette dernière est possible dès lors qu'elle est sollicitée en traction (Figure 3-4b). Afin de ne pas considérer la résistance à l'arrachement de la tête de la vis, une rondelle cuvette pleine est placée sous la tête (Figure 3-4c) et empêche le matage de la tête.

Les rondelles cuvettes adaptées aux dimensions de la vis Ø5,0X80/72 de chez Würth sont les rondelles de référence A2 NFE27-619 M5 également de chez Würth. Elles présentent un diamètre intérieur de 5,5 mm, extérieur de 10 mm, pour un diamètre de fraisage de 10 mm.

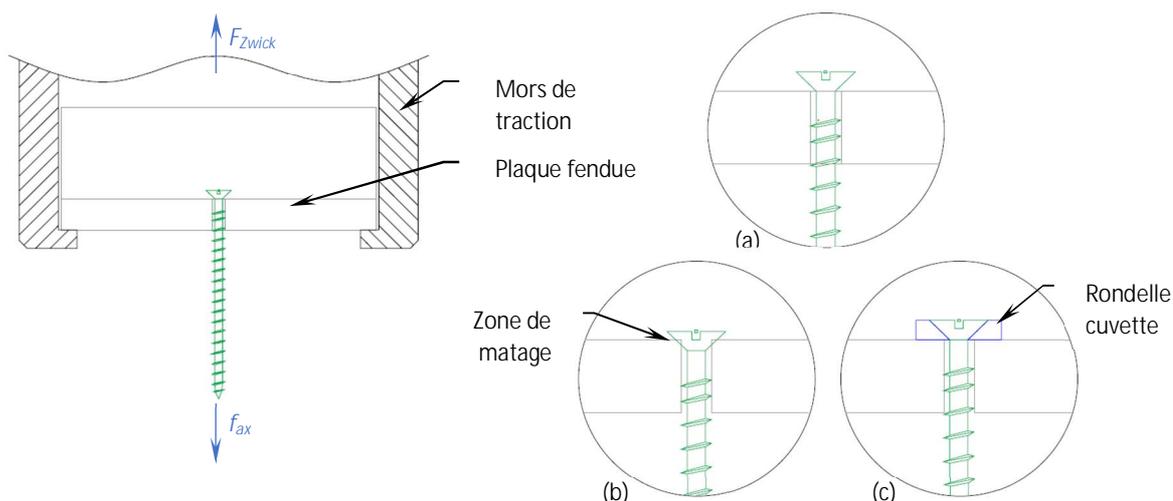


Figure 3-4 : Influence de la rondelle sur le matage de la tête de la vis : vis avant essai de traction (a), après essai sans rondelle (b), après essai avec rondelle (c)

3.2 Chaîne d'acquisition des essais

Les essais de la campagne s'effectuent sur une Machine Universelle d'Essais de type ZWICK Z250². L'effort dans la traverse peut aller jusqu'à 250 kN, pour une précision de l'ordre de $\pm 0,01$ kN. La vitesse d'avance de la traverse est imposée proportionnellement à la force à rupture nécessaire en fonction de l'essence. Le déplacement de la traverse ainsi que les efforts repris par la traverse sont enregistrés par la centrale d'acquisition de la MEUZ. Cette dernière convertit les signaux analogiques en données numériques et les envoie ensuite vers le PC MEUZ. Ces données servent au dépouillement statistique et à l'analyse des essais d'arrachement.

3.3 Dispositif de montage

La campagne d'essai est réalisée sur la MEUZ (voir Figure 3-5a). Le montage d'essai est spécialement conçu pour s'adapter sur la table de la MEUZ. Il se compose de deux parties : une partie inférieure maintenant la pièce de bois sur la table, une seconde en partie haute tirant sur la vis jusqu'à arrachement.

La première partie se compose d'un système de maintien comportant des plats métalliques de type cornières 5x50x50 (S235) (voir Figure 3-5b). Deux premières cornières viennent maintenir l'éprouvette de part et d'autre dans la largeur. Deux autres cornières viennent garantir le non-soulèvement des deux premières, même infime, dans la longueur. Ces quatre cornières sont maintenues en position par quatre boulons M16, eux-mêmes boulonnés à la table de la MEUZ.

Comme imposé par la norme EN 1382 [6], l'espacement entre les plaques est tel qu'un minimum de $6d$ entre chaque pièce de maintien soit respecté (voir Figure 3-5c), et tel que le mors de traction puisse avoir accès la tête de la vis.

Le mors de traction (voir Figure 3-5b), formant la seconde partie du montage d'essai, dispose d'une plaque amovible de 12 mm d'épaisseur, percée d'une gorge permettant le passage puis le maintien de la vis.

L'intégralité du montage est dimensionné selon les normes de calcul d'assemblages métalliques NF EN 1993-1-8 [7], et selon les exigences des écrous hexagonaux conformément à NF EN ISO 4032 [8].

² Abrégée « MEUZ » dans le reste du document

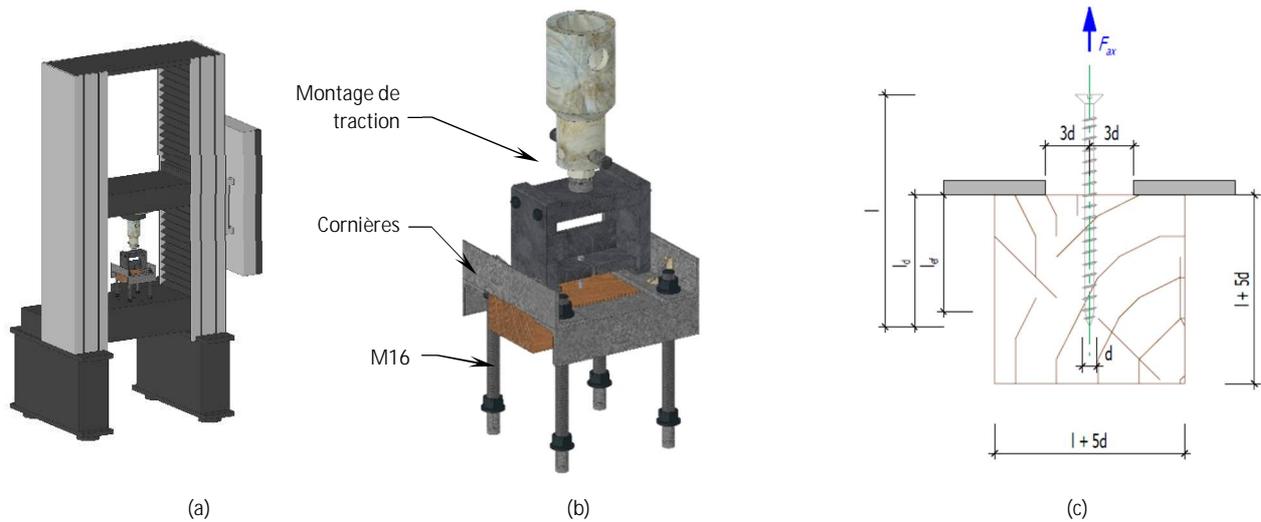


Figure 3-5 : Montage d'essai (a) (b) et schéma de principe et grandeur spécifique de l'essai à l'arrachement (c)

3.4 Mode opératoire

Afin d'avoir un nombre représentatif de résultats, 20 essais par type de vis et par essence sont réalisés, soit un total de 80. La répétabilité de réalisation des éprouvettes et du déroulement des essais sont nécessaires pour comparer des résultats traduisant le même phénomène.

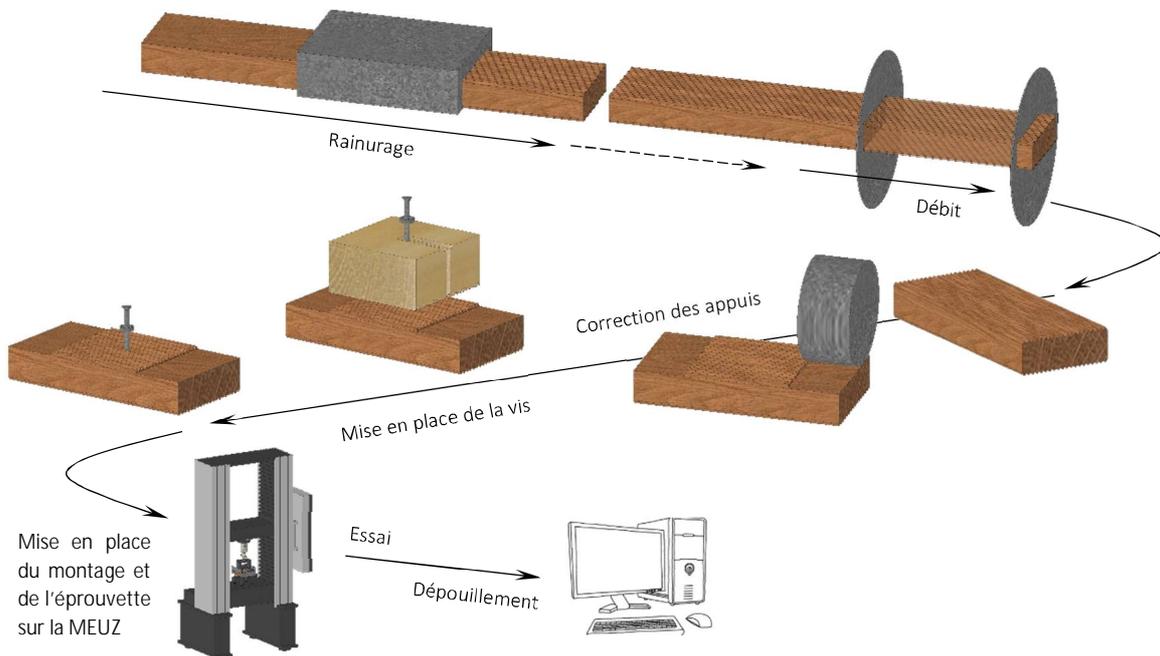


Figure 3-6 : Schématisation du mode opératoire d'un essai d'arrachement

3.4.1 Réalisation de l'éprouvette

Correction des surfaces d'appuis

Une fois les planches rainurées et débitées en tronçons de 200 mm, une correction des surfaces d'appuis de l'éprouvette est nécessaire. En effet, le montage d'essai d'arrachement est conçu afin que l'éprouvette soit maintenue de part et

d'autre, de manière symétrique. Cette zone de contact entre le montage et l'éprouvette se doit d'être la plus rigide possible. Les rainures, présentes sur toute la longueur de l'éprouvette (Figure 3-7a) créent une irrégularité sur cette zone de contact, et ne garantissent pas un placage uniforme de l'éprouvette.

Une correction de la surface des éprouvettes est nécessaire pour garantir un appui plan. La longueur d'appui de l'éprouvette sur le montage d'essais est de 45,2 mm de part et d'autres. Une sur-longueur d'environ 5 mm est considérée pour la longueur d'éprouvette à corriger (Figure 3-7b). La longueur totale de rainure à retirer est égale à 50 mm de part et d'autre, dans le sens de la longueur. La longueur rainurée restante est de 100 mm pour une longueur totale d'éprouvette de 200 mm.

Un montage d'usinage, utilisable sur la toupie MARTIN disponible sur le Campus Bois, est conçu afin de retirer les 50 mm en une seule passe (Figure 3-7c).

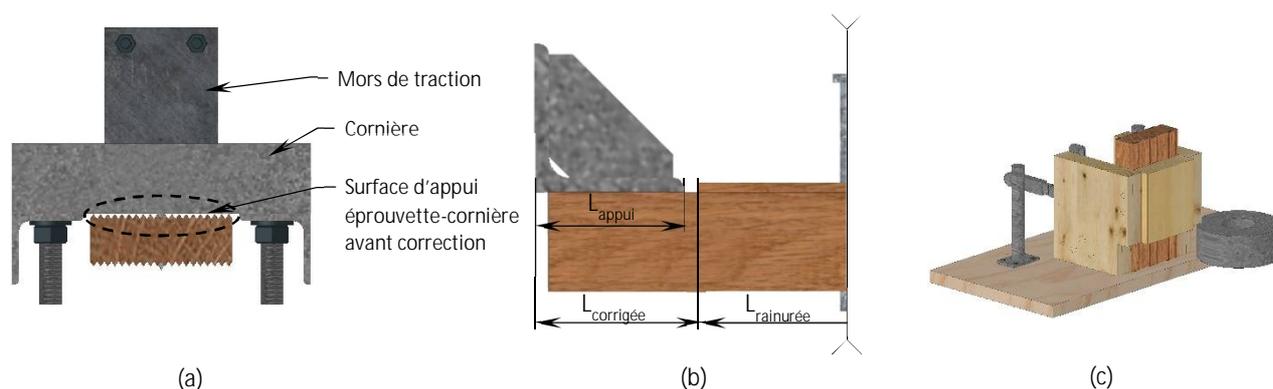


Figure 3-7 : Montage d'essai (a), représentation des surfaces d'appuis (b) et du montage d'usinage pour les corriger (c)

Mise en place de la vis

Une fois les surfaces d'appuis corrigées, la vis peut être mise en place afin de terminer l'éprouvette.

Pour garantir un enfoncement de la vis à une profondeur et à une position régulière d'une éprouvette à l'autre, il conviendra d'utiliser le guide décrit en Figure 3-3.

Le guide a les dimensions de la zone encore rainurée de l'éprouvette, soit 100 mm par 100 mm, pour une hauteur de 50 mm. De plus, sa surface inférieure est rainurée ; ainsi il se positionnera simplement à l'aplomb des rainures de l'éprouvette. Son déplacement est bloqué dans un sens par le fonctionnement des rainures les unes contre les autres, son blocage dans les autres directions est possible par un serrage manuel ou mécanique de type serre-joint. Une fois le gabarit centré sur les rainures, la vis est glissée dans la rondelle, puis l'ensemble « vis-rondelle » est positionné dans la fente prévue à cet effet. La vis est plaquée au fond de la fente, puis vissée. La hauteur du gabarit est telle qu'une fois la tête de la vis à sa hauteur, l'enfoncement souhaité est atteint.

Le vissage est réalisé mécaniquement par une visseuse portative (embout TW20). Une fois proche de la longueur d'enfoncement souhaitée, un vissage manuel vient parfaire l'enfoncement et permet de garantir une plus grande précision. Pour encore plus de précision, la longueur de la vis non enfoncée sera mesurée et permettra de déduire la longueur exacte de pénétration de la partie profilée l_d (ou t_{pen} selon la littérature) dans le fichier de dépouillement.

Numérotation des éprouvettes

L'éprouvette complète sera numérotée telle que X-YY-ZZZ où X correspond à la première lettre de l'essence, YY au numéro de l'essai, ZZZ au type d'essai. On aura par exemple : H-13-ARR pour une éprouvette en hêtre, treizième essai d'arrachement ; ou encore L-05-ARR pour une éprouvette en LVL, cinquième essai d'arrachement.

L'ensemble « éprouvette + vis + rondelle » sera pesé. Les masses de la vis³ et de la rondelle⁴ seront déduites sur le fichier Excel de dépouillement. La géométrie de l'éprouvette et la longueur d'enfoncement de la vis seront répertoriées dans ce même fichier de dépouillement.

3.4.2 Mise en place du montage d'essai

Mise en place de la partie inférieure du montage

- Boulonnage des quatre tiges filetées dans la table de montage de la MEUZ, préalablement mise à longueur (≈ 200 mm)
- Mise en place d'un écrou de type M16 sur chaque tige filetée, à même hauteur. La hauteur devant être supérieure à la hauteur totale d'une éprouvette, soit > 80 mm. Afin d'avoir une facilité d'accès pour le positionnement de l'éprouvette dans le montage, la hauteur minimum ne devra pas être inférieure à 120 mm.
- Positionnement des plats métalliques au-dessus des écrous préalablement fixés à la même hauteur. Les plats métalliques doivent être parallèles par rapport au plan de la table et de la traverse de la MEUZ. Une fois la planéité des plaques vérifiée, bloquer le déplacement en z des plats par une rondelle et écrou M16 sur chaque tige filetée.
- Le serrage des écrous M16 doit être régulièrement vérifié à l'aide d'une clé plate (taille 24).

Mise en place de la partie supérieure du montage

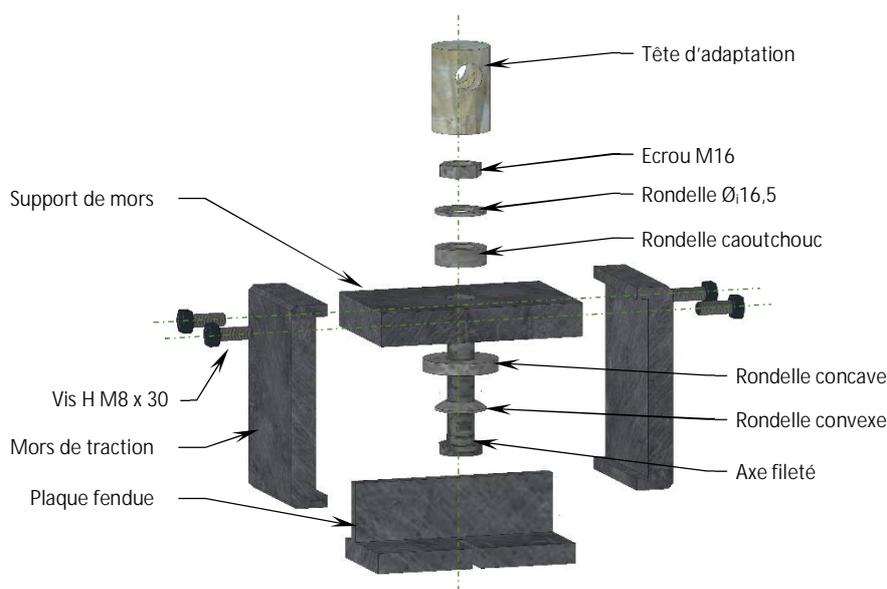


Figure 3-8 : Vue éclatée de la partie supérieure du montage de traction

- La tête de traction de la MEUZ doit être installée
- À l'aide la goupille prévue à cet effet, la tête d'adaptation du montage de traction est installée sur la tête de traction de la MEUZ
- Sur l'axe fileté, sont à insérer dans l'ordre : la rondelle convexe, la rondelle concave, le support de mors, la rondelle en caoutchouc, la rondelle plate et enfin l'écrou. L'extrémité filetée de l'axe est ensuite vissée dans la tête d'adaptation jusqu'à ce que le tout soit rigide
- À l'aide de deux boulons M8, les mors de tractions sont fixés sur le support de mors. Le serrage des mors sera régulièrement vérifié à l'aide d'une clé plate (taille 13)

³ $m_{\text{vis}} = 7,0$ g

⁴ $m_{\text{rondelle}} = 2,2$ g

- La plaque fendue peut ensuite être placée entre les mors de traction, et le bout de la gorge étant à axer avec l'axe du montage.

3.4.3 Début de l'essai sur la MEUZ

Les paramètres de l'essai (force appliquée, vitesse de déplacement, position initiale de la traverse) sont détaillés en *Partie 3.5.2 - Application de la charge*.

Mise en place de l'éprouvette dans le montage

- L'éprouvette est glissée manuellement sous les plats, en positionnant la vis sous le vide créé par l'espace entre plats
- L'éprouvette est remontée manuellement au contact des cornières d'appuis, et positionnée telle que la vis soit glissée au fond de la gorge de la plaque du montage de traction
- Dans le PC MEUZ, ouvrir le programme de « traction 1 vis » et régler la vitesse d'avance de la traverse en fonction de l'essence souhaitée (voir Tableau 3-5)
- Avant de débiter chaque essai, l'éprouvette est renommée dans le logiciel
- L'essai peut débiter

3.4.4 Fin des essais sur la MEUZ

Une fois la série d'essais terminée, le fichier résultats de la MEUZ peut s'exporter en un fichier Excel. Ce fichier Excel comportera le déplacement de la traverse, et donc de la vis, en fonction de l'effort qui lui est appliqué.

3.5 Caractérisation

La caractérisation de l'effort résistant à l'arrachement axial de la 5,0x80/72 dans du bois dur et du LVL permettra d'optimiser le modèle de calcul des assemblages picots. La valeur caractéristique de capacité à l'arrachement $f_{ax,k}$ n'étant pas caractérisée par le fournisseur, la capacité à l'arrachement est déterminée par essai, conformément à NF EN 1382 [6] dans l'équation (3-1).

$$f_{ax,k} = \frac{F_{max}}{d \cdot l_d} \quad (3-1)$$

où

F_{max}	Force maximale d'arrachement
d	Diamètre du filetage extérieur de la vis
l_d	Longueur de pénétration de la partie profilée

La valeur caractéristique de la capacité à l'arrachement est proportionnelle à la force maximale applicable sur la vis avant d'en causer sa rupture : F_{max} . Cette charge maximale est estimable à l'aide de l'Eq. (3-2) et s'appelle alors charge maximale présumée F_{est} , conformément au mode opératoire réglementaire [9].

3.5.1 Estimation de la charge maximale

La caractérisation de l'arrachement du filetage dans le bois dur (hêtre, chêne, bouleau) et dans le LVL, est réalisée telle que défini dans la norme NF EN 1995-1-1 [10]:

$$F_{ax,Rk} = f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \quad (3-2)$$

où

$F_{ax,Rk}$	Valeur caractéristique de la capacité à l'arrachement
$f_{ax,k}$	Valeur caractéristique de la résistance à l'arrachement du côté de la pointe
d	Diamètre de la pointe
t_{pen}	Longueur de pénétration de la pointe (équivalent à l_d selon les différentes littératures)

Une précédente campagne d'essais menée sur la résistance à l'enfoncement d'une vis dans le bois [11] montre une corrélation linéaire entre la contrainte de cisaillement du bois et la masse volumique. On admettra que le comportement à l'enfoncement est identique au comportement à l'arrachement.

En injectant la relation de contrainte de cisaillement dans l'équation de l'effort d'arrachement (3-2), il vient l'Eq. (3-3) de l'effort résistant axial moyen $R_{ax,mean}$ de la vis dans le bois :

$$R_{ax,mean}(\rho) = \pi \cdot d \cdot l_d \cdot f_{v,bois} \Leftrightarrow F_{est} \quad (3-3)$$

Et

$$f_{v,bois} = 0,0735 \cdot \rho_{mean} - 32,806 \quad (3-4)$$

où

l_d	Longueur de la partie filetée comprise dans la matière bois
$f_{v,bois}$	Effort résistant du bois sur la vis
ρ_{mean}	Masse volumique moyenne

Pour un diamètre d de 5 mm et un enfoncement normatif $8d$, soit de 40 mm, les forces à rupture présumées F_{est} varient de 8 à 17 kN pour les vis Ø5,0x80/72 selon l'essence étudiée. Dans la situation étudiée, où l'enfoncement est égale à 25 mm, les forces à rupture estimées varient entre 5 et 10 kN selon l'essence (Tableau 3-4).

Tableau 3-4 : Estimation des efforts résistants et résistances à l'arrachement en fonction des essences

		UNITE	HETRE	CHENE	BOULEAU	LVL
EFFORT RESISTANT	$f_{v,bois}$	MPa	19,4	21,6	12,8	26,0
RESISTANCE À L'ARRACHEMENT NORMATIF	$R_{ax,mean(8d=40mm)}$	kN	12,2	13,6	8,0	16,3
RESISTANCE À L'ARRACHEMENT POUR $L_D = 25$ mm	$R_{ax,mean(25mm)}$	kN	7,6	8,5	5,0	10,2

3.5.2 Application de la charge

Le cycle de chargement suit la norme NF EN 1382 [6], où la force à rupture estimée F_{est} est appliqué à une vitesse constante. La durée d'essai est telle que $60 \text{ s} \pm 15 \text{ s}$, et est fonction de la force à rupture estimée (voir l'équation (3-5)). La vitesse est donc fonction de F_{est} , elle-même fonction de l'essence testée.

$$\frac{F_{EST}}{Vitesse} = Durée \quad (3-5)$$

où

F_{est}	Force à rupture estimée, pour chaque essence
Vitesse	Vitesse de déplacement de la traverse
Durée	Durée de l'essai

Ainsi pour chaque essence, la vitesse d'avance de la traverse est estimée et répertoriée dans le Tableau 3-5. Un programme d'essai est réalisé dans le logiciel de la MEUZ indiquant les paliers de chargement à respecter, les temps de chargement, la vitesse d'avance, ainsi que les modes d'arrêts de l'essai. Ce même programme sera utilisé et adapté en fonction des paramètres liés à chaque essence.

La méthodologie de création du programme d'essai est résumée dans le Tableau 3-6.

Tableau 3-5 Paramètres « déroulement d'essais » en fonction de l'essence

ELEMENT	UNITE	HETRE	CHENE	BOULEAU	LVL DE HETRE
F _{EST}	kN	7,6	8,5	5,0	10,2
F _{TEST}	kN	50	50	50	50
VITESSE	N/s	100	150	100	150
DUREE DU TEST (ESTIMÉE)	s	76	57	50	68
ARRET REGULE PAR F _{max,Zwick}	kN	250	250	250	250
ARRET REGULE PAR COURSE	mm	30	30	30	30
ARRET REGULE PAR PERTE DE CHARGE	%F	100	100	100	100

Tableau 3-6 Méthodologie de création et/ou modification du programme d'essai sur la MEUZ

ELEMENT	N°	OBJECTIF	ETAPES
PARAMETRAGE MACHINE / ESSAI	1	Création d'un paramétrage personnalisé pour l'essai d'arrachement 1 vis	Zwick en mode « SETUP » + [ON] [Machine] ; [Configurer] ; [Elargi] ; [Poste d'essai] → « Traction Vis 1 EB » Définir le type d'essai : [Traction] Définir le poste d'essai : [Inférieur]
	2	Définition de la butée inférieure (éq. Z = 0 mm)	[Standard] ; Déplacer avec les boutons [↑][↓] de la Zwick jusqu'à position souhaitée ; Sur le PC appuyer sur [A] à côté de « Butée inférieure » : le PC prendra automatiquement la position actuelle comme la position souhaitée
	3	Définition de la position initiale : l'écartement entre outils 14 mm	
DEROULEMENT D'ESSAI	4	Définir les forces, vitesses et paramètres d'arrêt des essais	Variable en fonction des essences, voir paramètres dans le Tableau 3-5.

4 Protocole des essais d'arrachement double

4.1 Epreuves : dimensionnement et fabrication

Des essais de résistance à l'arrachement double sont réalisés dans du bois massif de bois durs et dans du LVL. La norme NF EN 1382 [6] donne les dimensions minimales réglementaires pour réaliser les épreuves, pour des organes de fixations de type pointe et vis. Les grandeurs spécifiques d'une épreuve pour des pointes perpendiculaires aux fibres du bois sont représentées en Figure 4-1, où « d » correspond au diamètre de la vis étudiée, et « L_D » la longueur de la vis.

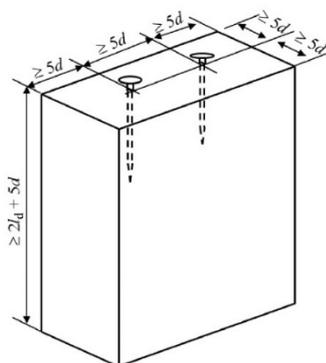


Figure 4-1 Grandeurs spécifiques de l'éprouvette selon NF EN1382

La tête de la vis n'étant pas prise en compte dans l'étude de l'assemblage, la longueur de la partie filetée est considérée comme la longueur totale de la vis, à laquelle la longueur de la pointe de la vis $L_{\text{pointe}} = 4 \text{ mm}$ est soustraite, soit $L_D = 68 \text{ mm}$.

La largeur retenue de l'éprouvette correspond à la largeur des lames étudiées dans les assemblages, soit 120 mm. La longueur a été défini par des pré-essais afin d'avoir la longueur minimale pour laquelle la rupture de l'éprouvette se réalise par arrachement de la vis et non par fendage du bois. La hauteur de l'éprouvette est fixée à 37 mm, et 30 mm hors rainures, conjointement à l'intégralité du Work Package 4. Les caractéristiques géométriques des éprouvettes sont répertoriées dans le Tableau 3-1 pour la vis étudiée.

L'objectif de la campagne d'essai est de mettre en évidence l'éventuelle perte de résistance à l'arrachement en fonction de la distance au bord. Plusieurs configurations de positionnement de vis sur l'éprouvette sont à tester pour étudier l'influence de la distance au bord. Ainsi, bien que les dimensions de largeur et de longueur soient respectées, le positionnement des vis sur l'éprouvette ne garantit pas les distances aux bords de $5d$ imposées par NF EN 1382 [6]. Les configurations étudiées sont illustrées en Figure 4-2, et répertoriées en Tableau 4-2.

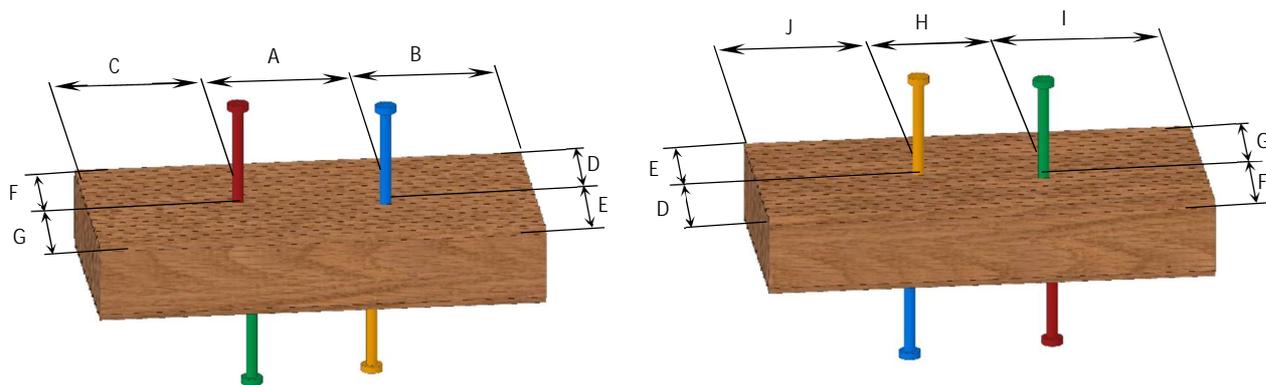


Figure 4-2 Représentation des configurations testées en arrachement double, face A (a) et face B (b)

Tableau 4-1 : Caractéristiques géométrique d'une éprouvette pour des vis de type ASSY 3.0 Ø5,0X80/72

		UNITE	DIMENSIONS MINIMALES EN CADRE NORMATIF	DIMENSIONS RETENUES
HAUTEUR	$\geq 2l + 5d$	mm	161	37*
LARGEUR	$\geq 5d \times 2$	mm	50	120
LONGUEUR	$\geq 5d \times 3$	mm	75	200
LONGUEUR D'ENFONCEMENT	$\geq 8d$	mm	40	25

*H = 37 mm avec rainures, soit 30 mm hors rainures

Tableau 4-2 Caractéristiques dimensionnelles des éprouvettes selon la configuration

	UNITE	CONFIG 1	CONFIG 2
A*	mm	65	65
B	mm	67,5	20
C	mm	67,5	115
D	mm	65	25
E	mm	55	95
F	mm	55	20
G	mm	65	100
H*	mm	55	55
I	mm	72,5	120
J	mm	72,5	25

*Dimensions imposées par le montage d'essai

4.1.1 Rainurage et débit

Les essais d'arrachement simple ont eu comme premier objectif de caractériser la résistance à l'arrachement de la vis selon les essences. Les essais d'arrachement double ont comme objectif de déterminer les pinces et distances au bord optimales en conservant la logique de l'assemblage (Figure 3-2a). Ainsi, la prise en compte du risque de fendage est à nouveau nécessaire. Les éprouvettes se doivent d'être rainurées dessus et dessous (voir Figure 3-2b et Tableau 3-2).

Le débit des éprouvettes s'effectue tout usinage fait, sur la scie à format, disponible sur le parc machine du Campus Bois.

Le nombre d'essais d'arrachement double par essence et par configuration est fixé à 15. Par soucis de « sécurité » un minimum de 5 éprouvettes supplémentaires est réalisé afin de s'affranchir de tout défaut dans le matériau, d'une mauvaise conception d'éprouvette ou d'une erreur technique lors de l'essai venant réduire le nombre d'essais exploitable. La quantité d'éprouvettes à réaliser est résumée dans le Tableau 4-3.

Tableau 4-3 Quantité d'éprouvette usinée par essence pour les essais d'arrachement double

	HETRE	CHENE	BOULEAU	LVL
QTT D'ESSAI PAR CONFIG.	15	15	15	15
QTT D'ÉPROUVETTE PAR CONFIG.	20	20	20	20
QTT TOTALE D'ÉPROUVETTES	80	80	80	80

4.1.2 Mise en place de la vis

La qualité des résultats dépend d'un enfoncement de chaque vis à une profondeur et à un positionnement réguliers d'une éprouvette à l'autre. Pour faciliter cette étape, un gabarit est réalisé (voir Figure 4-3). Afin de garantir la répétabilité de positionnement des vis, le gabarit comporte deux fentes permettant la mise en place de deux vis sans changer l'éprouvette ou gabarit de place. Deux gabarits sont nécessaires pour réaliser l'éprouvette, l'écartement entre les deux vis étant différent sur les deux faces.

Pour faciliter la mise en place du guide, les pointes de deux vis insérées dans le gabarit ressortent légèrement en sous-face, elles permettent un positionnement du gabarit précis en venant se piquer dans le creux d'une rainure.



Figure 4-3 : Gabarit de mise en place de deux vis

Le montage d'essai d'arrachement double étant similaires au montage d'essai d'arrachement simple, la problématique du matage de la tête de la vis est également à considérer. Les rondelles cuvettes pleines utilisées dans la campagne d'essais arrachement simple sont réutilisées pour cette campagne.

4.2 Chaîne d'acquisition des essais

Voir *Partie 3.2 - Chaîne d'acquisition des essais*

Le montage d'essai d'arrachement double reprend en partie le montage d'arrachement simple. Il se compose d'une partie basse, permettant de maintenir l'éprouvette par les deux vis de sa face inférieure, et d'une partie haute reprenant tout le mors de traction auquel la plaque fendue a été modifié pour permettre la traction sur deux vis (voir Figure 4-4)

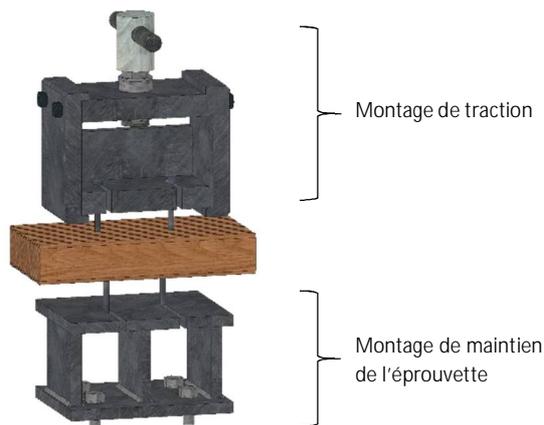


Figure 4-4 : Montage d'essai en arrachement double

4.3 Mode opératoire

Afin d'avoir un nombre représentatif de résultats, 15 essais par essence sont réalisés, soit un total de 60 par configuration. La répétabilité de réalisation des éprouvettes et du déroulement des essais sont nécessaires pour comparer des résultats traduisant le même phénomène.

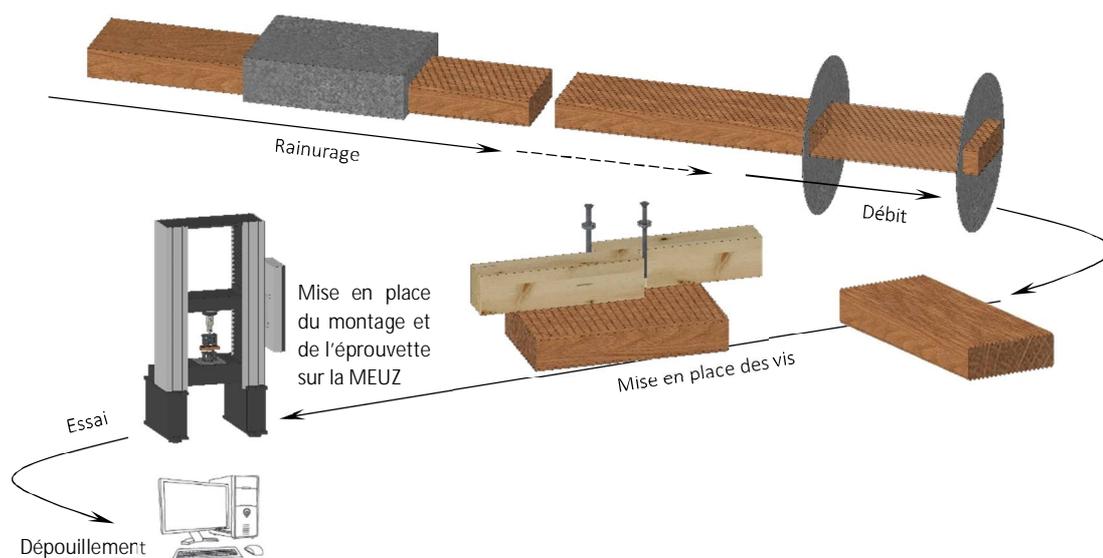


Figure 4-5 : Schématisation du mode opératoire d'un essai d'arrachement double

4.3.1 Réalisation de l'éprouvette

Mise en place de la vis

La qualité des résultats dépend d'un enfoncement des vis à une profondeur et à un positionnement réguliers d'une éprouvette à l'autre. Pour faciliter cette étape, des gabarits sont réalisés pour chaque configuration.

Il convient alors de maintenir l'éprouvette, manuellement ou par un serre joint et de positionner le gabarit de perçage. Ce gabarit est tel qu'une fois la tête de la vis à sa hauteur, l'enfoncement de 30 mm (pointe incluse) est proche.

Le vissage est réalisé mécaniquement par une visseuse portable (embout TW20). Une fois proche de la longueur d'enfoncement souhaitée, un vissage manuel vient parfaire l'enfoncement et permet de garantir une plus grande précision.

Pour encore plus de précision, la longueur de la vis non enfoncée sera mesurée et permettra de déduire la longueur exacte de pénétration de la partie filetée l_d (ou t_{pen} selon la littérature).

L'éprouvette étant composée de 4 vis, une moyenne des longueurs d'enfoncement est calculée et servira au calcul de la surface cisailée.

Numérotation des éprouvettes

L'éprouvette complète sera numérotée telle que U-XX-YYYY-ZZ où U correspond à la première lettre de l'essence, X au numéro de la configuration testée, YYYY au type d'essai, ZZ au numéro de l'essai. Par exemple : H-2-ART2-13 indique la treizième éprouvette de hêtre, deuxième configuration, en arrachement double.

L'ensemble « éprouvette + 4 vis + 4 rondelle » sera pesé. Les masses des vis⁵ et des rondelles⁶ seront déduites sur le fichier Excel de dépouillement. La géométrie de l'éprouvette et la longueur d'enfoncement de la vis seront répertoriées dans ce même fichier de dépouillement.

4.3.2 Mise en place du montage d'essai

Voir Partie 3.4.2 - Mise en place du montage d'essai ; avec remplacement de la plaque fendue par plaque à double fente.

4.3.3 Début de l'essai sur la MEUZ

Les paramètres de l'essai (force appliquée, vitesse de déplacement, position initiale de la traverse) sont détaillés en *Partie 4.4.2 - Application de la charge.*

Mise en place de l'éprouvette dans le montage

- L'éprouvette est positionnée manuellement dans le montage
- Dans le PC MEUZ, ouvrir le programme de « traction 2 vis » et régler la vitesse d'avance de la traverse en fonction de l'essence souhaitée (voir Tableau 3-5)
- Avant de débiter chaque essai, l'éprouvette est renommée dans le logiciel
- L'essai peut débiter

4.3.4 Fin des essais sur la MEUZ

Une fois la série d'essais terminée, le fichier résultats de la MEUZ peut s'exporter en un fichier Excel. Ce fichier Excel comportera le déplacement de la traverse, et donc de la vis, en fonction de l'effort qui lui est appliqué.

4.4 Caractérisation

La caractérisation de l'effort résistant à l'arrachement axial d'une vis 5,0x80/72 a été réalisé lors des essais d'arrachement simple.

La caractérisation de l'effort résistant à l'arrachement axial de deux vis est réalisée selon la même démarche.

⁵ $m_{vis} = 7,0 \text{ g}$

⁶ $m_{rondelle} = 2,2 \text{ g}$

4.4.1 Estimation de la charge maximale

La charge maximale estimée est issue des résultats des essais d'arrachement simple. La précédente campagne d'essai montre la résistance à l'arrachement d'une vis sollicitée en traction dans le LVL de hêtre, le bouleau, le chêne et le hêtre. L'effort estimé F_{est} correspondra au double de l'effort en arrachement simple.

		UNITÉ	LVL DE HETRE	BOULEAU	CHÊNE	HÊTRE
EFFORT MAX CARACTERISTIQUE EN ARRACHEMENT SIMPLE	$F_{max,k,1}$	kN	5,73	2,89 (2,97)*	4,76 (4,96)*	5,63
EFFORT MAX MOYEN EN ARRACHEMENT SIMPLE	$F_{max,k,mean,1}$	kN	6,74	3,95 (3,86)*	6,14 (6,03)*	6,90
EFFORT À RUPTURE ESTIMÉ EN ARRACHEMENT DOUBLE	F_{est}	kN	≈ 14,0	≈ 4,0	≈ 12,0	≈ 14,0

4.4.2 Application de la charge

Voir Partie 3.5.2 - Application de la charge.

Pour chaque essence, la vitesse d'avance de la traverse est estimée et répertoriée dans le Tableau 3-5. Un programme d'essai est réalisé dans le logiciel de la MEUZ indiquant les paliers de chargement à respecter, les temps de chargement, la vitesse d'avance, ainsi que les modes d'arrêts de l'essai. Ce même programme sera utilisé et adapté en fonction des paramètres liés à chaque essence.

Tableau 4-4 Paramètres « déroulement d'essais » en fonction de l'essence

ELEMENT	UNITE	HETRE	CHENE	BOULEAU	LVL DE HETRE
F_{EST}	kN	≈ 14,0	≈ 12,0	≈ 4,0	≈ 14,0
F_{TEST}	kN	50	50	50	50
VITESSE	N/s	200	200	80	200
DUREE DU TEST (ESTIMÉE)	s	70	60	50	70
ARRET REGULE PAR $F_{max,Zwick}$	kN	250	250	250	250
ARRET REGULE PAR COURSE	mm	30	30	30	30
ARRET REGULE PAR PERTE DE CHARGE	%F	100	100	100	100

4.4.3 Dépouillement des essais d'arrachements

Les valeurs caractéristique et caractéristique moyenne de capacité à l'arrachement simple et double peuvent être déterminée selon une étude statistique conformément à NF EN 14358 [7].

Démarche selon NF EN 14358

La norme NF EN 14358 [7] permet de déterminer statistiquement les valeurs caractéristiques et caractéristiques moyenne après essais. La variabilité des éprouvettes étant inconnue avant les essais, il est supposé que le coefficient de variation est $COV_{théorique} \leq 20\%$, comme indiqué dans le Tableau 5 de NF EN 14358 [7] pour un nombre d'essai inférieur à 34.

Afin d'accepter le lot d'éprouvette, le COV théorique et le COV réel obtenu après essai sont comparés. Si $COV_{réel} \leq COV_{théorique}$ alors le lot est accepté, et le nombre d'essais est jugé suffisant car peu variable.

Ce COV est fonction de la moyenne et de l'écart-type, et se calcule à partir des équations (4-1), (4-2) et (4-3) ci-dessous.

$$m_x = \frac{\sum_i^N x_i}{N} \quad (4-1) \quad ; \quad s_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (x_i - m_x)^2} \quad (4-2) \quad ; \quad V_x = \frac{s_x}{m_x} \quad (4-3)$$

où

x_i	Valeurs d'essais
N	Nombre d'essais, ici $N = 15$
m_x	Moyenne des valeurs d'essais x_i
s_x	Ecart-type
V_x	Coefficient de variation (COV)

Détermination de la valeur caractéristique

La détermination de la valeur caractéristique est réalisée en suivant une distribution log normale. Cette approche a pour avantage de s'affranchir d'une éventuelle valeur négative. Ainsi, l'expression de la valeur caractéristique R_k est telle que décrite dans l'équation (4-4).

$$R_k = \exp(m_y - k_{s,k(n)} \times s_y) \quad (4-4)$$

Où la moyenne et l'écart type sont fonction des $\ln x_i$ comme décrit en équations (4-5) et (4-6), et la valeur de k_n répertoriée dans le Tableau 4-5.

$$m_y = \frac{\sum_i^N \ln x_i}{N} \quad (4-5) \quad ; \quad s_y = \max \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (\ln x_i - m_y)^2} \\ \sqrt{\ln(1 + 0,05^2)} \approx 0,05 \end{array} \right. \quad (4-6)$$

Détermination de la valeur caractéristique moyenne

Il est supposé cette fois que les n essais proviennent d'une population homogène. Les valeurs d'essais, supposées indépendantes, suivent alors une loi normale.

L'expression de la valeur caractéristique moyenne $R_{k,mean}$ est alors telle qu'en équation (4-7).

$$R_{k,mean} = m_x - k_{s,mean(n)} \times s_y \quad (4-7)$$

Où la moyenne m_x est décrite dans l'équation (4-1), et s_y devient (4-8), et la valeur de k_n répertoriée dans le Tableau 4-5.

$$s_x = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (x_i - m_x)^2}, 0,05 \times m_x \right\} \quad (4-8)$$

Tableau 4-5 Valeurs du facteur k pour les propriétés de rigidités

NOMBRE D'ESSAI	$k_{s,k}(n)^*$	$k_{s,mean}(n)^*$
15	1,9908	0,1788

5 Résultats essais arrachement simple

5.1 Détermination de la résistance à l'arrachement du filet dans le bois

Les efforts théoriques de rupture sont fonction de la vis et de l'essence étudiées. Pour une même vis et un même effort, chaque essence de bois aura sa propre réponse face à une sollicitation de type arrachement.

Cette réponse est fonction de la résistance au cisaillement du bois, et donc de sa masse volumique.

5.1.1 Résistance théorique à l'arrachement du filet dans le bois dur selon la NF EN 1995-1-1

La caractérisation de l'effort résistant à l'arrachement axial de la 5,0x80/72 dans du bois dur et du LVL permet d'optimiser le modèle de calcul des assemblages rainurés. La valeur caractéristique de capacité à l'arrachement $f_{ax,k}$ n'étant pas caractérisée par le fournisseur, la capacité à l'arrachement est déterminée par essais, conformément à NF EN 1382 [1].

$$f_{ax,k} = \frac{F_{max}}{d \cdot l_d} \quad (5-1)$$

où

- F_{max} Force maximale d'arrachement
- d Diamètre du filetage extérieur de la vis
- l_d Longueur de pénétration de la partie profilée

La valeur caractéristique de la capacité à l'arrachement est proportionnelle à la force maximale applicable sur la vis avant d'en causer sa rupture : F_{max} . Cette charge maximale a été estimée dans le protocole d'essai et s'appelle à présent charge maximale présumée F_{est} .

Pour un diamètre d de 5 mm et un enfoncement de 25 mm, la force à rupture présumée F_{est} varie de 5 à 10 kN pour les vis Ø5,0x80/72 selon l'essence étudiée (Tableau 5-1).

Tableau 5-1 Estimation des efforts résistants et résistances à l'arrachement en fonction des essences

		UNITE	HETRE	CHENE	BOULEAU	LVL DE HETRE
EFFORT RESISTANT	$f_{v,bois}$	MPa	19,4	21,6	12,8	26,0
RESISTANCE À L'ARRACHEMENT, POUR $L_D = 25mm$	F_{est}	kN	7,6	8,5	5,0	10,2

5.1.2 Pré-essais : programmation et raideur du montage

Calibration et programmation de la Zwick

Afin de définir les paramètres pour l'arrêt automatique de l'essai, cinq pré-test ont été réalisés sur du LVL. Les éprouvettes étaient numérotées telle que PT-ESS-i-ARR, où PT veut dire « pré-test », ESS correspond à l'essence testée, i correspond au numéro de l'essai et ARR spécifie l'essai d'arrachement.

Ces pré-essais ont également pour objectif de valider la boucle de dépouillement.

Le programme de la MEUZ⁷ est tel que l'arrêt de l'essai est piloté par trois conditions. La première est une condition de sécurité automatique où l'essai s'arrête dès que la force standard dépasse les 250 kN (valeur limite de la machine Z250). La seconde condition est fonction de la course standard, donc du déplacement de l'outil de traction (donc indirectement, du déplacement de la vis). La troisième condition est fonction de la perte de charge (proportionnelle à la force standard maximale obtenue).

Un premier pré-test a été réalisé sur du hêtre (PT-HET-1-ARR). Les paramètres du programme sont tels que l'essai n'a pas mis en évidence de rupture fragile (voir Figure 5-1). Un jeu est également perceptible (voir Figure 5-2). Après vérification du montage, certaines pièces ne s'emboîtaient pas parfaitement et un serrage plus important était nécessaire.

Cinq autre pré-tests sont ensuite réalisés, sur du LVL cette fois, afin de calibrer au mieux le montage et paramétrer le programme pour visualiser au maximum le comportement de la vis tout au long de l'essai. Les résultats de ces essais sont visibles en Figure 5-1 et leurs paramètres sont répertoriés dans le Tableau 5-2.

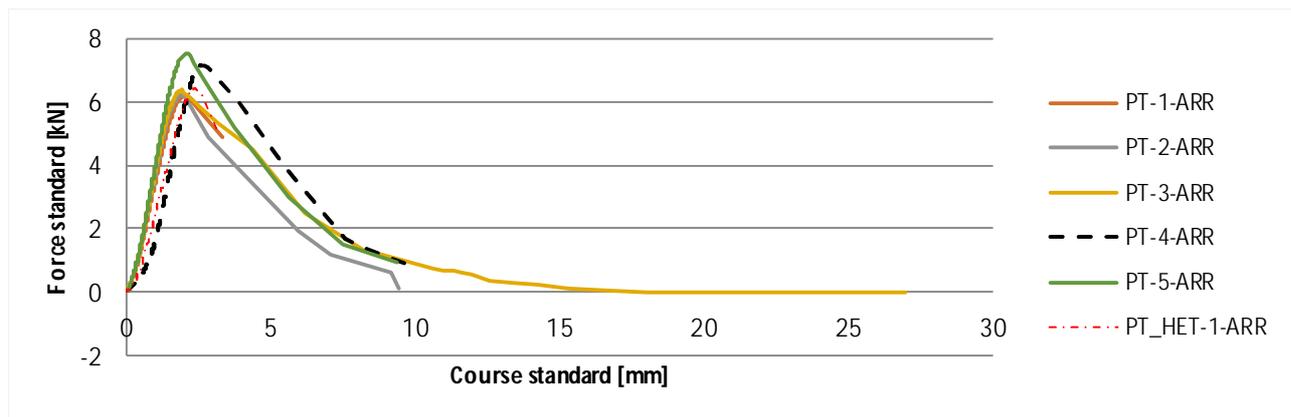


Figure 5-1 Evolution de la course de la vis en fonction de la force (en pré-test)

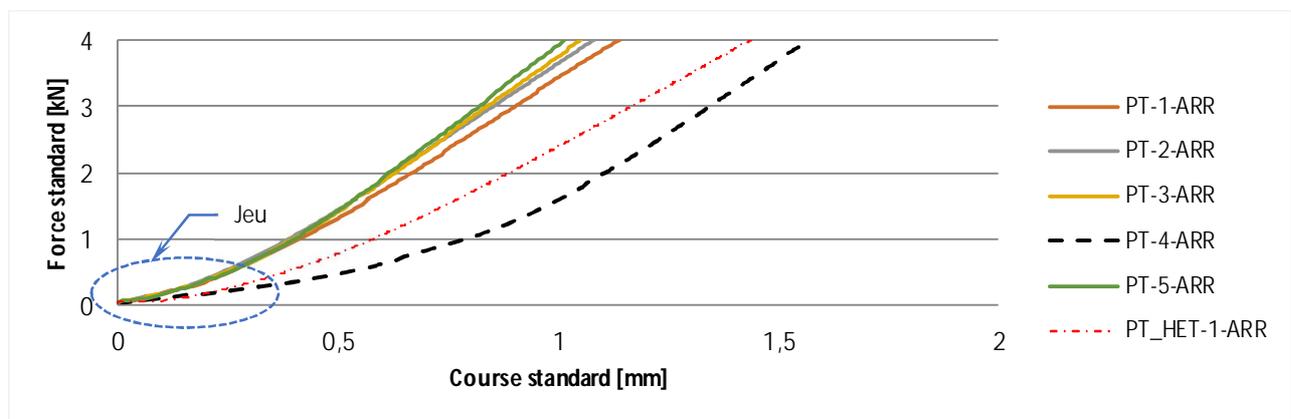


Figure 5-2 Mise en évidence des jeux (zoom de la Figure 5-1)

⁷ MEUZ : Machine d'Essais Universelle Zwick

Tableau 5-2 Pilotage de l'arrêt des essais en fonction des paramètres du programme

CONDITION D'ARRET	$F_{MAX,ZWICK}$ [KN]	COURSE STANDARD [MM]	PERTE DE CHARGE [%]	MODE D'ARRET CONSTATE
PT-HET-1-ARR	250	30	20% $F_{standard}$	Perte de charge (pas de rupture fragile)
PT-LVL-1-ARR	250	30	20% $F_{standard}$	Perte de charge (pas de rupture fragile)
PT- LVL-2-ARR	250	30	80% $F_{standard}$	Perte de charge 80%
PT- LVL-3-ARR	250	27	100% $F_{standard}$	Rupture**
PT- LVL-4-ARR*	250	10	80% $F_{standard}$	Perte de charge 80%
PT- LVL-5-ARR	250	12	80% $F_{standard}$	Perte de charge 80%

* La différence de raideur initiale s'explique par le fait que la vis n'était vraiment pas droite

** Arrachement complet de la vis

D'après l'évolution de la résistance à l'arrachement (Figure 5-1) pour chaque paramètres testés (Tableau 5-2), les paramètres optimaux pour visualiser au mieux l'évolution de la résistance de la vis sont ceux des éprouvettes PT-2-ARR et PT-3-ARR.

Après récupération des données des essais, le cycle de dépouillement permet de mettre en évidence la force $F_{max,mesurée}$, l'aire tendue (qui est fonction du diamètre de la vis et de sa longueur d'enfoncement dans l'éprouvette), ainsi que la résistance au cisaillement du bois (voir Tableau 5-3).

Tableau 5-3 Résultats des pré-essais d'arrachement

ÉPROUVETTE	$F_{MAX,MESUREE}$ [N]	SURF. CISAILLEE [MM ²]	$R_{AX} = F_{V,BOIS}$ [MPA]	JEU [MM]
PT-1-ARR	6180	424	14,57	0,13
PT-2-ARR	6221	424	14,67	0,12
PT-3-ARR	6352	427	14,87	0,14
PT-4-ARR	7132	424	16,82	0,41
PT-5-ARR	7482	424	17,64	0,16

Les cinq essais ne permettent pas d'obtenir des valeurs fiables d'un point de vue statistique. Cependant, à titre indicatif, le dépouillement donne les éléments répertoriés dans le Tableau 5-4.

Tableau 5-4 Pré-test, résultats statistiques

	MIN	MAX	MOYENNE	ECART-TYPE	COV
F_{AX}	14,57 MPa	17,65 MPa	15,74 MPa	1,42 MPa	9%

Il conviendra ensuite de déterminer la masse volumique et l'humidité de la zone cisailée en retirant la vis, en découpant un carré de 30x30 mm autour de la zone d'enfoncement, peser puis mettre à l'étuve avant de repeser.

5.1.3 Méthodes : essais d'arrachement, dépouillement et analyse statistique

Les essais d'arrachement sont réalisés sur la MEUZ. Le programme est réalisé directement sur le logiciel de la MEUZ, et validé suite aux pré-essais d'arrachement. Une fois les essais réalisés, un dépouillement automatique suivi d'une analyse statistique sont réalisés pour déterminer la résistance à l'arrachement de la vis Würth ASSY3.0 Ø5,0*80/72 dans le chêne, le hêtre, le bouleau et le LVL de hêtre.

Paramétrage de la MEUZ

La norme NF EN 1382 [1] impose une durée d'essai telle que $60 \text{ s} \pm 15 \text{ s}$. Le déplacement de la traverse se fait en N/s. Ainsi, chaque essence à une vitesse proportionnelle à la résistance estimée telle que le montre l'équation (5-2). La vitesse d'avance et l'intégralité des autres paramètres de la MEUZ nécessaires au bon déroulement des essais sont répertoriés dans le Tableau 5-5.

$$\frac{F_{EST}}{Vitesse} = Durée \quad (5-2)$$

Tableau 5-5 Paramètres « déroulement d'essais » en fonction de l'essence

ELEMENT	UNITE	HETRE	CHENE	BOULEAU	LVL DE HETRE
F _{EST}	kN	8,219	9,154	5,413	11,024
F _{TEST}	kN	50	50	50	50
VITESSE	N/s	100	150	100	150
DUREE DU TEST	s	80	60	55	75
ARRET REGULE PAR F _{max,Zwick}	kN	250	250	250	250
ARRET REGULE PAR COURSE	mm	30	30	30	30
ARRET REGULE PAR PERTE DE CHARGE	%F	100	100	100	100

Dépouillement

Un programme Excel a été rédigé afin de dépouiller automatiquement les fichiers en sortie de la MEUZ. Une feuille Excel sert de répertoire pour les données liées aux éprouvettes avant essai (dimensions, masses, longueurs d'enfoncement des vis, humidités).

Le programme tient ensuite compte de l'analyse statistique décrite par la norme NF EN 14358 [4] pour déterminer les valeurs caractéristiques et caractéristiques moyennes. Parallèlement, il permet de mettre en évidence l'effort maximal F_{max} mesuré, de représenter la raideur K_{ser} comprise en 10 % et 40 % de F_{max}, et souligne l'éventuel jeu de mise en œuvre présent dans l'essai.

Humidité autour de la vis

Les essais d'arrachements ayant pour objectif de déterminer une valeur caractéristique de résistance au cisaillement, l'humidité du bois doit être à 12 %. Si cette humidité n'est pas atteinte, une correction du résultat est possible par la suite. L'humidité est donc relevée autour de chaque zone d'enfoncement de la vis (ZEV), sur un carré d'environ 3 cm de côté (voir Figure 5-3). La masse de la ZEV est mesurée à l'état humide directement après l'essai d'arrachement. Les ZEV sont ensuite placées dans une étuve à 103°C. Plusieurs pesées sont réalisées jusqu'à obtenir une masse stable, dite masse anhydre. Le delta entre la masse humide et la masse sèche permet de déterminer la teneur en eau de chaque ZEV (voir l'équation (5-3)), et donc d'affiner le résultat.

Toutes ces masses sont répertoriées pour chaque essence et chaque éprouvette dans les annexes correspondantes.

$$TH = \frac{m_{humide} - m_{anhydre}}{m_{anhydre}} \cdot 100 \quad (5-3)$$

où

TH Teneur en eau, en %

m_{humide} Masse initiale de l'échantillon

$m_{anhydre}$ Masse anhydre de l'échantillon

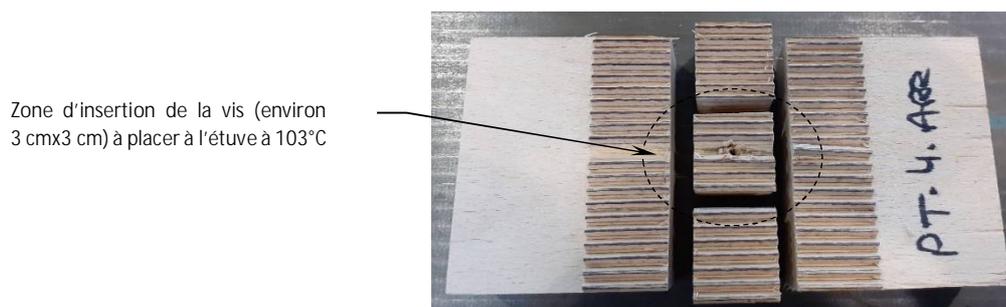


Figure 5-3 Découpage de la zone d'insertion de la vis

Analyse statistique selon NF EN 14358

Tableau 5-6 Valeurs du facteur k pour les propriétés de rigidités

NOMBRE D'ESSAI	$k_{s,k}(n)^*$	$k_{s,mean}(n)^*$
20	1,9320	0,1538

* k_s , selon NF EN 14358

5.2 Résultats : résistance à l'arrachement de la vis ASSY 3.0 Ø5,0*80/72 (Würth)

Pour chaque campagne d'essais, l'effort maximal mesuré a été répertorié. Une analyse statistique a été réalisée pour chaque essence, permettant de déterminer la valeur caractéristique de la résistance à l'arrachement, conformément à l'annexe D7 de l'ECO [5, p. 0] et la norme NF EN 14358 [4].

Parallèlement, l'humidité a été mesurée autour de chaque zone d'enfoncement de la vis. Cette humidité a systématiquement été répertoriée afin de corriger au besoin la valeur caractéristique obtenue.

5.2.1 Résistance à l'arrachement de la vis dans le LVL de hêtre

Chaque éprouvette a été pesée avant la réalisation de l'essai d'arrachement. Les masses volumiques et les longueurs d'enfoncement ont été répertoriées pour chaque éprouvette.

Une fois l'essai réalisé, et la vis retirée, l'humidité autour de la zone d'enfoncement a été relevée. Les humidités de chaque zone d'enfoncement ont également été répertoriées.

Les coefficients de variations sont respectivement de 1,66 % et de 2,56 % pour la masse volumique des éprouvettes et la teneur en eau autour de la zone d'enfoncement de la vis (Tableau 5-7). Ceci permet de conclure sur la faible variabilité des éprouvettes utilisées pour les essais d'arrachement dans le LVL de hêtre.

Tableau 5-7 Synthèse de la masse volumique et de l'humidité dans les éprouvettes de LVL

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV
MASSE VOLUMIQUE DE L'EPROUVETTE	ρ kg/m^3	776	830	805	13	1,66%
TENEUR EN EAU AUTOUR DE LA ZONE D'ENFONCEMENT	TH %	6,38	7,17	6,83	0,17	2,56

Analyse statistique des efforts mesurés dans le LVL

Les valeurs des moments à rupture ont été répertoriés lors des essais. Conformément à l'Annexe D de l'Eurocode 0 [2] et NF EN 14358 [4], il est possible de déterminer la valeur caractéristique de l'effort à rupture, et donc la résistance au cisaillement du bois. Cette résistance au cisaillement étant proportionnelle à la longueur d'enfoncement de la vis dans le bois, chaque longueur fut également répertoriée. Les données ont été dépouillées en suivant une loi Log Normale.

Force maximale : F_{max,k_LVL} et $F_{max,mean_LVL}$

Tout calcul fait pour un nombre d'essais $n = 20$, le $COV_{F_{max,réel}} < 10\%$. Conformément à la NF EN 14358 [4], ceci permet de conclure sur la faible variabilité des essais d'arrachement, et donc de valider la quantité d'essais réalisés. L'effort maximal caractéristique F_{max,k_LVL} et l'effort maximal caractéristique moyen $F_{max,mean_LVL}$ s'exprime alors respectivement en équation (5-4) et (5-5). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 5-8, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5. L'intégralité des efforts mesurés lors de la campagne sont tracés en Figure 5-4.

$$F_{max,k_LVL} = \exp(m_{y_{\ln(F_{max_LVL})}} - k_{n=20,k} \times V_{x_{\ln(F_{max_LVL}-my_LVL)^2}}) = \exp(1,92 - 1,9320 \times 0,09) = 5,73 kN \quad (5-4)$$

et

$$F_{max,mean_LVL} = m_{y_{F_{max_LVL}}} - k_{n=20,mean} \times V_{x_{F_{max_LVL}}} = 6,84 - 0,1538 \times 0,63 = 6,74 kN \quad (5-5)$$

Résistance au cisaillement : f_{v,k_LVL} et $f_{v,mean_LVL}$

Sur 20 éprouvettes, la longueur moyenne de pénétration de la vis dans le LVL de hêtre est de $t_{pen,moy_LVL} = 23,4 mm$, pour une longueur de pointe de 4 mm déduite de la longueur de pénétration. Soit, à titre indicatif, une surface cisailée moyenne de $S_{moy_LVL} = 368 mm^2$.

De la même manière, la résistance caractéristiques au cisaillement f_{v,k_LVL} et la résistance moyenne au cisaillement $f_{v,mean_LVL}$ s'expriment respectivement grâce aux équations (5-6) et (5-7). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 5-8, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5.

$$f_{v,k_LVL} = \exp(m_{y_{\ln(f_{ax})}} - k_{n=20,k} \times V_{x_{\ln(f_{ax}-my)^2}}) = \exp(2,92 - 1,9320 \times 0,08) = 15,89 MPa \quad (5-6)$$

et

$$f_{v,k,mean_LVL} = m_{y_{f_{ax}}} - k_{n=20,mean} \times V_{x_{f_{ax}}} = 18,58 - 0,1538 \times 1,51 = 18,35 MPa \quad (5-7)$$

Tableau 5-8 Données – Déterminations des efforts et résistances au cisaillement caractéristiques et caractéristiques moyennes dans le LVL

	$m_{y_{\ln(f)}}$	$V_{x_{\ln(f-my)^2}}$	m_{y_f}	V_{x_f}
FORCE MAXIMALE	1,92	max{0,09 ; 0,05}	6,84	max{0,63 ; 0,34}
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	2,92	max{0,08 ; 0,05}	18,58	max{1,51 ; 0,93}

Synthèse des résultats d'arrachement dans le LVL

Tableau 5-9 Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le LVL

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_K	X_{MEAN}
EFFORT MAX	F_{max} kN	5,60	8,32	6,84	0,63	9,19%	5,73	6,74
RESISTANCE AU CISAILEMENT	f_v MPa	14,68	21,27	17,82	1,47	8,17%	15,89	18,35

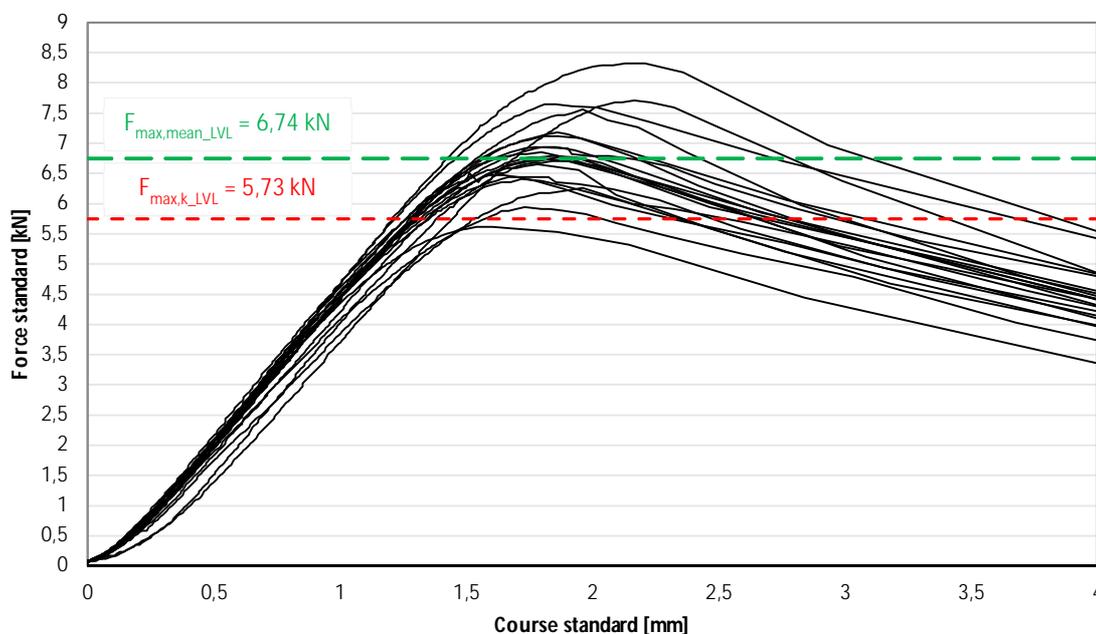


Figure 5-4 Synthèse des évolutions des efforts dans le LVL de hêtre en fonction du déplacement de la traverse

Analyse de la raideur K_{Ser}

Le jeu moyen de mise en œuvre dans les essais d'arrachement sur le LVL de hêtre est de 0,09 mm. Ce jeu est considéré comme très faible. Cependant une variabilité de 37 % est observable, causée par la variabilité du matériau bois d'une part, et par une mauvaise répétabilité de réalisation des éprouvettes (enfoncement de la vis \pm profond, \pm droit malgré l'usage d'un guide).

La raideur moyenne de la vis dans le bois est de 4756 N/mm, pour un coefficient de variabilité de 4,5 %.

Les données liées au jeu de mise en œuvre et à la raideur sont répertoriées dans le Tableau 5-10.

Tableau 5-10 Raideurs et jeux obtenus par les essais d'arrachement dans le LVL de hêtre

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART-TYPE	COV
K_{SER}	N/mm	4 221	5 112	4 756	213	4,5 %
JEU	mm	0,064	0,184	0,090	0,033	37,0 %

5.2.2 Résistance à l'arrachement de la vis dans le bouleau

Chaque éprouvette a été pesé avant la réalisation de l'essai d'arrachement. Les masses volumiques et les longueurs d'enfoncement ont été répertoriées pour chaque éprouvette.

Une fois l'essai réalisé, et la vis retirée, l'humidité autour de la zone d'enfoncement a été relevé. Les valeurs d'humidité relevée sont répertoriées.

Les coefficients de variations sont respectivement de 6,04 % et de 2,32 % pour la masse volumique des éprouvettes et la teneur en eau autour de la zone d'enfoncement de la vis (voir Tableau 5-11). Ceci permet de conclure sur la faible variabilité des éprouvettes utilisées pour les essais d'arrachement dans le bouleau.

Tableau 5-11 Synthèse de la masse volumique et de l'humidité dans les éprouvettes de bouleau

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV
MASSE VOLUMIQUE DE L'EPROUVETTE	ρ kg/m^3	524	631	566	34	6,04 %
TENEUR EN EAU AUTOUR DE LA ZONE D'ENFONCEMENT	TH %	9,56	10,67	10,10	0,23	2,32 %

Analyse statistique des efforts mesurés dans le bouleau

Les valeurs des efforts à rupture sont répertoriées lors des essais. Conformément à l'Annexe D de l'Eurocode 0 [2] et NF EN 14358 [4], il est possible de déterminer la valeur caractéristique de l'effort à rupture, et donc la résistance au cisaillement du bois. Cette résistance au cisaillement étant proportionnelle à la longueur d'enfoncement de la vis dans le bois, chaque longueur est répertoriée.

Les données ont été dépouillées en suivant une loi Log Normale.

Force maximale : F_{max,k_BOU} et $F_{max,mean_BOU}$

Le coefficient de variation V_x est supérieur à 10 %, k_n . Ce COV élevé s'explique par l'éprouvette BOU-15-ARR qui présente une forte valeur de résistance à l'arrachement (Figure 5-5). Cette forte résistance est en partie attribuable à la présence d'un nœud compact traversé par la vis, visible en Figure 5-6.

La ressource en bouleau disponible au LERMAB pour le projet `hardhood_joint`, présente de nombreux nœuds et autres défauts. Ainsi, afin d'être représentatif du lot étudié, la valeur obtenue par l'éprouvette BOU-15-ARR ne sera pas exclue du dépouillement statistique. Un comparatif sera tout de même fait dans la synthèse des résultats pour quantifier l'influence d'une telle éprouvette.

L'effort maximal caractéristique F_{max,k_BOU} et l'effort maximal caractéristique moyen $F_{max,mean_BOU}$ s'exprime alors respectivement en équation (5-8) et (5-9). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 5-12, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5. L'intégralité des efforts mesurés lors de la campagne sont tracés en Figure 5-5.

$$F_{max,k_BOU} = \exp(m_{y_{\ln(F_{max_BOU})}} - k_{n=20,k} \times V_{x_{\ln(F_{max_BOU}-m_{y_{\ln(F_{max_BOU})}})}}) = \exp(1,39 - 1,9320 \times 0,17) = 2,89 kN \quad (5-8)$$

et

$$F_{max,mean_BOU} = m_{y_{F_{max_BOU}}} - k_{n=20,mean} \times V_{x_{F_{max_BOU}}} = 4,06 - 0,1538 \times 0,73 = 3,95 kN \quad (5-9)$$

Résistance au cisaillement : f_{v,k_BOU} et $f_{v,mean_BOU}$

Sur 20 éprouvettes, la longueur moyenne de pénétration de la vis dans le bouleau est de $t_{pen,moy_BOU} = 23,8 \text{ mm}$, pour une longueur de pointe de 4 mm déduite de la longueur de pénétration. Soit, à titre indicatif, une surface cisailée moyenne de $S_{moy_BOU} = 373 \text{ mm}^2$.

De la même manière, la résistance caractéristiques au cisaillement f_{v,k_BOU} et la résistance moyenne au cisaillement $f_{v,mean_BOU}$ s'expriment respectivement grâce aux équations (5-10) et (5-11). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 5-12, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5.

$$f_{v,k_BOU} = \exp(m_{y_{\ln(f_{ax})}} - k_{n=20,k} \times V_{x_{\ln(f_{ax}-m_y)}}) = \exp(2,37 - 1,9320 \times 0,16) = 7,85 \text{ MPa} \quad (5-10)$$

et

$$f_{v,k,mean_BOU} = m_{y_{f_{ax}}} - k_{n=20,mean} \times V_{x_{f_{ax}}} = 10,88 - 0,1538 \times 1,86 = 10,59 \text{ MPa} \quad (5-11)$$

Tableau 5-12 Données – Déterminations des efforts résistances au cisaillement caractéristiques et caractéristiques moyennes dans le bouleau

	$m_{y_{\ln(F)}}$	$V_{x_{\ln(F-m_y)}}$	m_{y_F}	V_{x_F}
FORCE MAXIMALE	1,39	max{0,17 ; 0,05}	4,06	max{0,73 ; 0,20}
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	2,37	max{0,16 ; 0,05}	10,88	max{1,86 ; 0,5438}

Synthèse des résultats d'arrachement dans le bouleau

Tableau 5-13 Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le bouleau, pour n = 20

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_k	X_{MEAN}
EFFORT MAX	F_{max} kN	3,01	6,21	4,06	0,73	18,06 %	2,89	3,95
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	f_v MPa	8,09	16,34	10,88	1,86	17,12 %	7,85	10,59

Si l'éprouvette BOU-15-ARR avait été rejetée lors du dépouillement, les valeurs finales auraient été défini pour un lot de 19 éprouvettes. Les résultats pour n = 19 sont répertoriés dans le Tableau 5-14 ci-dessous. La variation sur les valeurs caractéristiques et caractéristiques moyennes est inférieure à 5 % entre l'inclusion et l'exclusion de l'éprouvette BOU-15-ARR. Cette variation est négligeable.

Tableau 5-14 Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le bouleau, pour n = 19

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_k^*	X_{MEAN}^*
EFFORT MAX	F_{max} kN	3,01	4,78	3,95	0,55	13,84 %	2,97	3,86
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	f_v MPa	8,09	12,58	10,59	1,38	13,07 %	8,16	10,37

*Pour n = 19, $k_{s,k} = 1,9415$ et $k_{s,mean} = 0,1579$

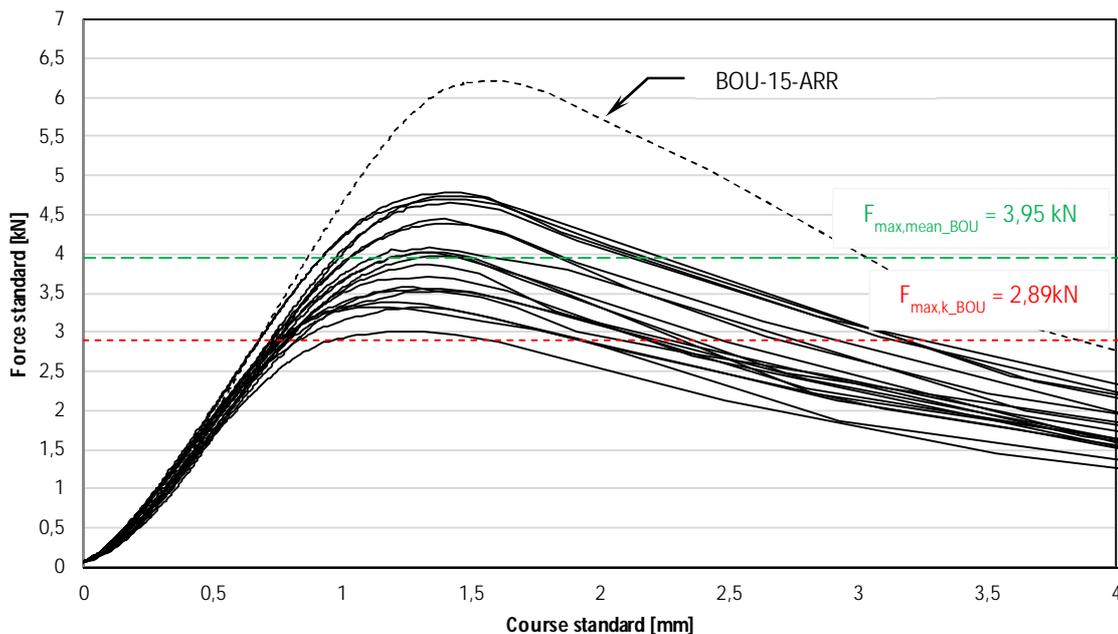


Figure 5-5 Synthèse des évolutions des efforts dans le bouleau en fonction du déplacement de la traverse

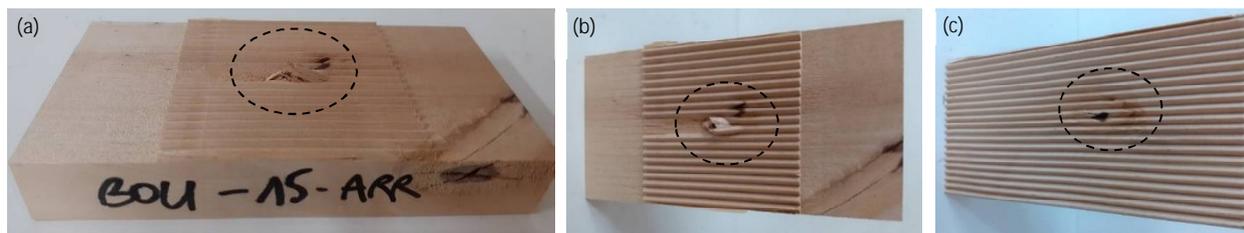


Figure 5-6 Epreuve BOU-15-ARR

Analyse de la raideur K_{SER}

Le jeu moyen de mise en œuvre dans les essais d'arrachement sur le bouleau est de 0,06 mm. Ce jeu est considéré comme très faible. Cependant une variabilité de 47 % est observable, causée par la variabilité du matériau bois d'une part, et par une mauvaise répétabilité de réalisation des éprouvettes (enfouissement de la vis \pm profond, \pm droit malgré l'usage d'un guide).

La raideur moyenne de la vis dans le bois est de 4130 N/mm, pour un coefficient de variabilité de 8,4 %.

Les données liées au jeu de mise en œuvre et à la raideur sont répertoriées dans le Tableau 5-15.

Tableau 5-15 Raideurs et jeux moyens obtenus pour les essais d'arrachement dans le bouleau

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART-TYPE	COV
K_{SER}	N/mm	3 490	5 104	4 130	346	8,4 %
JEU	mm	0,026	0,117	0,059	0,025	42,0 %

5.2.3 Résistance à l'arrachement de la vis dans le chêne

Chaque éprouvette a été pesée avant la réalisation de l'essai d'arrachement. Les masses volumiques et les longueurs d'enfoncement ont été répertoriées pour chaque éprouvette.

Une fois l'essai réalisé, et la vis retirée, l'humidité autour de la zone d'enfoncement a été relevée.

Les coefficients de variations sont respectivement de 3,3 % et de 2,3 % pour la masse volumique des éprouvettes et la teneur en eau autour de la zone d'enfoncement de la vis (voir Tableau 5-16). Ceci permet de conclure sur la faible variabilité des éprouvettes utilisées pour les essais d'arrachement dans le chêne.

Tableau 5-16 Synthèse de la masse volumique et de l'humidité dans les éprouvettes de chêne

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV
MASSE VOLUMIQUE DE L'EPROUVETTE	ρ kg/m^3	697	776	722	24	3,3 %
TENEUR EN EAU AUTOUR DE LA ZONE D'ENFONCEMENT	TH %	10,3	11,2	10,7	0,2	2,3 %

Analyse statistique des efforts mesurés dans le chêne

Les valeurs des moments à rupture ont été répertoriés lors des essais. Conformément à l'Annexe D de l'Eurocode 0 [2] et NF EN 14358 [4], il est possible de déterminer la valeur caractéristique de l'effort à rupture, et donc la résistance au cisaillement du bois. Cette résistance au cisaillement étant proportionnelle à la longueur d'enfoncement de la vis dans le bois, chaque longueur est répertoriée.

Les données ont été dépouillées en suivant une loi Log Normale.

Force maximale : F_{max,k_CHE} et $F_{max,mean_CHE}$

Le coefficient de variation V_x est supérieur à 10 %, k_n . Ce COV élevé s'explique par l'éprouvette CHE-12-ARR qui présente une forte valeur de résistance à l'arrachement (voir Figure 5-7). Cette forte résistance est en partie attribuable à la présence d'un nœud compact traversé par la vis.

La ressource en chêne disponible au LERMAB pour le projet *hardwood_joint*, présente de nombreux nœuds et autres défauts. Ainsi, afin d'être représentatif du lot étudié, la valeur obtenue par l'éprouvette CHE-12-ARR n'est pas exclue du dépouillement statistique. Un comparatif sera tout de même fait dans la synthèse des résultats pour quantifier l'influence d'une telle éprouvette.

L'effort maximal caractéristique F_{max,k_CHE} et l'effort maximal caractéristique moyen $F_{max,mean_CHE}$ s'exprime alors respectivement en équation (5-12) et (5-13). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 5-17, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5. L'intégralité des efforts mesurés lors de la campagne sont tracés en Figure 5-7.

$$F_{max,k_CHE} = \exp\left(m_{y_{\ln(F_{max_CHE})}} - k_{n=20,k} \times V_{x_{\ln(F_{max_CHE}-m_{y_CHE})}}\right) = \exp(1,83 - 1,9320 \times 0,14) = 4,76 \text{ kN} \quad (5-12)$$

et

$$F_{max,mean_CHE} = m_{y_{F_{max_CHE}}} - k_{n=20,mean} \times V_{x_{F_{max_CHE}}} = 6,27 - 0,1538 \times 0,88 = 6,14 \text{ kN} \quad (5-13)$$

Résistance au cisaillement : f_{v,k_CHE} et $f_{v,mean_CHE}$

Sur 20 éprouvettes, la longueur moyenne de pénétration de la vis dans le chêne est de $t_{pen,moy_CHE} = 23,6 \text{ mm}$, pour une longueur de pointe de 4 mm déduite de la longueur de pénétration. Soit, à titre indicatif, une surface cisailée moyenne de $S_{moy_CHE} = 371 \text{ mm}^2$.

De la même manière, la résistance caractéristiques au cisaillement f_{v,k_CHE} et la résistance moyenne au cisaillement $f_{v,mean_CHE}$ s'expriment respectivement grâce aux équations (5-14) et (5-15). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 5-12, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5.

$$f_{v,k_CHE} = \exp(m_{y \ln(f_{ax})} - k_{n=20,k} \times V_{x \ln(f_{ax}-my)^2}) = \exp(2,82 - 1,9320 \times 0,14) = 12,80 \text{ MPa} \quad (5-14)$$

et

$$f_{v,k,mean_CHE} = m_{y f_{ax}} - k_{n=20,mean} \times V_{x f_{ax}} = 16,92 - 0,1538 \times 2,51 = 16,53 \text{ MPa} \quad (5-15)$$

Tableau 5-17 Données – Déterminations des efforts et résistances au cisaillement caractéristiques et caractéristiques moyennes dans le chêne

	$m_{y \ln(F)}$	$V_{x \ln(F-my)^2}$	$m_{y F}$	$V_{x F}$
FORCE MAXIMALE	1,83	max{0,14; 0,05}	6,27	max{0,88; 0,31}
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	2,82	max{0,14 ; 0,05}	16,92	max{2,51 ; 0,85}

Synthèse des résultats d'arrachement dans le chêne

Tableau 5-18 Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le chêne, pour n = 20

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_K	X_{MEAN}
EFFORT MAX	$F_{max} \text{ kN}$	4,96	8,92	6,63	0,88	14,06 %	4,76	6,14
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	$f_v \text{ MPa}$	13,41	24,68	16,92	2,51	14,81 %	12,80	16,53

Si l'éprouvette CHE-12-ARR avait été rejetée lors du dépouillement, les valeurs finales auraient été définies pour un lot de 19 éprouvettes. Les résultats pour n = 19 sont répertoriés dans le Tableau 5-19 ci-dessous. La variation sur les valeurs caractéristiques et caractéristiques moyennes est inférieure à 5 % entre l'inclusion et l'exclusion de l'éprouvette CHE-12-ARR. Cette variation est négligeable.

Tableau 5-19 Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le chêne, pour n = 19

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_K^*	X_{MEAN}^*
EFFORT MAX	$F_{max} \text{ kN}$	4,96	6,97	6,13	0,64	10,45 %	4,96	6,03
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	$f_v \text{ MPa}$	13,41	19,06	16,51	1,76	10,67 %	13,28	16,23

*Pour n = 19, $k_{s,k} = 1,9415$ et $k_{s,mean} = 0,1579$

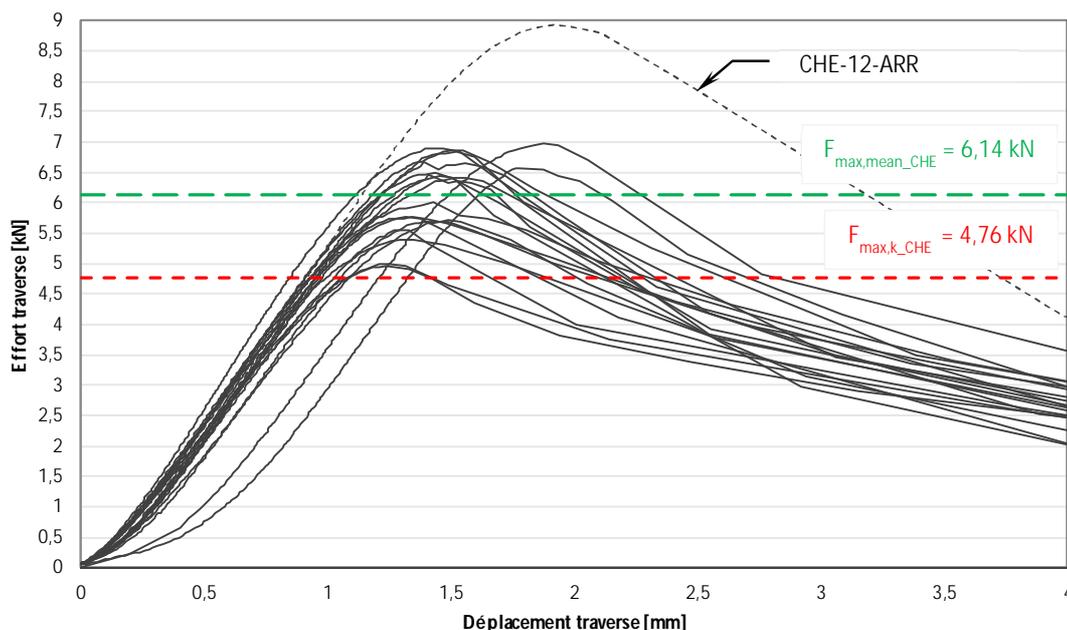


Figure 5-7 Synthèse des évolutions des efforts dans le chêne en fonction du déplacement de la traverse

Analyse de la raideur K_{SER}

Le jeu moyen de mise en œuvre dans les essais d'arrachement sur le chêne est de 0,10 mm. Ce jeu est considéré comme très faible. Cependant une variabilité de 69% est observable, causée par la variabilité du matériau bois d'une part, et par une mauvaise répétabilité de réalisation des éprouvettes (enfoncement de la vis \pm profond, \pm droit malgré l'usage d'un guide). La raideur moyenne de la vis dans le bois est de 5269 N/mm, pour un coefficient de variabilité de 8,0 %. Les données liées au jeu de mise en œuvre et à la raideur sont répertoriées dans le Tableau 5-20.

Tableau 5-20 Raideurs et jeux obtenus pour les essais d'arrachement dans le chêne

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART-TYPE	COV
K_{SER}	N/mm	4 296	5 945	5 269	422	8,0 %
JEU	mm	0,051	0,328	0,106	0,074	69,3 %

5.2.4 Résistance à l'arrachement de la vis dans le hêtre

Chaque éprouvette a été pesée avant la réalisation de l'essai d'arrachement. Les masses volumiques et les longueurs d'enfoncement ont été répertoriées pour chaque éprouvette. Une fois l'essai réalisé, et la vis retirée, l'humidité autour de la zone d'enfoncement a été relevée. Les coefficients de variations sont respectivement de 3,0 % et de 2,9 % pour la masse volumique des éprouvettes et la teneur en eau autour de la zone d'enfoncement de la vis (voir Tableau 5-21). Ceci permet de conclure sur la faible variabilité des éprouvettes utilisées pour les essais d'arrachement dans le hêtre.

Tableau 5-21 Synthèse de la masse volumique et de l'humidité dans les éprouvettes de hêtre

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV
MASSE VOLUMIQUE DE L'EPROU- VETTE	ρ kg/m^3	713	787	741	22	3,0 %
TENEUR EN EAU AUTOUR DE LA ZONE D'ENFONCEMENT	TH %	11,3	12,9	12,3	0,4	2,9 %

Analyse statistique des efforts maximaux mesurés

Les valeurs des efforts à rupture ont été répertoriés lors des essais. Conformément à l'Annexe D de l'Eurocode 0 [2] et NF EN 14358 [4], il est possible de déterminer la valeur caractéristique de l'effort à rupture, et donc la résistance au cisaillement du bois. Cette résistance au cisaillement étant proportionnelle à la longueur d'enfoncement de la vis dans le bois, chaque longueur est également répertoriée.

Les données ont été dépouillées en suivant une loi Log Normale.

Force maximale : F_{max,k_HET} et $F_{max,mean_HET}$

Tout calcul fait pour un nombre d'essai $n = 20$, le $COV_{F_{max,réel}} \approx 10\%$. Conformément à la NF EN 14358 [4], ceci permet de conclure sur la faible variabilité des essais d'arrachement, et donc de valider la quantité d'essais réalisé. L'effort maximal caractéristique F_{max,k_HET} et l'effort maximal caractéristique moyen $F_{max,mean_HET}$ s'exprime alors respectivement en équation (5-16) et (5-17).

Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 5-22, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5. L'intégralité des efforts mesurés lors de la campagne sont tracés en Figure 5-8.

$$F_{max,k_HET} = \exp(m_{y \ln(F_{max_HET})} - k_{n=20,k} \times V_{x \ln(F_{max_LVL-my_HET})}) = \exp(1,94 - 1,9320 \times 0,11) = 5,63 \text{ kN} \tag{5-16}$$

et

$$F_{max,mean_HET} = m_{y \ln(F_{max_HET})} - k_{n=20,mean} \times V_{x \ln(F_{max_HET})} = 7,01 - 0,1538 \times 0,74 = 6,90 \text{ kN} \tag{5-17}$$

Résistance au cisaillement : f_{v,k_HET} et $f_{v,mean_HET}$

Sur 20 éprouvettes, la longueur moyenne de pénétration de la vis dans le hêtre est de $t_{pen,moy_HET} = 24,0 \text{ mm}$, pour une longueur de pointe de 4 mm déduite de la longueur de pénétration. Soit, à titre indicatif, une surface cisailée moyenne de $S_{moy_HET} = 376 \text{ mm}^2$.

De la même manière, la résistance caractéristiques au cisaillement f_{v,k_HET} et la résistance moyenne au cisaillement $f_{v,mean_HET}$ s'expriment respectivement grâce aux équations (5-18) et (5-19). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 5-22, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5.

$$f_{v,k_HET} = \exp(m_{y \ln(f_{ax})} - k_{n=20,k} \times V_{x \ln(f_{ax-my})}) = \exp(2,92 - 1,9320 \times 0,10) = 15,28 \text{ MPa} \tag{5-18}$$

et

$$f_{v,k,mean_HET} = m_{y \ln(f_{ax})} - k_{n=20,mean} \times V_{x \ln(f_{ax})} = 18,61 - 0,1538 \times 1,77 = 18,34 \text{ MPa} \tag{5-19}$$

Tableau 5-22 Données – Déterminations des résistances au cisaillement caractéristiques et caractéristiques moyennes dans le hêtre

	$m_{y \ln(f)}$	$V_{x \ln(f-my)}$	$m_{y f}$	$V_{x f}$
FORCE MAXIMALE	1,94	max{0,11 ; 0,05}	7,01	max{0,74 ; 0,35}
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	2,92	max{0,10 ; 0,05}	18,61	max{1,77 ; 0,93}

Synthèse des résultats d'arrachement dans le hêtre

Tableau 5-23 Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le hêtre

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_K	X_{MEAN}
EFFORT MAX	F_{max} kN	5,64	8,35	7,01	0,74	10,59 %	5,63	6,90
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	f_v MPa	15,03	21,70	18,61	1,77	9,51 %	15,28	18,34

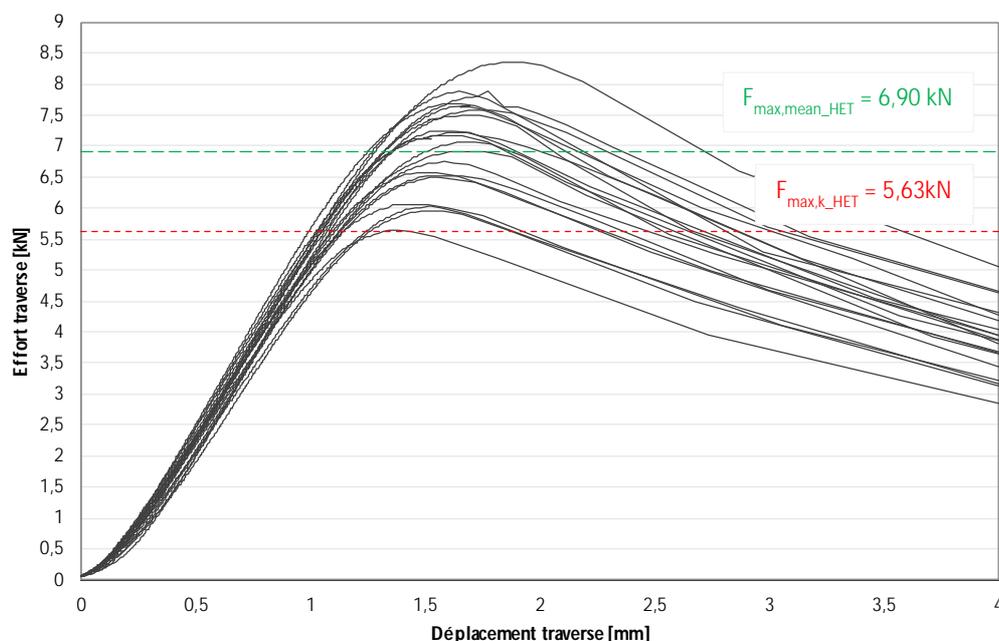


Figure 5-8 Synthèse des évolutions des efforts dans le hêtre en fonction du déplacement de la traverse

Analyse de la raideur K_{SER}

Le jeu moyen de mise en œuvre dans les essais d'arrachement sur le hêtre est de 0,09 mm. Ce jeu est considéré comme très faible. Cependant une variabilité de 27 % est observable, causée par la variabilité du matériau bois d'une part, et par une mauvaise répétabilité de réalisation des éprouvettes (enfoncement de la vis \pm profond, \pm droit malgré l'usage d'un guide).

La raideur moyenne de la vis dans le bois est de 5539 N/mm, pour un coefficient de variabilité de 6,4 %.

Les données liées au jeu de mise en œuvre et à la raideur sont répertoriées dans le Tableau 5-24.

Tableau 5-24 Raideurs et jeux obtenus pour les essais d'arrachement dans le hêtre

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART-TYPE	COV
K_{SER}	N/mm	4753	6043	5539	355	6,4 %
JEU	mm	0,064	0,158	0,090	0,025	27,2 %

6 Résultats arrachement double

6.1 Détermination de la résistance à l'arrachement en fonction des distances aux bords

Les efforts théoriques de rupture sont fonction de la vis et de l'essence étudiées. Pour une même vis et un même effort, chaque essence de bois aura sa propre réponse face à une sollicitation de type arrachement.

Cette réponse est fonction de la résistance au cisaillement du bois, et donc de sa masse volumique.

6.1.1 Résistance théorique à l'arrachement du filet de deux vis dans le bois

La charge maximale estimée est issue des résultats des essais d'arrachement simple. La précédente campagne d'essai montre la résistance à l'arrachement d'une vis sollicité en traction dans le LVL de hêtre, le bouleau, le chêne et le hêtre. L'effort estimé F_{est} correspondra au double de l'effort en arrachement simple.

Tableau 6-1 Résistance théorique à l'arrachement de deux vis

		UNITÉ	LVL DE HETRE	BOULEAU	CHÊNE	HÊTRE
EFFORT MAX CARACTERISTIQUE EN ARRACHEMENT SIMPLE	$F_{max,k,1}$	kN	5,73	2,89 (2,97)*	4,76 (4,96)*	5,63
EFFORT MAX MOYEN EN ARRACHEMENT SIMPLE	$F_{max,k,mean,1}$	kN	6,74	3,95 (3,86)*	6,14 (6,03)*	6,90
EFFORT À RUPTURE ESTIMÉ EN ARRACHEMENT DOUBLE	F_{est}	kN	≈ 14,0	≈ 4,0	≈ 12,0	≈ 14,0

6.1.2 Méthodes : essais d'arrachement, dépouillement et analyse statistique

Les essais d'arrachement sont réalisés sur la MEUZ. Le programme est réalisé directement sur le logiciel de la MEUZ, et validé suite aux pré-essais d'arrachement. Une fois les essais réalisés, un dépouillement automatique suivi d'une analyse statistique sont réalisés pour déterminer la résistance à l'arrachement de la vis Würth ASSY3.0 Ø5,0*80/72 dans le chêne, le hêtre, le bouleau et le LVL de hêtre.

Dépouillement

Le programme Excel réalisé pour le dépouillement automatique des essais d'arrachement simple est réutilisé pour le dépouillement des données des essais d'arrachement double.

Une feuille Excel sert de répertoire pour les données liées aux éprouvettes avant essai (dimensions, masse, longueurs d'enfoncement des vis, humidité).

Chaque série d'essais est dépouillée en suivant l'étude statistique imposée par la norme NF EN 14358 [4]. Cette étude est décrite dans le protocole d'essai. Pour rappel, les facteurs k nécessaires au dépouillement pour un nombre de $n_{\text{essai}} = 15$ sont répertoriés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6-2 Valeurs du facteur k pour les propriétés de rigidités

NOMBRE D'ESSAI	$k_{s,k}(n)^*$	$k_{s,\text{mean}}(n)^*$
15	1,9908	0,1788
14	2,0072	0,1854

* k_s , selon NF EN 14358

6.2 Résultats : résistance à l'arrachement des vis en configuration 1

Pour chaque campagne d'essai, l'effort maximal mesuré a été répertorié. Une analyse statistique a été réalisée pour chaque essence, permettant de déterminer la valeur caractéristique de la résistance à l'arrachement, conformément à l'annexe D7 de l'ECO [5, p. 0] et la norme NF EN 14358 [4].

Chaque éprouvette a été pesée avant la réalisation de l'essai d'arrachement. Les masses volumiques et les longueurs d'enfoncement ont été répertoriées pour chaque éprouvette en annexes.

Une fois l'essai réalisé, et les vis retirées, l'humidité autour de la zone d'enfoncement a été relevée, comme décrit en *Partie 0*, répertoriée dans les annexes. Cette humidité servira à corriger au besoin la valeur caractéristique obtenue.

Rappel de la configuration 1

La première configuration a pour objectif de quantifier l'influence de la proximité des vis entre elles. Les vis sont donc placées en pleine matière, éloignées des bords de l'éprouvette. L'emplacement des vis dans l'éprouvettes est illustrée en Figure 6-1 et définis dans le Tableau 6-3.

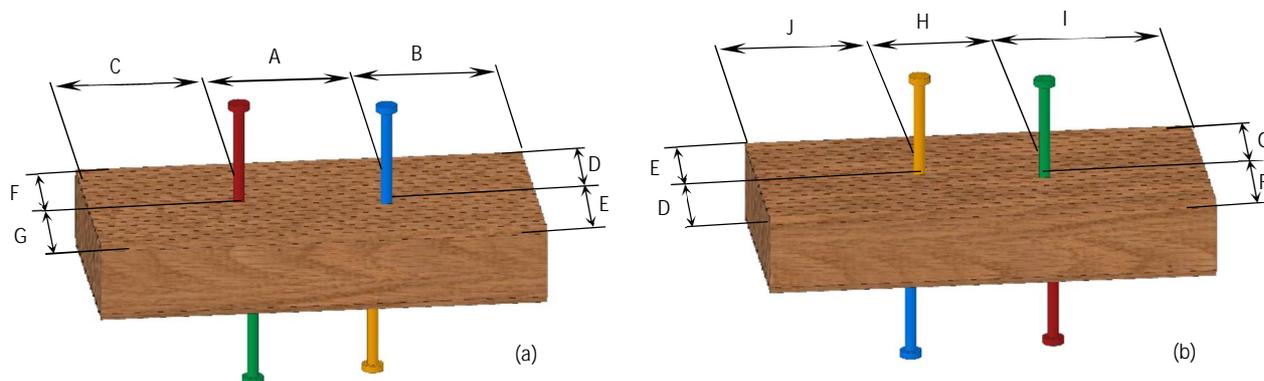


Figure 6-1 Représentation des configurations testées en arrachement double, face A (a) et face B (b)

Tableau 6-3 Caractéristiques dimensionnelles des éprouvettes en configuration 1

	UNITÉ	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
CONGIF 1	mm	65	67,5	67,5	65	55	55	65	55	72,5	72,5

6.2.1 Résistance à l'arrachement des vis dans le LVL de hêtre

Les coefficients de variations sont respectivement de 1,71 % et de 1,52 % pour la masse volumique des éprouvettes et la teneur en eau autour de la zone d'enfoncement de la vis. Ceci permet de conclure sur la faible variabilité des éprouvettes utilisées pour les essais d'arrachement dans le LVL de hêtre.

Tableau 6-4 C1 - Synthèse de la masse volumique et de l'humidité dans les éprouvettes de LVL

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV
MASSE VOLUMIQUE DE L'ÉPROUVETTE	ρ kg/m^3	769	856	832	23	2,71 %
TENEUR EN EAU AUTOUR DE LA ZONE D'ENFONCEMENT	TH %	6,25	6,56	6,42	0,10	1,52 %

Analyse statistique des efforts mesurés dans le LVL

Les valeurs des moments à rupture ont été répertoriés lors des essais. Conformément à l'Annexe D de l'Eurocode 0 [2] et NF EN 14358 [4], il est possible de déterminer la valeur caractéristique de l'effort à rupture, et donc la résistance au cisaillement du bois. Cette résistance au cisaillement étant proportionnelle à la longueur d'enfoncement de la vis dans le bois, chaque longueur fut également répertoriée.

Les données ont été dépouillées en suivant une loi Log Normale.

Force maximale : F_{max,k_LVL_C1} et $F_{max,mean_LVL_C1}$

Tout calcul fait pour un nombre d'essai $n = 15$, le $COV_{F_{max,r\acute{e}el}} < 10\%$. Conformément à la NF EN 14358 [4], ceci permet de conclure sur la faible variabilité des essais d'arrachement, et donc de valider la quantité d'essais réalisés. L'effort maximal caractéristique F_{max,k_LVL_C1} et l'effort maximal caractéristique moyen $F_{max,mean_LVL_C1}$ s'exprime alors respectivement en équation (6-1) et (6-2). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-5, et les valeurs des facteurs k sont rappelées dans le Tableau 4-5.

$$F_{max,k_LVL_C1} = \exp\left(m_{y_{\ln(F_{max_LVL})}} - k_{n=15,k} \times V_{x_{\ln(F_{max_LVL}-m_{y_{\ln(F_{max_LVL})}})}}\right) = \exp(2,61 - 1,9908 \times 0,077) = 11,67 kN \quad (6-1)$$

et

$$F_{max,mean_LVL_C1} = m_{y_{F_{max_LVL}}} - k_{n=15,mean} \times V_{x_{F_{max_LVL}}} = 13,61 - 0,1788 \times 1,03 = 13,43 kN \quad (6-2)$$

Résistance au cisaillement : f_{v,k_LVL_C1} et $f_{v,mean_LVL_C1}$

Sur 15 éprouvettes, la longueur moyenne de pénétration de la vis dans le LVL de hêtre est de $t_{pen,moy_LVL_C1} = 22,3 mm$, pour une longueur de pointe de 4 mm déduite de la longueur de pénétration. Soit, à titre indicatif, une surface cisailée moyenne de $S_{moy_LVL_C1} = 351 mm^2$.

De la même manière, la résistance caractéristique au cisaillement f_{v,k_LVL_C1} et la résistance moyenne au cisaillement $f_{v,mean_LVL_C1}$ s'expriment respectivement grâce aux équations (6-3) et (6-4). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-5, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5.

$$f_{v,k_LVL_C1} = \exp\left(m_{y_{\ln(f_{ax})}} - k_{n=15,k} \times V_{x_{\ln(f_{ax}-m_{y_{\ln(f_{ax})}})}}\right) = \exp(3,66 - 1,9908 \times 0,078) = 33,27 MPa \quad (6-3)$$

et

$$f_{v,k,mean_LVL} = m_{y_{f_{ax}}} - k_{n=20,mean} \times V_{x_{f_{ax}}} = 38,81 - 0,1788 \times 2,94 = 38,28 MPa \quad (6-4)$$

Tableau 6-5 C1 - Données – Déterminations des efforts et résistances au cisaillement caractéristiques et caractéristiques moyennes dans le LVL

	$m_{y_{ln(r)}}$	$V_{X_{ln(r-my)^2}}$	m_{y_r}	V_{x_r}
FORCE MAXIMALE	2,61	max{0,077 ; 0,05}	13,61	max{1,03 ; 0,68 }
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	3,66	max{0,078 ; 0,05}	38,81	max{2,94 ; 1,94 }

Synthèse des résultats d'arrachement dans le LVL

Une faible variabilité des efforts à rupture est observée (voir COV en Tableau 6-6 et Figure 6-2), cependant différents mode de rupture sont visibles sur le lot d'éprouvettes étudiées (voir Figure 6-3). La sollicitation en traction des vis entraîne une rupture partielle voire totale de l'éprouvette le long du pli transverse.

Tableau 6-6 C1 - Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le LVL

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_K	X_{MEAN}
EFFORT MAX	F_{max} kN	11,71	15,15	13,61	1,03	7,55 %	11,67	13,43
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	f_v MPa	32,79	42,91	38,81	2,94	7,57 %	32,27	38,28

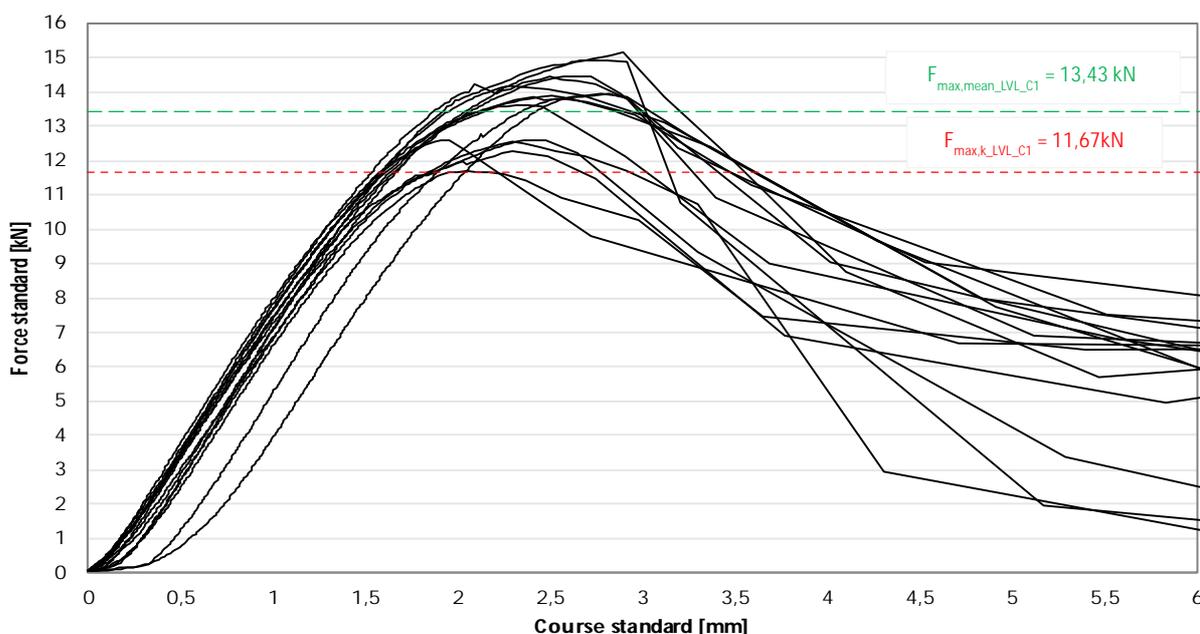


Figure 6-2 C1 - Synthèse des évolutions des efforts dans le LVL de hêtre en fonction du déplacement de la traverse

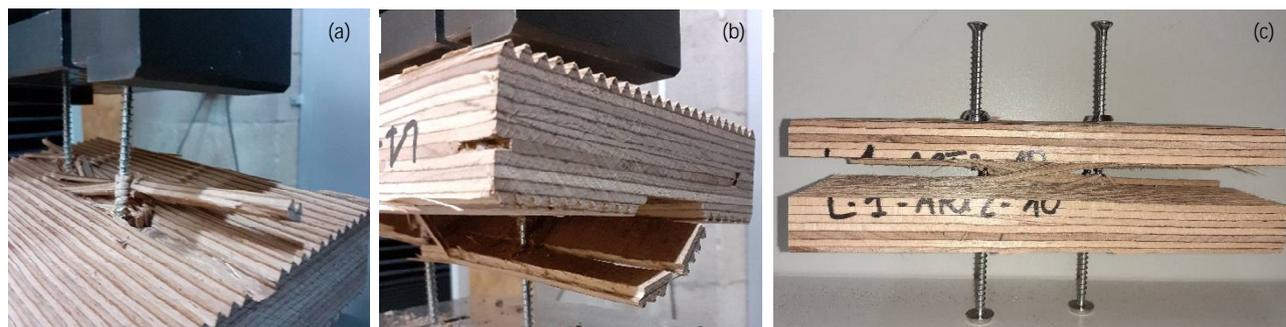


Figure 6-3 C1 – Modes de ruptures observés sur le LVL : arrachement (a), rupture partiel du pli transverse (b), rupture de l'éprouvette (c)

6.2.2 Analyse de la raideur K_{SER}

Le jeu moyen de mise en œuvre dans les essais d'arrachement sur le LVL de hêtre est de 0,149 mm. Ce jeu est considéré comme très faible. Cependant une variabilité de 77,27 % est observable, causée par la variabilité du matériau bois d'une part, et par une mauvaise répétabilité de réalisation des éprouvettes (enfoncement de la vis \pm profond, \pm droit malgré l'usage d'un guide).

La raideur moyenne de la vis dans le bois est de 8212 N/mm, pour un coefficient de variabilité de 4,18 %.

Les données liées au jeu de mise en œuvre et à la raideur sont répertoriées dans le Tableau 6-7.

Tableau 6-7 C1 - Raideurs et jeux obtenus pour les essais d'arrachement dans le LVL de hêtre

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART-TYPE	COV
K_{SER}	N/mm	7512	8741	8212	343	4,18 %
JEU	mm	0,062	0,457	0,149	0,115	77,27 %

6.2.3 Résistance à l'arrachement des vis dans le bouleau

Les coefficients de variations sont respectivement de 10,06 % et de 2,17 % pour la masse volumique des éprouvettes et la teneur en eau autour de la zone d'enfoncement de la vis (voir Tableau 6-8). Ceci permet de conclure sur la faible variabilité des éprouvettes utilisées pour les essais d'arrachement dans le bouleau.

Tableau 6-8 C1 - Synthèse de la masse volumique et de l'humidité dans les éprouvettes de bouleau

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV
MASSE VOLUMIQUE DE L'EPROUVETTE	ρ kg/m^3	520	675	618	62	10,06 %
TENEUR EN EAU AUTOUR DE LA ZONE D'ENFONCEMENT	TH %	10,37	11,25	10,85	0,24	2,17 %

Analyse statistique des efforts mesurés dans le bouleau

Les valeurs des moments à rupture ont été répertoriés lors des essais. Conformément à l'Annexe D de l'Eurocode 0 [2] et NF EN 14358 [4], il est possible de déterminer la valeur caractéristique de l'effort à rupture, et donc la résistance au cisaillement du bois. Cette résistance au cisaillement étant proportionnelle à la longueur d'enfoncement de la vis dans le bois, chaque longueur fut également répertoriée.

Les données ont été dépouillées en suivant une loi Log Normale.

Force maximale : F_{max,k_BOU_C1} et $F_{max,mean_BOU_C1}$

Tout calcul fait pour un nombre d'essai $n = 15$, le $COV_{F_{max,r\acute{e}el}} > 10 \%$. Conformément à la NF EN 14358 [4], ceci met en évidence une forte variabilité du lot testé. Aucune éprouvette ne sort pourtant du lot (voir Figure 5-5). Cette forte variabilité est explicable par les caractéristiques de la ressource : présence de nombreux nœuds et de bois juvénile (cœur). Ainsi, afin d'être au plus proche de la réalité de la ressource, aucune éprouvette ne sera exclue des résultats.

L'effort maximal caractéristique F_{max,k_BOU_C1} et l'effort maximal caractéristique moyen $F_{max,mean_BOU_C1}$ s'exprime alors respectivement en équation (6-5) et (6-6). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-9, et les valeurs des facteurs k sont rappelées dans le Tableau 4-5.

$$F_{max,k_BOU_C1} = \exp(m_{y \ln(F_{max_BOU})} - k_{n=15,k} \times V_{X \ln(F_{max_BOU}-m_{y \ln(F_{max_BOU})})}) = \exp(2,21 - 1,9908 \times 0,144) = 6,86 kN \quad (6-5)$$

et

$$F_{max,mean_BOU_C1} = m_{y \ln(F_{max_BOU})} - k_{n=15,mean} \times V_{X \ln(F_{max_BOU})} = 9,23 - 0,1788 \times 1,28 = 13,43 kN \quad (6-6)$$

Résistance au cisaillement : f_{v,k_BOU_C1} et $f_{v,mean_BOU_C1}$

Sur 15 éprouvettes, la longueur moyenne de pénétration de la vis dans le bouleau est de $t_{pen,moy_BOU_C1} = 28,1 mm$, pour une longueur de pointe de 4 mm déduite de la longueur de pénétration. Soit, à titre indicatif, une surface cisailée moyenne de $S_{moy_BOU_C1} = 441 mm^2$.

De la même manière, la résistance caractéristiques au cisaillement f_{v,k_BOU_C1} et la résistance moyenne au cisaillement $f_{v,mean_BOU_C1}$ s'expriment respectivement grâce aux équations (6-7) et (6-8). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-9, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5.

$$f_{v,k_BOU_C1} = \exp(m_{y \ln(f_{ax})} - k_{n=15,k} \times V_{X \ln(f_{ax}-m_{y \ln(f_{ax})})}) = \exp(3,03 - 1,9908 \times 0,143) = 15,58 MPa \quad (6-7)$$

et

$$f_{v,k,mean_BOU_C1} = m_{y \ln(f_{ax})} - k_{n=15,mean} \times V_{X \ln(f_{ax})} = 20,92 - 0,1788 \times 2,89 = 20,40 MPa \quad (6-8)$$

Tableau 6-9 C1 - Données – Déterminations des efforts résistances au cisaillement caractéristiques et caractéristiques moyennes dans le bouleau

	$m_{y \ln(F)}$	$V_{X \ln(F-my)}$	m_{y_F}	V_{X_F}
FORCE MAXIMALE	2,21	max{0,144 ; 0,05}	9,23	max{1,28 ; 0,46}
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	3,03	max{0,143 ; 0,05}	20,92	max{2,89 ; 1,05}

Synthèse des résultats d'arrachement dans le bouleau

Le bouleau présente plusieurs zones de fragilités : son « cœur rouge » et les nombreux nœuds présents. La sollicitation en traction des vis entraîne donc différents modes de rupture selon les éprouvettes : rupture par arrachement des vis, fendage le long d'un nœud, arrachement du cœur (voir Figure 6-5).

Tableau 6-10 C1 - Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le bouleau

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_K	X_{MEAN}
EFFORT MAX	F_{max} kN	7,17	10,80	9,23	1,28	13,90 %	6,86	9,00
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	f_v MPa	16,26	24,56	20,92	2,89	13,83 %	15,58	20,40

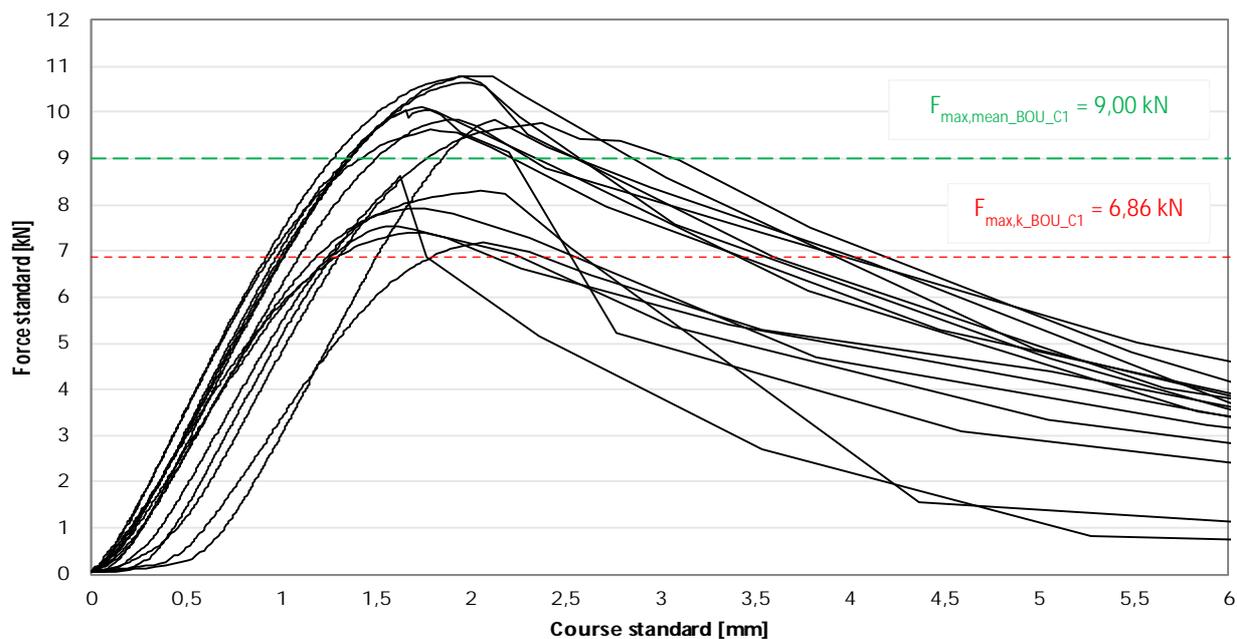


Figure 6-4 C1 - Synthèse des évolutions des efforts dans le bouleau en fonction du déplacement de la traverse

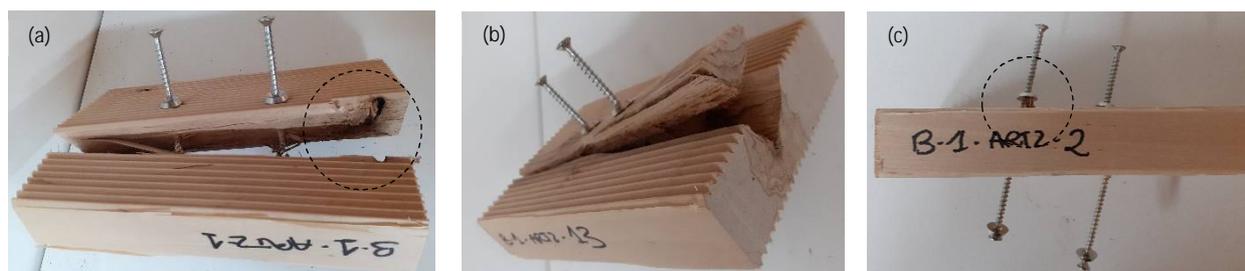


Figure 6-5 C1 – Modes de ruptures observés dans le bouleau : fendage le long du nœud (a), arrachement cohésif du cœur (b), arrachement (c)

Analyse de la raideur K_{ser}

Le jeu moyen de mise en œuvre dans les essais d'arrachement sur le bouleau est de 0,179 mm. Ce jeu est considéré comme très faible. Cependant une variabilité de 85,57 % est observable, causée par la variabilité du matériau bois d'une part, et par une mauvaise répétabilité de réalisation des éprouvettes (enfoncement de la vis \pm profond, \pm droit malgré l'usage d'un guide).

La raideur moyenne de la vis dans le bois est de 7171 N/mm, pour un coefficient de variabilité de 9,30 %.

Les données liées au jeu de mise en œuvre et à la raideur sont répertoriées dans le Tableau 6-11.

Tableau 6-11 C1 - Raideurs et jeux obtenus pour les essais d'arrachement dans le bouleau

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART-TYPE	COV
K_{SER}	N/mm	5671	8164	7171	667	9,30 %
JEU	mm	0,050	0,565	0,179	0,153	85,57 %

6.2.4 Résistance à l'arrachement des dans le chêne

Les coefficients de variations sont respectivement de 5,05 % et de 2,21 % pour la masse volumique des éprouvettes et la teneur en eau autour de la zone d'enfoncement de la vis (voir Tableau 5-16). Ceci permet de conclure sur la faible variabilité des éprouvettes utilisées pour les essais d'arrachement dans le chêne.

Tableau 6-12 Synthèse de la masse volumique et de l'humidité dans les éprouvettes de chêne

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV
MASSE VOLUMIQUE DE L'EPROU- VETTE	ρ kg/m^3	718	843	767	39	5,05%
TENEUR EN EAU AUTOUR DE LA ZONE D'ENFONCEMENT	TH %	11,51	12,67	12,16	0,27	2,21%

Analyse statistique des efforts mesurés dans le chêne

Les valeurs des moments à rupture ont été répertoriés lors des essais. Conformément à l'Annexe D de l'Eurocode 0 [2] et NF EN 14358 [4], il est possible de déterminer la valeur caractéristique de l'effort à rupture, et donc la résistance au cisaillement du bois. Cette résistance au cisaillement étant proportionnelle à la longueur d'enfoncement de la vis dans le bois, chaque longueur fut également répertoriées.

Les données ont été dépouillées en suivant une loi Log Normale.

Force maximale : F_{max,k_CHE_C1} et $F_{max,mean_CHE_C1}$

Tout calcul fait pour un nombre d'essais $n = 15$, le $COV_{F_{max,réel}} > 10\%$. Conformément à la NF EN 14358 [4], ceci met en évidence une forte variabilité du lot testé. En effet, l'éprouvette CHE-1-ART2-1 présente un effort à rupture de 5,5 kN quand la moyenne des efforts relevées est de 14,6 kN (voir Tableau 6-14). Cette éprouvette est exclue de l'étude statistique, et sa rupture est illustrée en Figure 6-7.

Une fois exclue, la moyenne des efforts à ruptures mesurés devient 15,3 kN, pour un COV de 13,32 %.

Le nombre d'essai passant à $n = 14$, les facteurs k varient (voir Tableau 4-5).

$$F_{max,k_CHE_C1} = \exp(m_{y_{\ln(F_{max_CHE})}} - k_{n=14,k} \times V_{x_{\ln(F_{max_CHE}-m_{y_CHE})}}) = \exp(2,72 - 2,0072 \times 0,133) = 11,59 kN \quad (6-9)$$

et

$$F_{max,mean_CHE_C1} = m_{y_{F_{max_CHE}}} - k_{n=14,mean} \times V_{x_{F_{max_CHE}}} = 15,25 - 0,1854 \times 2,03 = 14,88 kN \quad (6-10)$$

Résistance au cisaillement : f_{v,k_CHE_C1} et $f_{v,mean_CHE_C1}$

Sur 14 éprouvettes, la longueur moyenne de pénétration de la vis dans le chêne est de $t_{pen,moy_CHE_C1} = 28,1$ mm, pour une longueur de pointe de 4 mm déduite de la longueur de pénétration. Soit, à titre indicatif, une surface cisailée moyenne de $S_{moy_CHE_C1} = 441$ mm².

De la même manière, la résistance caractéristiques au cisaillement f_{v,k_CHE_C1} et la résistance moyenne au cisaillement $f_{v,mean_CHE_C1}$ s'expriment respectivement grâce aux équations (6-11) et (6-12). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-13, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5.

$$f_{v,k_CHE_C1} = \exp(m_{y_{\ln(f_{ax})}} - k_{n=14,k} \times V_{x_{\ln(f_{ax}-m_{y})}}) = \exp(3,53 - 2,0072 \times 0,133) = 26,28 MPa \quad (6-11)$$

et

$$f_{v,k,mean_CHE_C1} = m_{y_{f_{ax}}} - k_{n=14,mean} \times V_{x_{f_{ax}}} = 34,56 - 0,1854 \times 4,60 = 33,71 \text{ MPa} \quad (6-12)$$

Tableau 6-13 C1 - Données – Déterminations des efforts résistances au cisaillement caractéristiques et caractéristiques moyennes dans le chêne

	$m_{y_{ln(F)}}$	$V_{x_{ln(F-m)}}$	m_{y_F}	V_{x_F}
FORCE MAXIMALE	2,72	max{0,133 ; 0,05}	15,25	max{2,03 ; 0,76}
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	3,53	max{0,133 ; 0,05}	34,56	max{4,60 ; 1,73}

Synthèse des résultats d'arrachement dans le chêne

Tableau 6-14 C1 - Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le chêne, pour n = 15

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_K	X_{MEAN}
EFFORT MAX	F_{max} kN		18,80				7,92	14,03
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	f_v MPa		42,85				18,00	31,80

Tableau 6-15 C1 - Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le chêne, pour n = 14

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_K	X_{MEAN}
EFFORT MAX	F_{max} kN	12,08	18,80	15,25	2,03	13,32 %	11,59	14,88
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	f_v MPa	27,40	42,85	34,56	4,60	13,30 %	26,28	33,71

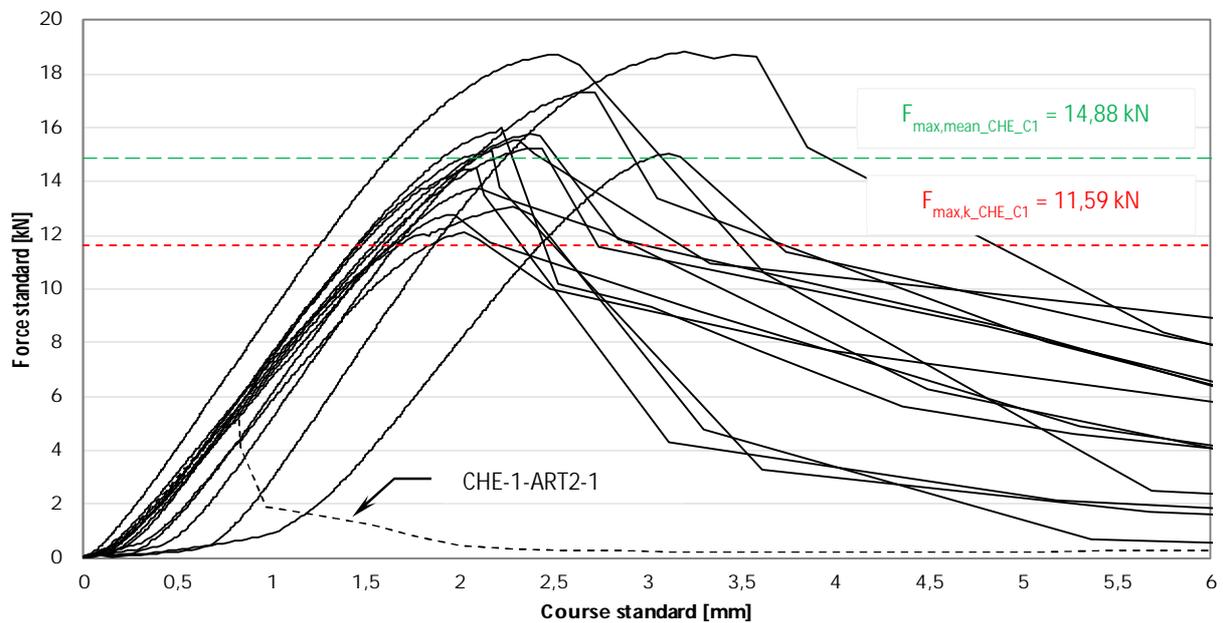


Figure 6-6 Synthèse des évolutions des efforts dans le chêne en fonction du déplacement de la traverse

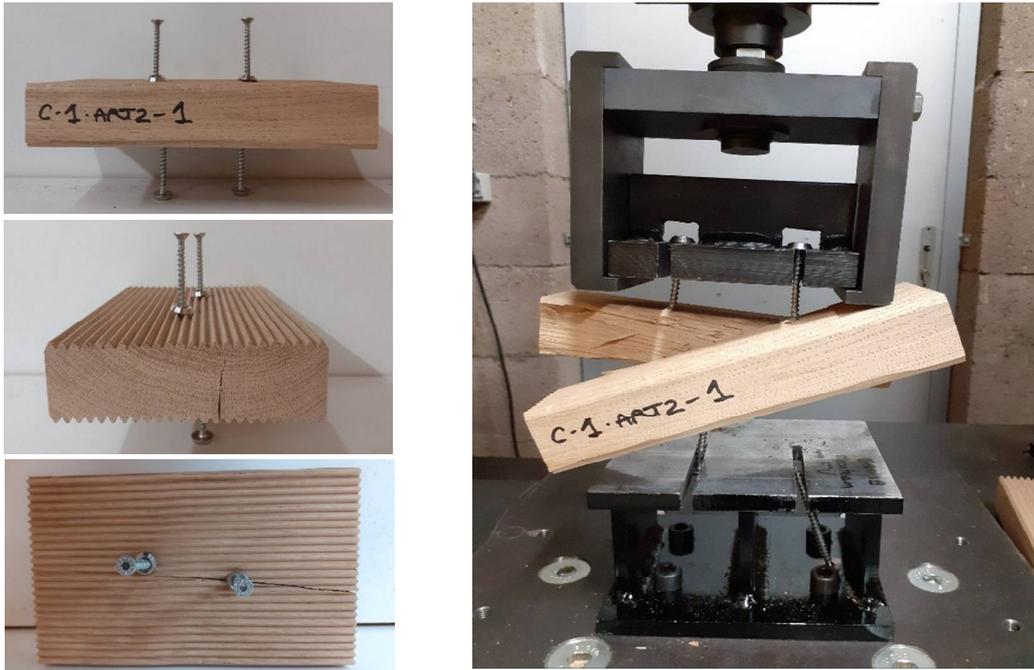


Figure 6-7 Epreuve CHE-1-ART2-1

Analyse de la raideur K_{SER}

Le jeu moyen de mise en œuvre dans les essais d'arrachement sur le chêne est de 0,302 mm. Ce jeu est considéré comme très faible. Cependant une variabilité de 83,37 % est observable, causée par la variabilité du matériau bois d'une part, et par une mauvaise répétabilité de réalisation des éprouvettes (enfoncement de la vis \pm profond, \pm droit malgré l'usage d'un guide).

La raideur moyenne de la vis dans le bois est de 8829 N/mm, pour un coefficient de variabilité de 9,23 %.

Les données liées au jeu de mise en œuvre et à la raideur sont répertoriées dans le Tableau 6-16.

Tableau 6-16 C1 - Raideurs et jeux obtenus pour les essais d'arrachement dans le chêne

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART-TYPE	COV
K_{SER}	N/mm	7557	9995	8829	815	9,23 %
JEU	mm	0,082	0,967	0,302	0,252	83,37 %

6.2.5 Résistance à l'arrachement des vis dans le hêtre

Les coefficients de variations sont respectivement de 11,02 % et de 6,93 % pour la masse volumique des éprouvettes et la teneur en eau autour de la zone d'enfoncement de la vis (voir Tableau 5-21). Ceci permet de conclure sur la faible variabilité des éprouvettes utilisées pour les essais d'arrachement dans le hêtre.

Tableau 6-17 Synthèse de la masse volumique et de l'humidité dans les éprouvettes de hêtre

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV
MASSE VOLUMIQUE DE L'ÉPROUVETTE	ρ kg/m^3	442	777	723	80	11,02%
TENEUR EN EAU AUTOUR DE LA ZONE D'ENFONCEMENT	TH %	10,02	12,20	10,89	0,75	6,93%

Analyse statistique des efforts maximaux mesurés

Les valeurs des moments à rupture ont été répertoriés lors des essais. Conformément à l'Annexe D de l'Eurocode 0 [2] et NF EN 14358 [4], il est possible de déterminer la valeur caractéristique de l'effort à rupture, et donc la résistance au cisaillement du bois. Cette résistance au cisaillement étant proportionnelle à la longueur d'enfoncement de la vis dans le bois, chaque longueur fut également répertoriées.

Afin d'exclure les valeurs négatives, les données ont été dépouillées en suivant une loi Log Normale.

Force maximale : F_{max,k_HET_C1} et $F_{max,mean_HET_C1}$

Tout calcul fait pour un nombre d'essai $n = 15$, le $COV_{F_{max,r\acute{e}el}} \approx 10\%$. Conformément à la NF EN 14358 [4], ceci permet de conclure sur la faible variabilité des essais d'arrachement, et donc de valider la quantité d'essais réalisés. L'effort maximal caractéristique F_{max,k_HET_C1} et l'effort maximal caractéristique moyen $F_{max,mean_HET_C1}$ s'exprime alors respectivement en équation (6-13) et (6-14). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-18, et les valeurs des facteurs k sont rappelées dans le Tableau 4-5.

$$F_{max,k_HET_C1} = \exp\left(m_{y_{\ln(F_{max_HET})}} - k_{n=15,k} \times V_{x_{\ln(F_{max_LVL-my_HET})}}\right) = \exp(2,62 - 1,9908 \times 0,109) = 11,02kN \quad (6-13)$$

et

$$F_{max,mean_HET_C1} = m_{y_{F_{max_HET}}} - k_{n=15,mean} \times V_{x_{F_{max_HET}}} = 13,78 - 0,1788 \times 1,53 = 13,51kN \quad (6-14)$$

Résistance au cisaillement : f_{v,k_HET_C1} et $f_{v,mean_HET_C1}$

Sur 15 éprouvettes, la longueur moyenne de pénétration de la vis dans le hêtre est de $t_{pen,moy_HET_C1} = 22,2\text{ mm}$, pour une longueur de pointe de 4 mm déduite de la longueur de pénétration. Soit, à titre indicatif, une surface cisailée moyenne de $S_{moy_HET_C1} = 349\text{ mm}^2$.

De la même manière, la résistance caractéristiques au cisaillement f_{v,k_HET_C1} et la résistance moyenne au cisaillement $f_{v,mean_HET_C1}$ s'expriment respectivement grâce aux équations (6-15) et (6-16). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-18, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5.

$$f_{v,k_HET_C1} = \exp\left(m_{y_{\ln(f_{ax})}} - k_{n=15,k} \times V_{x_{\ln(f_{ax}-my)}}\right) = \exp(3,67 - 1,9908 \times 0,108) = 31,69MPa \quad (6-15)$$

et

$$f_{v,mean_HET_C1} = m_{y_{f_{ax}}} - k_{n=15,mean} \times V_{x_{f_{ax}}} = 39,52 - 0,1788 \times 4,32 = 38,75MPa \quad (6-16)$$

Tableau 6-18 C1 - Données – Déterminations des efforts résistances au cisaillement caractéristiques et caractéristiques moyennes dans le hêtre

	$m_{y_{ln(F)}}$	$V_{X_{ln(F-my)}}$	m_{y_F}	V_{x_F}
FORCE MAXIMALE	2,62	max{0,109 ; 0,05}	13,78	max{1,53 ; 0,69}
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	3,67	max{0,108 ; 0,05}	39,52	max{4,32 ; 1,98}

Synthèse des résultats d'arrachement dans le hêtre

L'intégralité des éprouvettes de hêtre en configuration 1 ont présenté une rupture en arrachement des vis (voir Figure 6-9).

Tableau 6-19 C1 - Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le hêtre

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_K	X_{MEAN}
EFFORT MAX	F_{max} kN	11,30	17,26	13,78	1,53	11,09 %	11,02	13,51
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	f_v MPa	32,21	49,10	39,52	4,32	10,93 %	31,69	38,75

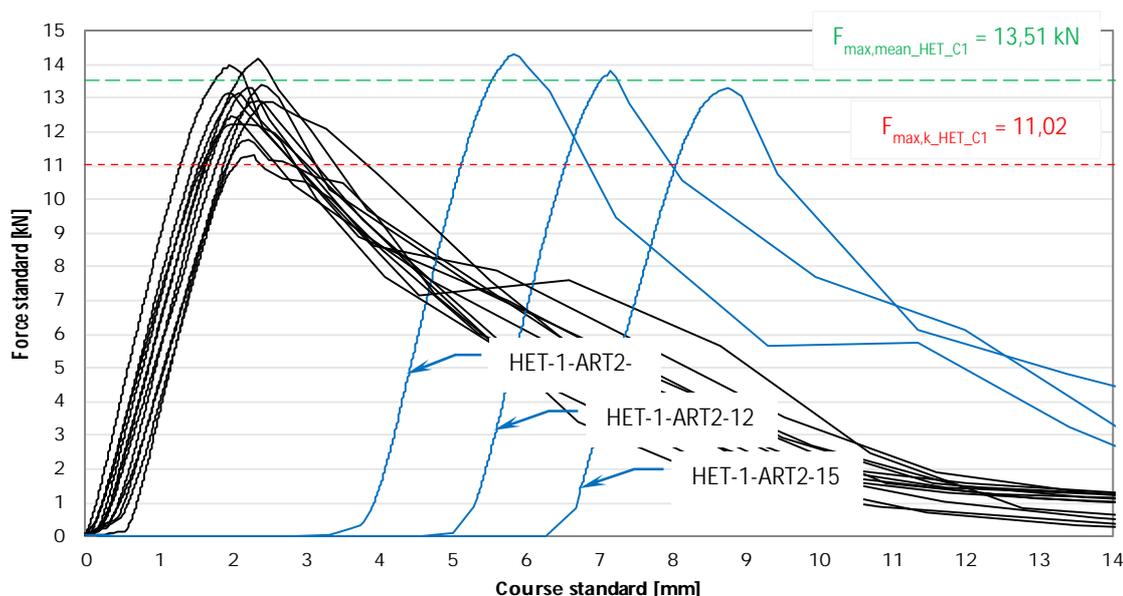


Figure 6-8 C1 - Synthèse des évolutions des efforts dans le hêtre en fonction du déplacement de la traverse



Figure 6-9 C1 – Mode de rupture observé sur le hêtre

Analyse de la raideur K_{SER}

Le jeu moyen de mise en œuvre dans les essais d'arrachement sur le hêtre est de 0,711 mm. Ce jeu est considéré comme très faible. Cependant une variabilité de 228,41 % est observable, causée par la variabilité du matériau bois d'une part, par une mauvaise répétabilité de réalisation des éprouvettes (enfoncement de la vis \pm profond, \pm droit malgré l'usage d'un guide), et surtout par une mauvaise mise en œuvre des éprouvettes 4, 12 et 15 (voir Figure 5-8).

La raideur moyenne de la vis dans le bois est de 7913 N/mm, pour un coefficient de variabilité de 14,10 %.

Les données liées au jeu de mise en œuvre et à la raideur sont répertoriées dans le Tableau 6-20.

Tableau 6-20 C1 - Raideurs et jeux obtenus pour les essais d'arrachement dans le hêtre

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART-TYPE	COV
K_{SER}	N/mm	5560	9390	7913	1116	14,10%
JEU	mm	0,064	6,560	1,346	2,162	228,41%

6.3 Résultats : résistance à l'arrachement des vis en configuration 2

Pour chaque campagne d'essai, l'effort maximal mesuré a été répertorié. Une analyse statistique a été réalisée pour chaque essence, permettant de déterminer la valeur caractéristique de la résistance à l'arrachement, conformément à l'annexe D7 de l'ECO [5, p. 0] et la norme NF EN 14358 [4].

Chaque éprouvette a été pesée avant la réalisation de l'essai d'arrachement. Les masses volumiques et les longueurs d'enfoncement ont été répertoriées pour chaque éprouvette en annexes.

Une fois l'essai réalisé, et les vis retirées, l'humidité autour de la zone d'enfoncement a été relevée, comme décrit en *Partie 0*, répertoriée dans les annexes. Cette humidité servira à corriger au besoin la valeur caractéristique obtenue.

Rappel de la configuration 2

La seconde configuration a pour objectif de quantifier l'influence de la distance au bord. L'emplacement des vis dans l'éprouvette est illustrée en Figure 6-10 et définis dans le Tableau 6-21

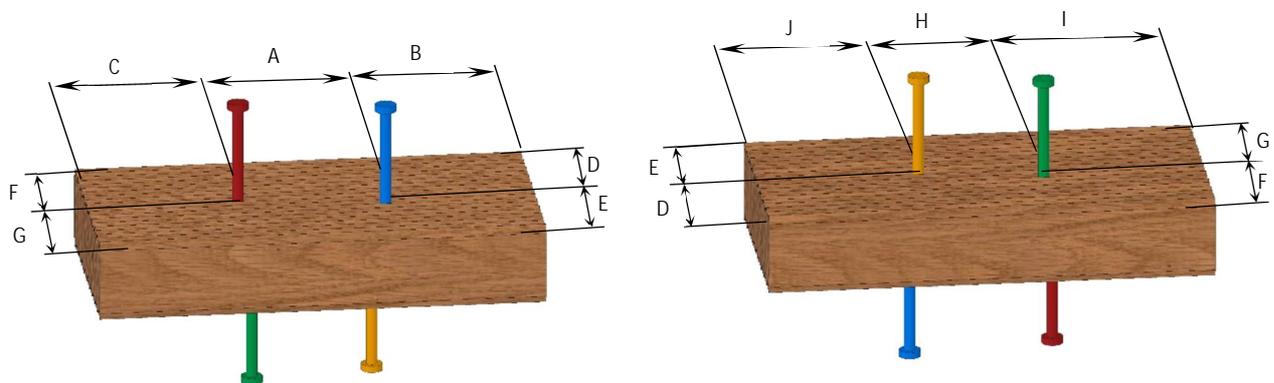


Figure 6-10 Représentation des configurations testées en arrachement double, face A (a) et face B (b)

Tableau 6-21 Caractéristiques dimensionnelles des éprouvettes en configuration 1

	UNITÉ	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
CONGIF 1	mm	65	20	115	25	95	20	100	55	120	25

6.3.1 Résistance à l'arrachement des vis dans le LVL de hêtre

Les coefficients de variations sont respectivement de 1,06 % et de 2,11 % pour la masse volumique des éprouvettes et la teneur en eau autour de la zone d'enfoncement de la vis (Tableau 6-22). Ceci permet de conclure sur la faible variabilité des éprouvettes utilisées pour les essais d'arrachement dans le LVL de hêtre.

Tableau 6-22 C2 - Synthèse de la masse volumique et de l'humidité dans les éprouvettes de LVL

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV
MASSE VOLUMIQUE DE L'ÉPROUVETTE	ρ kg/m^3	796	829	808	9	1,06 %
TENEUR EN EAU AUTOUR DE LA ZONE D'ENFONCEMENT	TH %	7,57	8,15	7,84	0,17	2,11 %

Analyse statistique des efforts mesurés dans le LVL

Les valeurs des moments à rupture ont été répertoriés lors des essais. Conformément à l'Annexe D de l'Eurocode 0 [2] et NF EN 14358 [4], il est possible de déterminer la valeur caractéristique de l'effort à rupture, et donc la résistance au cisaillement du bois. Cette résistance au cisaillement étant proportionnelle à la longueur d'enfoncement de la vis dans le bois, chaque longueur fut également répertoriée.

Les données ont été dépouillées en suivant une loi Log Normale.

Force maximale : F_{max,k_LVL_C2} et $F_{max,mean_LVL_C2}$

Tout calcul fait pour un nombre d'essai $n = 15$, le $COV_{F_{max,réel}} < 10 \%$. Conformément à la NF EN 14358 [4], ceci permet de conclure sur la faible variabilité des essais d'arrachement, et donc de valider la quantité d'essais réalisés. L'effort maximal caractéristique F_{max,k_LVL_C2} et l'effort maximal caractéristique moyen $F_{max,mean_LVL_C2}$ s'exprime alors respectivement en équations (6-17) et (6-18). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-23, et les valeurs des facteurs k sont rappelées dans le Tableau 4-5.

$$F_{max,k_LVL_C2} = \exp\left(m_y \ln(F_{max_LVL}) - k_{n=15,k} \times V_{X \ln(F_{max_LVL}-m_y_LVL)}\right) = \exp(2,69 - 1,9908 \times 0,054) = 13,21 \text{ kN} \quad (6-17)$$

et

$$F_{max,mean_LVL_C2} = m_y \ln(F_{max_LVL}) - k_{n=15,mean} \times V_{X \ln(F_{max_LVL})} = 14,73 - 0,1788 \times 0,81 = 14,59 \text{ kN} \quad (6-18)$$

Résistance au cisaillement : f_{v,k_LVL_C2} et $f_{v,mean_LVL_C2}$

Sur 15 éprouvettes, la longueur moyenne de pénétration de la vis dans le LVL de hêtre est de $t_{pen,moy_LVL_C2} = 27,9 \text{ mm}$, pour une longueur de pointe de 4 mm déduite de la longueur de pénétration. Soit, à titre indicatif, une surface cisailée moyenne de $S_{moy_LVL_C2} = 439 \text{ mm}^2$.

De la même manière, la résistance caractéristiques au cisaillement f_{v,k_LVL_C2} et la résistance moyenne au cisaillement $f_{v,mean_LVL_C2}$ s'expriment respectivement grâce aux équations (6-19) et (6-20). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-23, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5.

$$f_{v,k_LVL} = \exp(m_{y_{\ln(f_{ax})}} - k_{n=15,k} \times V_{X_{\ln(f_{ax}-my)}}) = \exp(3,51 - 1,9908 \times 0,053) = 30,20MPa \quad (6-19)$$

et

$$f_{v,k,mean_LVL} = m_{y_{f_{ax}}} - k_{n=15,mean} \times V_{X_{f_{ax}}} = 33,59 - 0,1788 \times 1,79 = 33,27MPa \quad (6-20)$$

Tableau 6-23 C2 - Données – Déterminations des efforts et résistances au cisaillement caractéristiques et caractéristiques moyennes dans le LVL

	$m_{y_{\ln(f)}}$	$V_{X_{\ln(f-my)}}$	m_{y_f}	V_{X_f}
FORCE MAXIMALE	2,69	max{0,054 ; 0,05}	14,73	max{0,81 ; 0,74}
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	3,51	max{0,053 ; 0,05}	33,59	max{1,79 ; 1,68}

Synthèse des résultats d'arrachement dans le LVL

Une faible variabilité des efforts à rupture est observée (voir COV en Tableau 6-24 et Figure 6-11), cependant différents mode de rupture sont visibles sur le lot d'éprouvettes étudiées (voir Figure 6-12). La sollicitation en traction des vis entraine une rupture le long du pli transverse.

Tableau 6-24 C2 - Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le LVL

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_K	X_{MEAN}
EFFORT MAX	F_{max} kN	13,52	16,55	14,73	0,81	5,47 %	13,21	14,59
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	f_v MPa	30,83	37,53	33,59	1,79	5,34 %	30,20	33,27

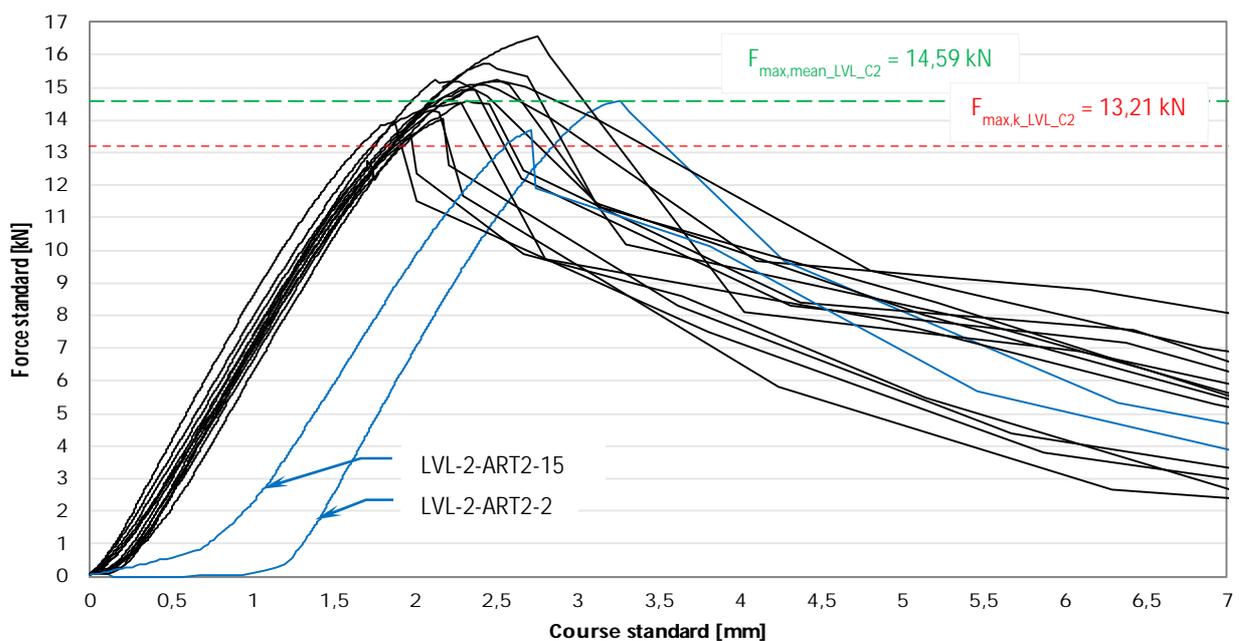


Figure 6-11 C2 - Synthèse des évolutions des efforts dans le LVL de hêtre en fonction du déplacement de la traverse

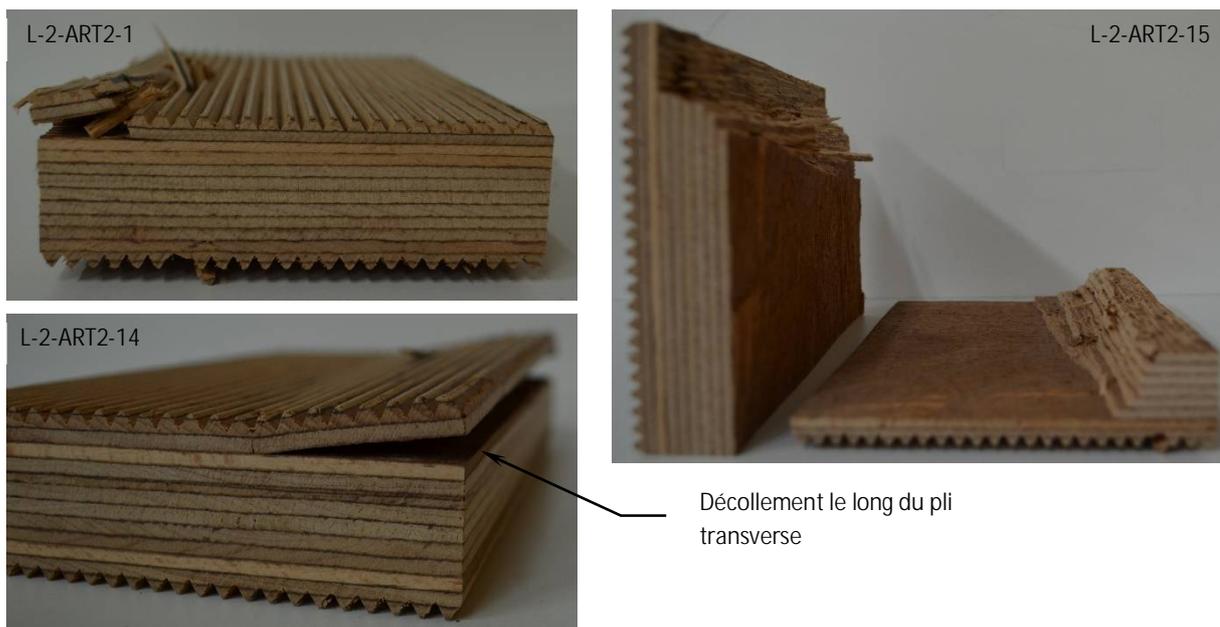


Figure 6-12 C2 – Modes de ruptures observés sur le LVL

Analyse de la raideur K_{SER}

Le jeu moyen de mise en œuvre dans les essais d'arrachement sur le LVL de hêtre est de 0,247 mm. Ce jeu est considéré comme très faible. Cependant une variabilité de 122 % est observable, causée par la variabilité du matériau bois d'une part, par une mauvaise répétabilité de réalisation des éprouvettes (enfoncement de la vis \pm profond, \pm droit malgré l'usage d'un guide), et par une mauvaise mise en œuvre des éprouvettes LVL-2-ART2-2 et LVL-2-ART2-15 sur le montage d'essai (voir Figure 6-11).

La raideur moyenne de la vis dans le bois est de 8332 N/mm, pour un coefficient de variabilité de 7,68 %.

Les données liées au jeu de mise en œuvre et à la raideur sont répertoriées dans le Tableau 6-25.

Tableau 6-25 C1 - -Raideurs et jeux obtenus pour les essais d'arrachement dans le LVL de hêtre

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART-TYPE	COV
K_{SER}	N/mm	6729	9131	8332	640	7,68%
JEU	mm	0,047	1,210	0,247	0,301	122%

6.3.2 Résistance à l'arrachement des vis dans le bouleau

Les coefficients de variations sont respectivement de 4,41 % et de 3,06 % pour la masse volumique des éprouvettes et la teneur en eau autour de la zone d'enfoncement de la vis (Tableau 6-26). Ceci permet de conclure sur la faible variabilité des éprouvettes utilisées pour les essais d'arrachement dans le bouleau.

Tableau 6-26 C2 - Synthèse de la masse volumique et de l'humidité dans les éprouvettes de bouleau

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV
MASSE VOLUMIQUE DE L'ÉPROUVETTE	ρ kg/m^3	586	675	621	27	4,41%
TENEUR EN EAU AUTOUR DE LA ZONE D'ENFONCEMENT	TH %	10,58	11,81	11,10	0,34	3,06%

Analyse statistique des efforts mesurés dans le bouleau

Les valeurs des moments à rupture ont été répertoriés lors des essais. Conformément à l'Annexe D de l'Eurocode 0 [2] et NF EN 14358 [4], il est possible de déterminer la valeur caractéristique de l'effort à rupture, et donc la résistance au cisaillement du bois. Cette résistance au cisaillement étant proportionnelle à la longueur d'enfoncement de la vis dans le bois, chaque longueur fut également répertoriée.

Les données ont été dépouillées en suivant une loi Log Normale.

Force maximale : F_{\max,k_BOU_C2} et $F_{\max,mean_BOU_C2}$

Tout calcul fait pour un nombre d'essai $n = 15$, le $COV_{F_{\max,r\acute{e}el}} \approx 10\%$. Conformément à la NF EN 14358 [4], ceci permet de conclure sur la faible variabilité des essais d'arrachement, et donc de valider la quantité d'essais réalisés. L'effort maximal caractéristique F_{\max,k_BOU_C2} et l'effort maximal caractéristique moyen $F_{\max,mean_BOU_C2}$ s'exprime alors respectivement en équations (6-21) et (6-22). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-27, et les valeurs des facteurs k sont rappelées dans le Tableau 4-5.

$$F_{\max,k_BOU_C2} = \exp(m_{y_{\ln(F_{\max_BOU})}} - k_{n=15,k} \times V_{x_{\ln(F_{\max_BOU}-m_{y_{\ln(F_{\max_BOU})}})}}) = \exp(2,30 - 1,9908 \times 0,121) = 7,88 kN \quad (6-21)$$

et

$$F_{\max,mean_BOU_C2} = m_{y_{F_{\max_BOU}}} - k_{n=15,mean} \times V_{x_{F_{\max_BOU}}} = 10,08 - 0,1788 \times 1,16 = 9,87 kN \quad (6-22)$$

Résistance au cisaillement : f_{v,k_BOU_C2} et $f_{v,mean_BOU_C2}$

Sur 15 éprouvettes, la longueur moyenne de pénétration de la vis dans le bouleau est de $t_{pen,moy_BOU_C2} = 29,0 mm$, pour une longueur de pointe de 4 mm déduite de la longueur de pénétration. Soit, à titre indicatif, une surface cisailée moyenne de $S_{moy_BOU_C2} = 455 mm^2$.

De la même manière, la résistance caractéristiques au cisaillement f_{v,k_BOU_C2} et la résistance moyenne au cisaillement $f_{v,mean_BOU_C2}$ s'expriment respectivement grâce aux équations (6-23) et (6-24). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-27, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5.

$$f_{v,k_BOU_C2} = \exp(m_{y_{\ln(f_{ax})}} - k_{n=15,k} \times V_{x_{\ln(f_{ax}-m_{y_{\ln(f_{ax})}})}}) = \exp(3,13 - 1,9908 \times 0,121) = 17,98 MPa \quad (6-23)$$

et

$$f_{v,k,mean_BOU_C2} = m_{y_{f_{ax}}} - k_{n=15,mean} \times V_{x_{f_{ax}}} = 22,93 - 0,1788 \times 2,64 = 22,46 \text{ MPa} \quad (6-24)$$

Tableau 6-27 C2 - Données – Déterminations des efforts résistances au cisaillement caractéristiques et caractéristiques moyennes dans le bouleau

	$m_{y_{\ln(F)}}$	$V_{x_{\ln(F-m)}}$	m_{y_F}	V_{x_F}
FORCE MAXIMALE	2,30	max{0,121 ; 0,05}	10,08	max{1,16 ; 0,50}
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	3,13	max{0,121 ; 0,05}	22,93	max{2,64 ; 1,25}

Synthèse des résultats d'arrachement dans le bouleau

Une faible variabilité des efforts à rupture est observée (voir COV en Tableau 6-28 et Figure 6-13), cependant différents mode de rupture sont visibles sur le lot d'éprouvettes étudiées (voir Figure 6-14). La sollicitation en traction des vis entraine une rupture le long du cœur rouge présent dans la majorité de la ressource en bouleau disponible.

Tableau 6-28 C2 - Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le bouleau

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_K	X_{MEAN}
EFFORT MAX	F_{max} kN	7,32	12,31	10,08	1,16	11,52 %	7,88	9,87
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	f_v MPa	16,67	28,01	22,93	2,64	11,52 %	17,98	22,46

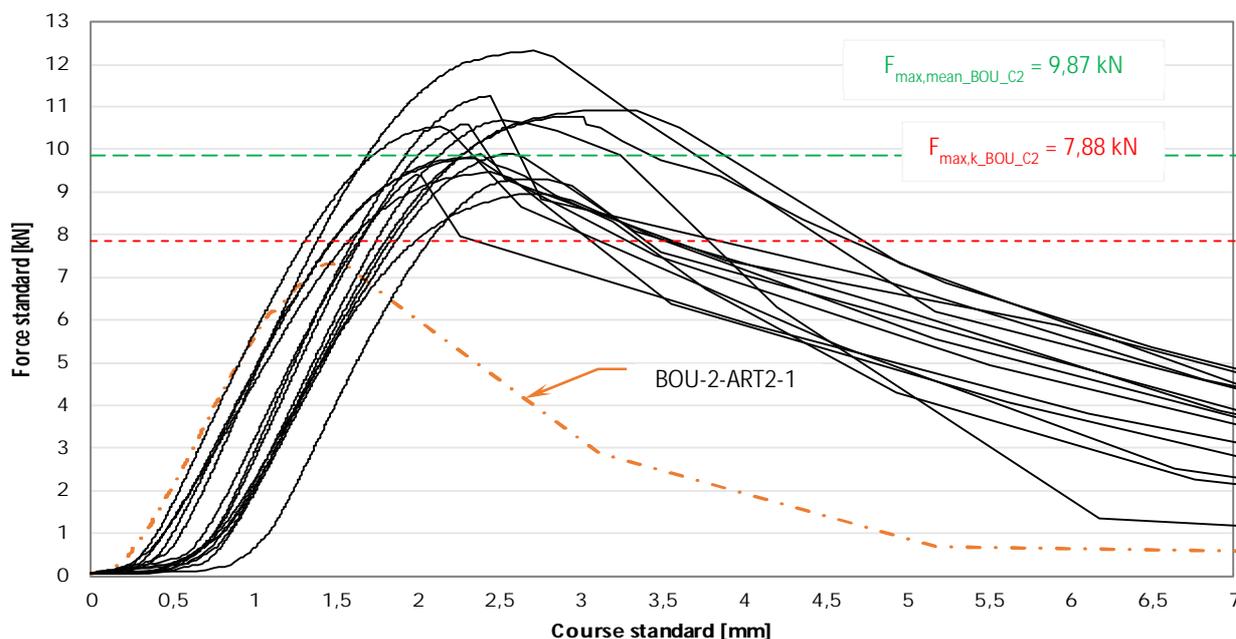


Figure 6-13 C2 - Synthèse des évolutions des efforts dans le bouleau en fonction du déplacement de la traverse

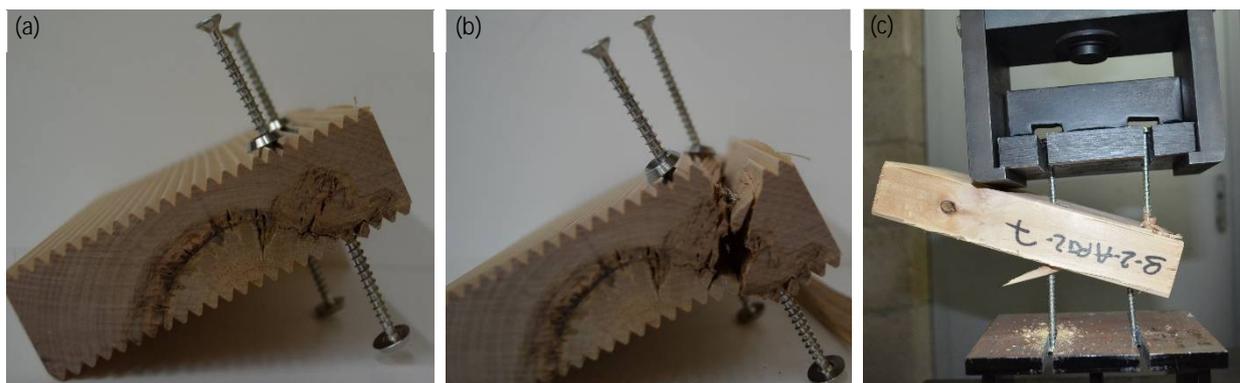


Figure 6-14 C2 – Eprouvette B-2-ART2-2 avant (a) et après (b) essai : rupture le long du cœur ; B-2-ART2-7 : rupture en arrachement (c)

Analyse de la raideur K_{SER}

Le jeu moyen de mise en œuvre dans les essais d'arrachement sur le bouleau est de 0,535 mm. Ce jeu est considéré comme très faible. Cependant une variabilité de 40,11 % est observable, causée par la variabilité du matériau bois d'une part, et par une mauvaise répétabilité de réalisation des éprouvettes (enfoncement de la vis \pm profond, \pm droit malgré l'usage d'un guide).

La raideur moyenne de la vis dans le bois est de 7269 N/mm, pour un coefficient de variabilité de 9,45 %.

Les données liées au jeu de mise en œuvre et à la raideur sont répertoriées dans le Tableau 6-29.

Tableau 6-29 C2 - Raideurs et jeux obtenus pour les essais d'arrachement dans le bouleau

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART-TYPE	COV
K_{SER}	N/mm	6078	8453	7269	687	9,45%
JEU	mm	0,171	0,950	0,535	0,214	40,11%

6.3.3 Résistance à l'arrachement des vis dans le chêne

Les coefficients de variations sont respectivement de 8,58 % et de 6,21 % pour la masse volumique des éprouvettes et la teneur en eau autour de la zone d'enfoncement de la vis (Tableau 6-30). Ceci permet de conclure sur la faible variabilité des éprouvettes utilisées pour les essais d'arrachement dans le chêne.

Tableau 6-30 C2 - Synthèse de la masse volumique et de l'humidité dans les éprouvettes de chêne

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV
MASSE VOLUMIQUE DE L'ÉPROUVETTE	ρ kg/m^3	670	890	754	64	8,58%
TENEUR EN EAU AUTOUR DE LA ZONE D'ENFONCEMENT	TH %	10,91	13,31	11,80	0,73	6,21%

Analyse statistique des efforts mesurés dans le chêne

Les valeurs des moments à rupture ont été répertoriés lors des essais. Conformément à l'Annexe D de l'Eurocode 0 [2] et NF EN 14358 [4], il est possible de déterminer la valeur caractéristique de l'effort à rupture, et donc la résistance au cisaillement du bois. Cette résistance au cisaillement étant proportionnelle à la longueur d'enfoncement de la vis dans le bois, chaque longueur fut également répertoriée.

Les données ont été dépouillées en suivant une loi Log Normale.

Force maximale : F_{max,k_CHE_C2} et $F_{max,mean_CHE_C2}$

Tout calcul fait pour un nombre d'essais $n = 15$, le $COV_{F_{max,réel}} > 10 \%$. Conformément à la NF EN 14358 [4], ceci met en évidence une forte variabilité du lot testé. Aucune éprouvette ne sort pourtant du lot (voir Figure 6-15). Cette forte variabilité est explicable par les caractéristiques de la ressource : présence de nombreuses fissures en bout des éprouvettes ou à proximité des vis. Ainsi, afin d'être au plus proche de la réalité de la ressource, aucune éprouvette ne sera exclue des résultats.

L'effort maximal caractéristique F_{max,k_CHE_C2} et l'effort maximal caractéristique moyen $F_{max,mean_CHE_C2}$ s'exprime alors respectivement en équations (6-25) et (6-26). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-31, et les valeurs des facteurs k sont rappelées dans le Tableau 4-5.

$$F_{max,k_CHE_C2} = \exp\left(m_y \ln(F_{max_CHE}) - k_{n=15,k} \times V_{X \ln(F_{max_CHE} - m_y)}\right) = \exp(2,50 - 1,9908 \times 0,141) = 9,22kN \quad (6-25)$$

et

$$F_{max,mean_CHE_C2} = m_y \ln(F_{max_CHE}) - k_{n=15,mean} \times V_{X \ln(F_{max_CHE})} = 12,32 - 0,1788 \times 1,75 = 12,00kN \quad (6-26)$$

Résistance au cisaillement : f_{v,k_CHE_C2} et $f_{v,mean_CHE_C2}$

Sur 15 éprouvettes, la longueur moyenne de pénétration de la vis dans le chêne est de $t_{pen,moy_CHE_C2} = 28,0 \text{ mm}$, pour une longueur de pointe de 4 mm déduite de la longueur de pénétration. Soit, à titre indicatif, une surface cisailée moyenne de $S_{moy_CHE_C2} = 439 \text{ mm}^2$.

De la même manière, la résistance caractéristiques au cisaillement f_{v,k_CHE_C2} et la résistance moyenne au cisaillement $f_{v,mean_CHE_C2}$ s'expriment respectivement grâce aux équations (6-27) et (6-28). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-31, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5.

$$f_{v,k_CHE_C2} = \exp\left(m_y \ln(f_{ax}) - k_{n=15,k} \times V_{X \ln(f_{ax} - m_y)}\right) = \exp(3,32 - 1,9908 \times 0,140) = 21,00MPa \quad (6-27)$$

et

$$f_{v,k,mean_CHE_C2} = m_{y_{f_{ax}}} - k_{n=15,mean} \times V_{x_{ln(f_{ax})}} = 28,03 - 0,1788 \times 3,98 = 27,32 MPa \quad (6-28)$$

Tableau 6-31 C2 - Données – Déterminations des efforts résistances au cisaillement caractéristiques et caractéristiques moyennes dans le chêne

	$m_{y_{ln(f)}}$	$V_{x_{ln(f-my)}}$	m_{y_f}	V_{x_f}
FORCE MAXIMALE	2,50	max{0,141 ; 0,05}	12,32	max{1,75 ; 0,62}
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	3,32	max{0,140 ; 0,05}	28,03	max{3,98 ; 1,40}

Synthèse des résultats d'arrachement dans le chêne

Une faible variabilité des efforts à rupture est observée (voir COV en Tableau 6-32 et Figure 6-15), cependant différents mode de rupture sont visibles sur le lot d'éprouvettes étudiées (voir Figure 6-16). La sollicitation en traction des vis entraine une rupture le long du cœur rouge présent dans la majorité de la ressource en bouleau disponible.

Tableau 6-32 C2 - Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le chêne

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_K	X_{MEAN}
EFFORT MAX	F_{max} kN	9,90	15,34	12,32	1,75	14,21 %	9,22	12,00
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	f_v MPa	22,60	34,94	28,03	3,98	14,20 %	21,00	27,32

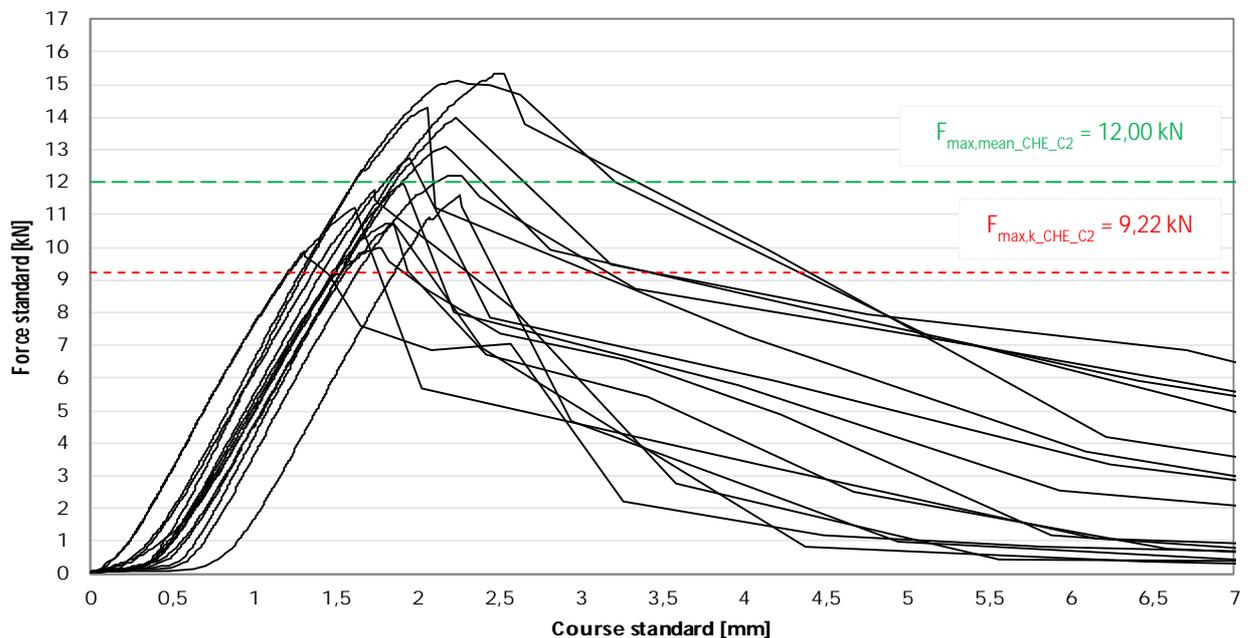


Figure 6-15 C2 - Synthèse des évolutions des efforts dans le chêne en fonction du déplacement de la traverse

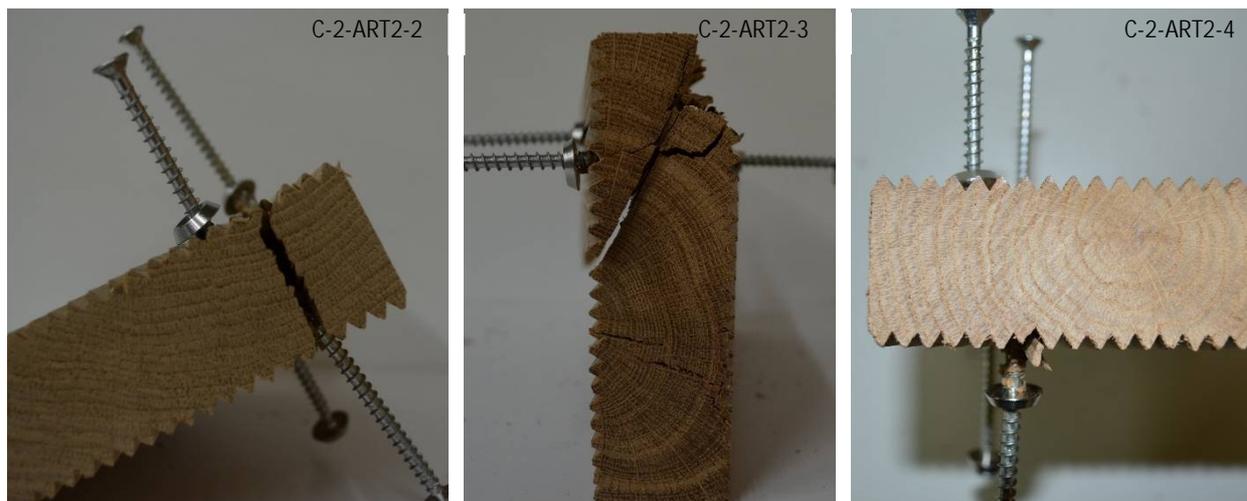


Figure 6-16 C2 – Modes de ruptures observés sur le chêne

Analyse de la raideur K_{ser}

Le jeu moyen de mise en œuvre dans les essais d’arrachement sur le chêne est de 0,394 mm. Ce jeu est considéré comme très faible. Cependant une variabilité de 43,47 % est observable, causée par la variabilité du matériau bois d’une part, et par une mauvaise répétabilité de réalisation des éprouvettes (enfoncement de la vis \pm profond, \pm droit malgré l’usage d’un guide).

La raideur moyenne de la vis dans le bois est de 8653 N/mm, pour un coefficient de variabilité de 6,14 %.

Les données liées au jeu de mise en œuvre et à la raideur sont répertoriées dans le Tableau 6-33.

Tableau 6-33 C2 - Raideurs et jeux obtenus pour les essais d’arrachement dans le chêne

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART-TYPE	COV
K_{SER}	N/mm	7494	9810	8653	554	6,14 %
JEU	mm	0,125	0,793	0,394	0,171	43,47 %

6.3.4 Résistance à l'arrachement des vis dans le hêtre

Les coefficients de variations sont respectivement de 1,38% et de 9,83% pour la masse volumique des éprouvettes et la teneur en eau autour de la zone d'enfoncement de la vis (Tableau 6-34). Ceci permet de conclure sur la faible variabilité des éprouvettes utilisées pour les essais d'arrachement dans le hêtre.

Tableau 6-34 C2 - Synthèse de la masse volumique et de l'humidité dans les éprouvettes de hêtre

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV
MASSE VOLUMIQUE DE L'ÉPROUVETTE	ρ kg/m^3	713	754	725	10	1,38 %
TENEUR EN EAU AUTOUR DE LA ZONE D'ENFONCEMENT	TH %	9,54	12,23	10,42	1,02	9,83 %

Analyse statistique des efforts mesurés dans le hêtre

Les valeurs des moments à rupture ont été répertoriés lors des essais. Conformément à l'Annexe D de l'Eurocode 0 [2] et NF EN 14358 [4], il est possible de déterminer la valeur caractéristique de l'effort à rupture, et donc la résistance au cisaillement du bois. Cette résistance au cisaillement étant proportionnelle à la longueur d'enfoncement de la vis dans le bois, chaque longueur fut également répertoriée.

Les données ont été dépouillées en suivant une loi Log Normale.

Force maximale : F_{max,k_HET_C2} et $F_{max,mean_HET_C2}$

Tout calcul fait pour un nombre d'essai $n = 15$, le $COV_{F_{max,réel}} \approx 10\%$. Conformément à la NF EN 14358 [4], ceci permet de conclure sur la faible variabilité des essais d'arrachement, et donc de valider la quantité d'essais réalisés. L'effort maximal caractéristique F_{max,k_HET_C2} et l'effort maximal caractéristique moyen $F_{max,mean_HET_C2}$ s'exprime alors respectivement en équations (6-29) et (6-30). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-35, et les valeurs des facteurs k sont rappelées dans le Tableau 4-5.

$$F_{max,k_HET_C2} = \exp(m_{y_{\ln(F_{max_HET})}} - k_{n=15,k} \times V_{x_{\ln(F_{max_HET}-m_{y_{\ln(F_{max_HET})})}}} = \exp(2,64 - 1,9908 \times 0,109) = 11,30 kN \quad (6-29)$$

et

$$F_{max,mean_HET_C2} = m_{y_{F_{max_HET}}} - k_{n=15,mean} \times V_{x_{F_{max_HET}}} = 14,12 - 0,1788 \times 1,52 = 13,85 kN \quad (6-30)$$

Résistance au cisaillement : f_{v,k_HET_C2} et $f_{v,mean_HET_C2}$

Sur 15 éprouvettes, la longueur moyenne de pénétration de la vis dans le hêtre est de $t_{pen,moy_HET_C2} = 28,0 mm$, pour une longueur de pointe de 4 mm déduite de la longueur de pénétration. Soit, à titre indicatif, une surface cisailée moyenne de $S_{moy_HET_C2} = 439 mm^2$.

De la même manière, la résistance caractéristiques au cisaillement f_{v,k_HET_C2} et la résistance moyenne au cisaillement $f_{v,mean_HET_C2}$ s'expriment respectivement grâce aux équations (6-31) et (6-32). Les données nécessaires pour les calculs sont répertoriées dans le Tableau 6-35, et les valeurs des facteurs k sont répertoriées dans le Tableau 4-5.

$$f_{v,k_HET_C2} = \exp(m_{y_{\ln(f_{ax})}} - k_{n=15,k} \times V_{x_{\ln(f_{ax}-m_{y_{\ln(f_{ax})})}}} = \exp(3,47 - 1,9908 \times 0,108) = 25,78 MPa \quad (6-31)$$

et

$$f_{v,k,mean_HET_C2} = m_{y_{f_{ax}}} - k_{n=15,mean} \times V_{x_{f_{ax}}} = 32,15 - 0,1788 \times 3,43 = 31,54 MPa \quad (6-32)$$

Tableau 6-35 C2 - Données – Déterminations des efforts résistances au cisaillement caractéristiques et caractéristiques moyennes dans le hêtre

	$m_{y_{ln(F)}}$	$V_{X_{ln(F-my)^2}}$	m_{y_F}	V_{x_F}
FORCE MAXIMALE	2,64	$\max\{0,109 ; 0,05\}$	14,12	$\max\{1,52 ; 0,71\}$
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	3,47	$\max\{0,108 ; 0,05\}$	32,15	$\max\{3,43 ; 1,61\}$

Synthèse des résultats d'arrachement dans le hêtre

Une faible variabilité des efforts à rupture est observée (voir COV en Tableau 6-36 et Figure 6-17), cependant différents mode de rupture sont visibles sur le lot d'éprouvettes étudiées (voir Figure 6-18). La sollicitation en traction des vis entraîne une rupture le long du cœur rouge présent dans la majorité de la ressource en bouleau disponible.

Tableau 6-36 C2 - Synthèse de l'effort maximal mesuré et de la résistance au cisaillement dans le hêtre

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART TYPE	COV	X_K	X_{MEAN}
EFFORT MAX	F_{max} kN	11,29	17,26	14,12	1,52	10,76 %	11,30	13,85
RESISTANCE AU CISAILLEMENT	f_v MPa	25,72	39,27	32,15	3,44	10,68 %	25,78	31,54

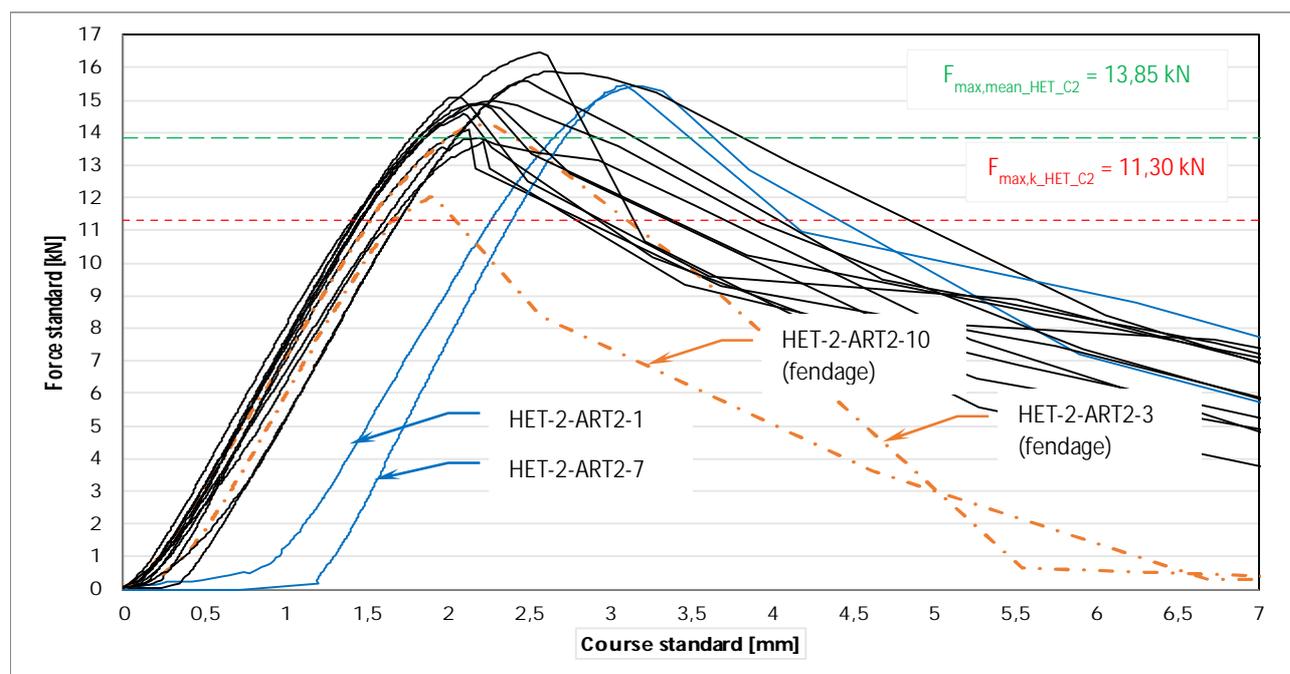


Figure 6-17 C2 - Synthèse des évolutions des efforts dans le hêtre en fonction du déplacement de la traverse

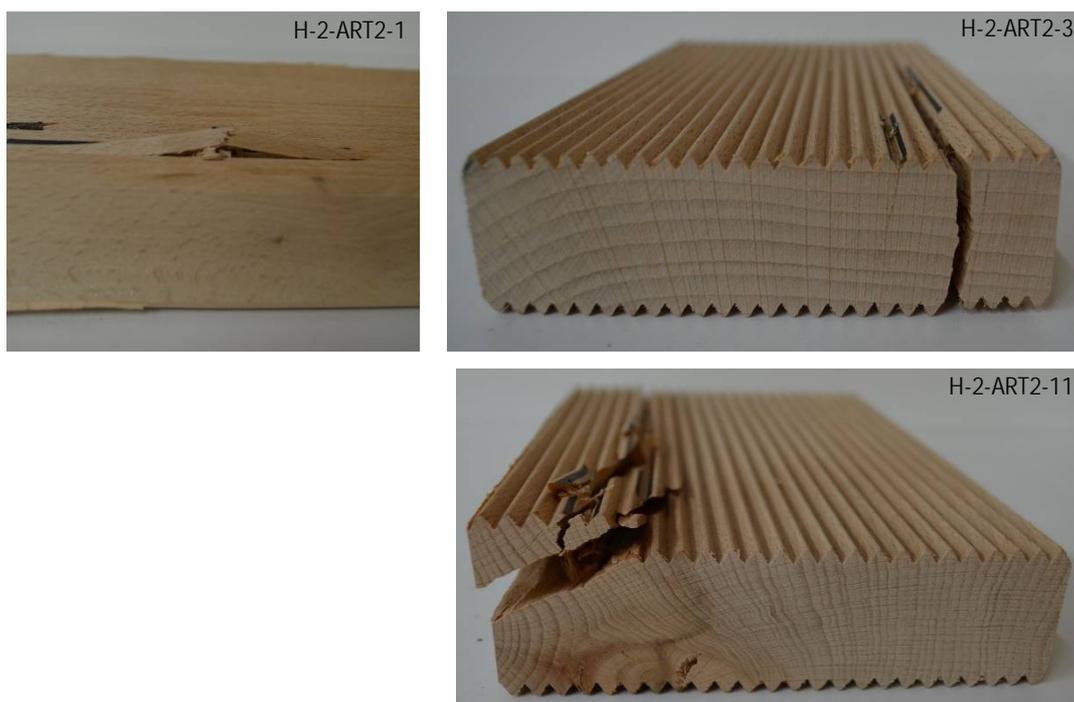


Figure 6-18 C2 – Modes de ruptures observés sur le hêtre

Analyse de la raideur K_{SER}

Le jeu moyen de mise en œuvre dans les essais d'arrachement sur le hêtre est de 0,287 mm. Ce jeu est considéré comme très faible. Cependant une variabilité de 72,88% est observable, causée par la variabilité du matériau bois d'une part, par une mauvaise répétabilité de réalisation des éprouvettes (enfoncement de la vis \pm profond, \pm droit malgré l'usage d'un guide), et par une mauvaise mise en œuvre des éprouvettes HET-2-ART2-1 et HET-2-ART2-7 sur le montage d'essai (voir Figure 6-17).

La raideur moyenne de la vis dans le bois est de 7971 N/mm, pour un coefficient de variabilité de 13,97 %.

Les données liées au jeu de mise en œuvre et à la raideur sont répertoriées dans le Tableau 6-37.

Tableau 6-37 C2 - Raideurs et jeux obtenus pour les essais d'arrachement dans le hêtre

	UNITE	MIN	MAX	MOYENNE	ECART-TYPE	COV
K_{SER}	N/mm	5560	9390	7971	1114	13,97%
JEU	mm	0,064	0,851	0,287	0,209	72,88%

7 Synthèse

Les résultats des essais en arrachement simple sont synthétisés dans le Tableau 7-1.

Tableau 7-1 Synthèse des résultats pour chaque essence

		UNITÉ	LVL DE HETRE	BOULEAU	CHÊNE	HÊTRE
MASSE VOLUMIQUE MOYENNE	ρ	kg/m ³	805	566	722	741
TENEUR EN EAU	TH%	%	6,8	10,1	10,7	12,3
LONGUEUR MOYENNE D'ENFONCEMENT DE LA VIS	$t_{pen,moy}$	mm	23,4	23,8	23,6	24,0
EFFORT MAX CARACTERISTIQUE	$F_{max,k}$	kN	5,73	2,89 (2,97)*	4,76 (4,96)*	5,63
EFFORT MAX MOYEN	$F_{max,k,mean}$	kN	6,74	3,95 (3,86)*	6,14 (6,03)*	6,90
RESISTANCE AU CISAILLEMENT CARACTERISTIQUE	$f_{v,k}$	MPa	15,89	7,85 (8,16)*	12,80 (13,28)*	15,28
RESISTANCE AU CISAILLEMENT MOYEN	$f_{v,k,mean}$	MPa	18,35	10,59 (10,37)*	16,53 (16,23)*	18,34
JEU MOYEN DE MISE EN ŒUVRE	j	mm	0,090	0,059	0,106	0,090
RAIDEUR VIS-BOIS	Kser	N/mm	4756	4136	5269	5539

*Valeurs pour $n_{eprouvette} = 19$, où BOU-15-ARR et CHE-12-ARR sont exclus

La première configuration d'arrachement double avait pour objectif de mettre en évidence l'influence possible due à la proximité des vis entres elles. Les résultats expérimentaux ont été comparés aux résultats issus de la campagne d'essais d'arrachement simple. Aucune influence entre les essais d'arrachement simple n'est observée.

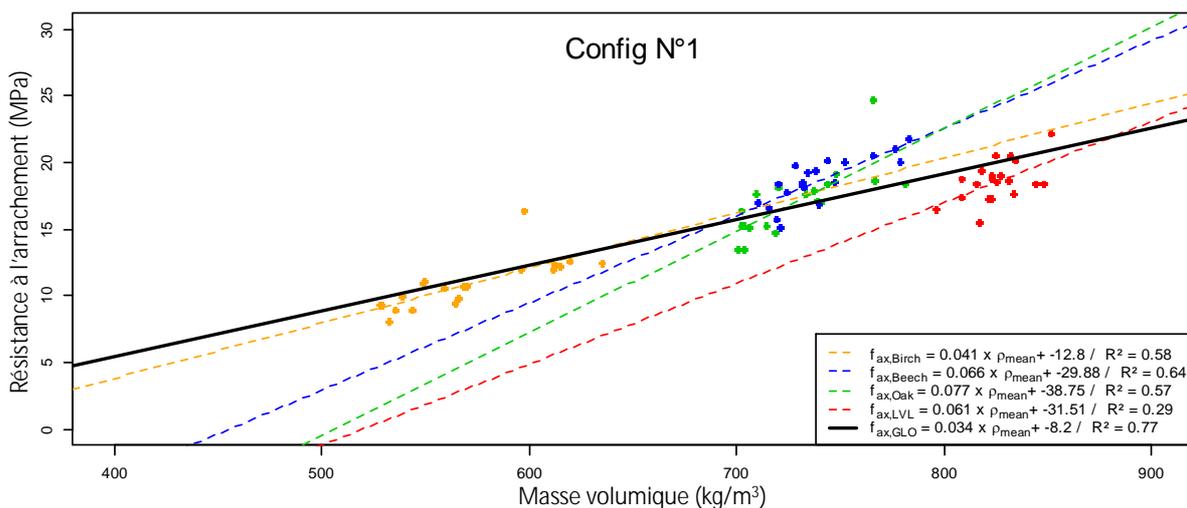


Figure 7-1 Représentation de la résistance à l'arrachement en fonction de la masse volumique

La seconde configuration d'arrachement double avait pour objectif de mettre en évidence l'influence de la distance au bord. Les résultats expérimentaux ont été comparé aux résultats issus de la campagne d'essais d'arrachement double en configuration 1 (voir Tableau 7-2). Pour une distance au bord de 20 mm, une perte de résistance à l'arrachement de l'ordre de 15% est observée sur le LVL de hêtre, et de 20% sur le chêne et le hêtre. À l'inverse, une augmentation de 15% de la résistance à l'arrachement est observable sur le bouleau. Cette augmentation de résistance est explicable par

la composition des éprouvettes : en configuration 1 les vis placées au centre de l'éprouvette étaient principalement en contact du cœur, alors qu'en configuration 2, bien qu'étant à 20 mm du bord, les vis en étaient éloignées. Une autre série d'essais doit être envisagée pour quantifier la perte de résistance liée à la distance au bord dans le bouleau.

Tableau 7-2 Synthèse des résultats pour chaque essence

		UNITÉ	LVL-1	LVL-1 (bis)*	LVL-2	BOU- 1	BOU- 2	CHE-1	CHE-2	HET-1	HET-2
MASSE VOLUMIQUE MOYENNE	ρ	kg/m ³	832	822	829	675	675	767	754	723	725
TENEUR EN EAU	TH%	%	6,42	-	7,84	11,25	11,91	12,16	11,80	10,89	10,42
LONGUEUR MOYENNE D'ENFONCEMENT DE LA VIS	$t_{pen,moy}$	mm	22,3	28,0	27,9	28,1	28,0	28,1	28,0	22,2	28,0
EFFORT MAX CARACTERISTIQUE	$F_{max,k}$	kN	11,67	15,50	13,21	6,86	7,88	11,59	9,22	11,02	11,30
EFFORT MAX MOYEN	$F_{max,k,mean}$	kN	13,43	16,98	14,59	9,00	9,87	14,88	12,00	13,51	13,85
RESISTANCE AU CISAILLEMENT CARACTERISTIQUE	$f_{v,k}$	MPa	32,27	35,24	30,20	15,58	17,98	26,28	21,00	31,69	25,78
RESISTANCE AU CISAILLEMENT MOYEN	$f_{v,k,mean}$	MPa	38,28	38,60	33,27	20,40	22,46	33,71	27,37	38,75	31,54
JEU MOYEN DE MISE EN ŒUVRE	j	mm	0,149	0,224	0,247	0,179	0,535	0,302	0,394	0,294	0,287
RAIDEUR VIS-BOIS	Kser	N/mm	8212	8919	8332	7171	7269	8829	8653	7913	7971

*LVL-1-(bis) : série de 15 essais supplémentaires, avec une longueur d'enfoncement supérieure à LVL-1

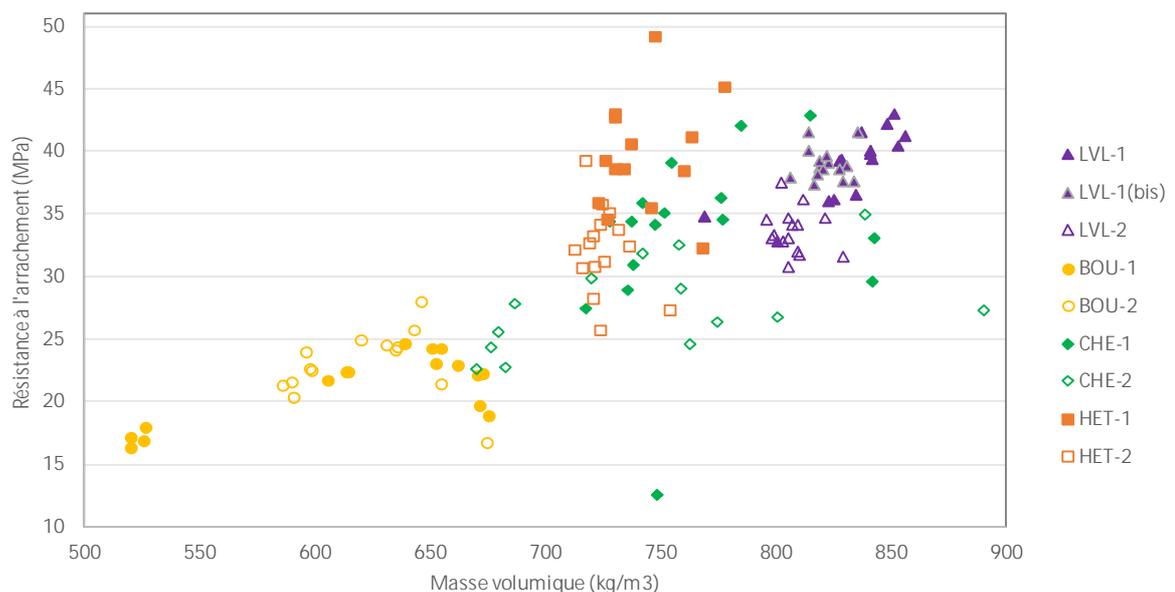


Figure 7-2 Représentation de la résistance à l'arrachement en fonction de la masse volumique

8 Bibliographie

- [1] ETA-11/0190 - Würth self-tapping screws, 2013.
- [2] Organisation Européenne pour Agréments Techniques, Deutsches Institut für Bautechnik, ETA-11/0190 - Vis Würth ASSY - Vis autotaraudeuses en tant qu'organes d'assemblage pour le bois, (2013).
- [3] T. Benistand, Caractérisation mécanique des bois feuillus Français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2019.
- [4] CIRAD, Fiche Hêtre, (2012). <https://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/FR/Temperees/HETRE.pdf> (accessed September 20, 2018).
- [5] CIRAD, Fiche Chêne, (2018). <https://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/FR/Temperees/CHENE.pdf> (accessed September 20, 2018).
- [6] Pollmeier, Declaration of Performance - Laminated veneer lumber made of beech, (2015).
- [7] AFNOR, EN 1382 - Timber structures - Test methods - Withdrawal capacity of timber fasteners, 2016.
- [8] P22-318-1 NF EN 1993-1-8 - EUROCODE 3 - Calcul des structures en acier / Partie 1-8 : Calcul des assemblages, (2015).
- [9] NF EN ISO 4032 - Ecrous hexagonaux normaux (style 1) - Grades A et B, (2013).
- [10] P21-377 NF EN 1382 - Structure bois - Méthodes d'essais - Résistance à l'arrachement dans le bois d'éléments de fixation, (2016).
- [11] NF EN 26891 (P21-310) - Structures en bois - Assemblages réalisés avec des éléments mécaniques de fixation - Principes généraux pour la détermination des caractéristiques de résistance et de déformation, (1991).
- [12] P21-711-1 NF EN 1995-1-1 - EUROCODE 5 - Conception et calcul des structures en bois / Partie 1-1 : Généralités, règles communes et règles pour le bâtiments, (2005).
- [13] J.-F. BOCQUET, L. BLERON, D. LATHUILLIERE, R. LEMAITRE, Etude de faisabilité d'un ouvrage en hêtre des Vosges par planches croisées striées vissées, Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois, Epinal, France, 2015.
- [14] NF EN 14358 (P21-399) - Structure en bois - Détermination et vérification des valeurs caractéristiques, (2016).

Annexe A Résultats essais d'arrachement simple

Table - A-1	Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le LVL	79
Table - A-2	Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le bouleau	80
Table - A-3	Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le chêne	81
Table - A-4	Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le hêtre	82

Table - A-1 Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le LVL

EPROUVETTE	MASSE VOLU- MIQUE [kg/m ³]	TENEUR EN HUMIDITE	LONGUEUR T _{PEN} [mm]	SURFACE CIAILLÉE [mm ²]	F _{MAX,MESURE} [kN]			F _{AX,MEAN} [MPa]			K _{SER} [N/mm]	JEU [mm]
					X _i	L _{N,XI}	(L _{N,XI} - m _y) ²	X _i	L _{N,XI}	(L _{N,XI} - m _y) ²		
LVL-1-ARR	814	7,0%	24,2	380	7,631	2,032	0,013	20,076	3,000	0,006	4898	0,068
LVL-2-ARR	827	7,0%	23,5	369	6,783	1,914	0,000	18,376	2,911	0,000	4845	0,093
LVL-3-ARR	803	6,9%	24,0	377	6,481	1,869	0,003	17,190	2,844	0,006	4977	0,064
LVL-4-ARR	795	6,7%	24,6	386	7,106	1,961	0,002	18,390	2,912	0,000	4783	0,072
LVL-5-ARR	830	6,9%	23,9	375	8,319	2,119	0,040	22,159	3,098	0,032	5112	0,102
LVL-6-ARR	813	6,9%	22,6	355	6,256	1,834	0,007	17,623	2,869	0,002	4221	0,098
LVL-7-ARR	800	6,7%	23,6	371	6,394	1,855	0,004	17,249	2,848	0,005	4787	0,079
LVL-8-ARR	823	7,0%	23,0	361	6,628	1,891	0,001	18,346	2,909	0,000	4877	0,071
LVL-9-ARR	788	7,0%	23,7	372	6,445	1,863	0,003	17,313	2,851	0,005	4727	0,066
LVL-10-ARR	803	6,9%	22,4	352	6,694	1,901	0,000	19,025	2,946	0,001	4855	0,184
LVL-11-ARR	812	7,2%	23,7	372	6,920	1,934	0,000	18,589	2,923	0,000	4838	0,094
LVL-12-ARR	798	6,9%	23,5	369	7,159	1,968	0,002	19,393	2,965	0,002	4689	0,079
LVL-13-ARR	806	6,7%	23,0	361	6,844	1,923	0,000	18,945	2,942	0,001	5005	0,082
LVL-14-ARR	776	6,8%	22,9	360	5,935	1,781	0,019	16,499	2,803	0,013	4403	0,072
LVL-15-ARR	795	6,4%	23,0	361	5,603	1,723	0,038	15,507	2,741	0,032	4646	0,073
LVL-16-ARR	801	6,6%	22,8	358	6,729	1,906	0,000	18,787	2,933	0,000	4600	0,099
LVL-17-ARR	803	6,7%	23,4	368	7,539	2,020	0,010	20,512	3,021	0,010	4785	0,088
LVL-18-ARR	788	6,9%	23,0	361	6,760	1,911	0,000	18,711	2,929	0,000	4793	0,064
LVL-19-ARR	805	6,7%	23,9	375	6,930	1,936	0,000	18,460	2,916	0,000	4842	0,070
LVL-20-ARR	810	6,7%	24,0	377	7,710	2,043	0,015	20,452	3,018	0,010	4432	0,176
MOYENNE	805	6,8%	23,4	368	6,843	1,919	-	18,580	2,919	-	4756	0,090
ECART TYPE	13	0,2%	0,6	-	0,629	-	0,091	1,513	-	0,081	213	0,033
COV	1,7%	2,6%	2,5	-	9,2%	-	-	8,1%	-	-	4,5%	37,0%

Table - A-2 Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le bouleau

EPROUVETTE	MASSE VOLU- MIQUE [kg/m ³]	TENEUR EN HUMIDITE	LONGUEUR T _{PEN} [mm]	SURFACE CIAILLÉE [mm ²]	F _{MAX,MESURE} [kN]			F _{AX,MEAN} [MPa]			K _{SER} [N/mm]	JEU [mm]
					X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²	X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²		
BOU-1-ARR	606	10,2%	23,7	372	4,454	1,494	0,011	11,965	2,482	0,012	4200	0,052
BOU-2-ARR	531	10,3%	23,6	371	3,325	1,201	0,035	8,968	2,194	0,032	4119	0,039
BOU-3-ARR	545	10,1%	23,0	361	4,013	1,390	0,000	11,109	2,408	0,001	4006	0,052
BOU-4-ARR	615	10,4%	24,0	377	4,742	1,556	0,028	12,577	2,532	0,025	4283	0,105
BOU-5-ARR	631	10,7%	24,5	385	4,780	1,564	0,031	12,420	2,519	0,021	4653	0,073
BOU-6-ARR	607	10,3%	24,3	382	4,704	1,548	0,026	12,324	2,512	0,019	4527	0,055
BOU-7-ARR	609	10,2%	24,2	380	4,647	1,536	0,022	12,224	2,503	0,017	4285	0,073
BOU-8-ARR	528	10,2%	23,7	372	3,013	1,103	0,081	8,094	2,091	0,080	3490	0,036
BOU-9-ARR	565	10,0%	24,2	380	4,074	1,405	0,000	10,718	2,372	0,000	4206	0,077
BOU-10-ARR	534	10,2%	23,8	374	3,706	1,310	0,006	9,913	2,294	0,006	3956	0,070
BOU-11-ARR	524	10,1%	23,1	363	3,385	1,219	0,028	9,328	2,233	0,020	4122	0,042
BOU-12-ARR	559	10,0%	23,7	372	3,524	1,260	0,016	9,466	2,248	0,016	3842	0,026
BOU-13-ARR	590	10,1%	23,4	368	4,387	1,479	0,008	11,934	2,479	0,011	4180	0,049
BOU-14-ARR	560	9,9%	23,1	363	3,550	1,267	0,015	9,783	2,281	0,009	3953	0,032
BOU-15-ARR	590	9,6%	24,2	380	6,211	1,826	0,192	16,340	2,794	0,176	5104	0,117
BOU-16-ARR	543	9,9%	23,2	364	3,973	1,380	0,000	10,903	2,389	0,000	4082	0,087
BOU-17-ARR	524	9,7%	24,6	386	3,587	1,277	0,012	9,283	2,228	0,021	3778	0,067
BOU-18-ARR	563	10,2%	23,0	361	3,860	1,351	0,001	10,683	2,369	0,000	3869	0,055
BOU-19-ARR	555	10,1%	24,1	379	4,018	1,391	0,000	10,613	2,362	0,000	4081	0,039
BOU-20-ARR	539	10,0%	23,7	372	3,310	1,197	0,036	8,891	2,185	0,036	3865	0,031
MOYENNE	566	10,10%	23,8	373	4,063	1,388	-	10,877	2,374	-	4130	0,059
ECART TYPE	34	0,23%	0,5	-	0,734	-	0,170	1,862	-	0,163	346	0,025
COV	6,1%	2,3%	2,1%	-	18,1%	-	-	17,1%	-	-	8,4%	42,0%

Table - A-3 Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le chêne

EPROUVETTE	MASSE VOLU- MIQUE [kg/m ³]	TENEUR EN HUMIDITE	LONGUEUR T _{PEN} [mm]	SURFACE CIAILLÉE [mm ²]	F _{MAX,MESURE} [kN]			F _{AX,MEAN} [MPa]			K _{SER} [N/mm]	JEU [mm]
					X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²	X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²		
CHE-1-ARR	700	10,8%	24,0	377	5,756	1,750	0,006	15,269	2,726	0,0086	5327	0,066
CHE-2-ARR	699	10,6%	23,2	364	5,558	1,715	0,012	15,252	2,725	0,0088	4988	0,086
CHE-3-ARR	699	10,9%	23,4	368	6,015	1,794	0,001	16,364	2,795	0,0006	5432	0,055
CHE-4-ARR	738	10,6%	23,2	364	6,684	1,900	0,005	18,342	2,909	0,0082	5613	0,099
CHE-5-ARR	742	10,5%	23,0	361	6,887	1,930	0,011	19,062	2,948	0,0166	5934	0,059
CHE-6-ARR	707	11,1%	23,4	368	6,459	1,865	0,001	17,572	2,866	0,0023	5355	0,105
CHE-7-ARR	697	11,2%	23,7	372	4,990	1,608	0,048	13,405	2,596	0,0498	4962	0,055
CHE-8-ARR	761	10,6%	23,4	368	6,862	1,926	0,010	18,669	2,927	0,0117	5568	0,120
CHE-9-ARR	717	11,1%	24,5	385	6,968	1,941	0,013	18,105	2,896	0,0060	4921	0,288
CHE-10-ARR	703	11,1%	24,1	379	5,698	1,740	0,008	15,052	2,711	0,0115	4917	0,122
CHE-11-ARR	700	11,0%	23,4	368	4,962	1,602	0,051	13,500	2,603	0,0467	4834	0,052
CHE-12-ARR	760	10,5%	23,0	361	8,916	2,188	0,130	24,680	3,206	0,1499	5945	0,131
CHE-13-ARR	713	10,6%	25,0	393	5,765	1,752	0,006	14,681	2,687	0,0175	5324	0,058
CHE-14-ARR	698	10,8%	22,5	353	5,397	1,686	0,020	15,272	2,726	0,0086	5246	0,051
CHE-15-ARR	776	10,5%	23,7	372	6,827	1,921	0,009	18,338	2,909	0,0081	5684	0,082
CHE-16-ARR	728	10,8%	23,2	364	6,436	1,862	0,001	17,662	2,871	0,0028	5467	0,103
CHE-17-ARR	733	10,5%	24,1	379	6,485	1,869	0,002	17,130	2,841	0,0005	5591	0,074
CHE-18-ARR	709	10,5%	24,0	377	5,720	1,744	0,007	15,173	2,720	0,0098	4662	0,095
CHE-19-ARR	732	10,7%	23,5	369	6,578	1,884	0,003	17,819	2,880	0,0038	4296	0,328
CHE-20-ARR	734	10,3%	24,0	377	6,416	1,859	0,001	17,019	2,834	0,0002	5309	0,095
MOYENNE	722	10,7%	23,6	371	6,269	1,827	-	16,918	2,819	-	5269	0,106
ECART TYPE	24	0,2%	0,6	-	0,881	-	0,135	2,506	-	0,140	422	0,074
COV	3,3%	2,3%	2,4%	-	14,1%	-	-	14,8%	-	-	8,0%	69,3%

Table - A-4 Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le hêtre

EPROUVETTE	MASSE VOLU- MIQUE [kg/m ³]	TENEUR EN HUMIDITE	LONGUEUR T _{PEN} [mm]	SURFACE CIAILLÉE [mm ²]	F _{MAX,MESURE} [kN]			F _{AX,MEAN} [MPa]			K _{SER} [N/mm]	JEU [mm]
					X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²	X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²		
HET-1-ARR	778	12,5%	23,9	375	7,874	2,064	0,015	20,974	3,043	0,015	6007	0,158
HET-2-ARR	742	12,6%	22,7	357	6,022	1,795	0,021	16,890	2,827	0,009	4867	0,070
HET-3-ARR	723	12,6%	23,9	375	5,643	1,730	0,045	15,031	2,710	0,044	5150	0,066
HET-4-ARR	787	12,9%	24,5	385	8,352	2,123	0,033	21,703	3,077	0,025	5843	0,110
HET-5-ARR	737	11,9%	23,6	371	7,175	1,971	0,001	19,355	2,963	0,002	5907	0,080
HET-6-ARR	742	11,3%	24,0	377	7,576	2,025	0,007	20,096	3,001	0,007	5691	0,134
HET-7-ARR	729	12,3%	24,7	388	7,652	2,035	0,009	19,722	2,982	0,004	5722	0,078
HET-8-ARR	725	12,3%	23,4	368	6,527	1,876	0,004	17,756	2,877	0,002	5338	0,064
HET-9-ARR	731	11,9%	23,2	364	6,741	1,908	0,001	18,499	2,918	0,000	5365	0,100
HET-10-ARR	717	12,4%	23,3	366	6,061	1,802	0,020	16,560	2,807	0,013	5427	0,072
HET-11-ARR	720	12,3%	24,2	380	5,962	1,785	0,024	15,685	2,753	0,028	4753	0,086
HET-12-ARR	735	12,0%	23,8	374	7,211	1,976	0,001	19,289	2,960	0,002	5710	0,068
HET-13-ARR	721	12,3%	25,2	396	7,252	1,981	0,002	18,321	2,908	0,000	5646	0,082
HET-14-ARR	750	12,7%	23,8	374	6,915	1,934	0,000	18,496	2,918	0,000	5382	0,071
HET-15-ARR	734	12,5%	24,9	391	7,063	1,955	0,000	18,057	2,894	0,001	5488	0,117
HET-16-ARR	731	11,9%	23,0	361	6,582	1,884	0,003	18,218	2,902	0,000	5486	0,087
HET-17-ARR	767	12,3%	23,8	374	7,684	2,039	0,010	20,555	3,023	0,011	6043	0,081
HET-18-ARR	753	12,3%	25,1	394	7,880	2,064	0,015	19,987	2,995	0,006	5955	0,110
HET-19-ARR	782	12,6%	23,9	375	7,502	2,015	0,005	19,982	2,995	0,006	5706	0,093
HET-20-ARR	713	12,6%	24,3	382	6,493	1,871	0,005	17,011	2,834	0,007	5290	0,082
MOYENNE	741	12,3%	24,0	376	7,008	1,942	-	18,609	2,919	-	5539	0,090
ECART TYPE	22	0,4%	0,7	-	0,742	-	0,108	1,771	-	0,097	355	0,025
COV	3,0%	2,9%	2,8%	-	10,6%	-	-	9,5%	-	-	6,4%	27,2%

Annexe B Résultats essais arrachement double

Table - B-1 dans le LVL	Config. 1 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement	84
Table - B-2 dans le bouleau	Config. 1 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement	85
Table - B-3 dans le chêne	Config. 1 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement	86
Table - B-4 dans le hêtre	Config. 1 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement	87
Table - B-5 dans le LVL	Config. 2 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement	88
Table - B-6 dans le bouleau	Config. 2 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement	89
Table - B-7 dans le chêne	Config. 2 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement	90
Table - B-8 dans le hêtre	Config. 2 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement	91

Table - B-1 Config. 1 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le LVL

EPROUVETTE	MASSE VOLU- MIQUE [kg/m ³]	TENEUR EN HUMIDITE	LONGUEUR T _{PEN} [mm]	SURFACE CIAILLÉE [mm ²]	EFFORT À RUPTURE MESURE [kN]			RESISTANCE À L'ARRACHEMENT [MP _A]			K _{SER} [N/mm]	JEU [mm]
					X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²	X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²		
LVL-1-ART1-1	827	6,4%	23,1	363	13,632	2,612	0,0000	37,568	3,626	0,0002	8,632	0,062
LVL-1-ART1-2	841	6,4%	23,1	363	13,915	2,633	0,0006	38,306	3,646	0,0011	8,358	0,079
LVL-1-ART1-3	837	6,3%	23,1	363	14,433	2,670	0,0038	39,733	3,682	0,0049	8,374	0,066
LVL-1-ART1-4	851	6,3%	23,5	369	15,149	2,718	0,0122	41,082	3,716	0,0107	8,261	0,174
LVL-1-ART1-5	856	6,3%	23,3	366	14,465	2,672	0,0041	39,480	3,676	0,0041	8,343	0,150
LVL-1-ART1-6	823	6,5%	23,3	366	12,608	2,534	0,0054	34,412	3,538	0,0054	7,645	0,103
LVL-1-ART1-7	800	6,4%	23,7	373	11,705	2,460	0,0218	31,409	3,447	0,0272	7,995	0,180
LVL-1-ART1-8	828	6,4%	23,5	370	13,917	2,633	0,0006	37,662	3,629	0,0003	7,512	0,457
LVL-1-ART1-9	835	6,4%	23,0	360	12,598	2,534	0,0055	34,947	3,554	0,0034	8,454	0,085
LVL-1-ART1-10	825	6,5%	23,2	364	12,552	2,530	0,0061	34,517	3,541	0,0050	8,195	0,081
LVL-1-ART1-11	841	6,6%	23,3	366	13,942	2,635	0,0007	38,052	3,639	0,0007	8,160	0,355
LVL-1-ART1-12	842	6,6%	23,4	367	13,835	2,627	0,0004	37,679	3,629	0,0003	8,320	0,104
LVL-1-ART1-13	848	6,4%	23,5	369	14,915	2,702	0,0090	40,405	3,699	0,0075	8,741	0,191
LVL-1-ART1-14	853	6,5%	23,3	366	14,161	2,651	0,0018	38,651	3,655	0,0018	8,386	0,079
LVL-1-ART1-15	769	6,5%	23,4	368	12,241	2,505	0,0106	33,267	3,505	0,0116	7,807	0,065
MOYENNE	832	6,42%	23,3	366	13,605	2,608	-	37,145	3,612	-	8212	0,149
ECART TYPE	23	0,09%	0,2	-	1,03	-	0,077	2,81	-	0,078	343	0,115
COV	2,71%	1,47%	0,86%	-	7,55%	-	-	7,57%	-	-	4,18%	77,27%

Table - B-2 Config. 1 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le bouleau

EPROUVETTE	MASSE VOLU- MIQUE [kg/m³]	TENEUR EN HUMIDITE	LONGUEUR T _{PEN} [mm]	SURFACE CIAILLÉE [mm²]	EFFORT À RUPTURE MESURE [kN]			RESISTANCE À L'ARRACHEMENT [MP _A]			K _{SER} [N/mm]	JEU [mm]
					X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²	X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²		
BOU-1-ART1-1	663	10,7%	28,0	440	10,065	2,309	0,0093	22,883	3,130	0,0098	7438	0,080
BOU-1-ART1-2	655	11,0%	28,4	446	10,796	2,379	0,0277	24,200	3,186	0,0240	8060	0,147
BOU-1-ART1-3	527	10,8%	28,2	442	7,919	2,069	0,0206	17,908	2,885	0,0213	6820	0,110
BOU-1-ART1-4	520	10,8%	28,1	441	7,533	2,019	0,0374	17,096	2,839	0,0371	6412	0,077
BOU-1-ART1-5	526	10,6%	28,0	439	7,399	2,001	0,0447	16,852	2,824	0,0428	6799	0,063
BOU-1-ART1-6	651	11,1%	28,0	439	10,651	2,366	0,0234	24,259	3,189	0,0248	7199	0,068
BOU-1-ART1-7	520	10,7%	28,1	441	7,170	1,970	0,0589	16,259	2,789	0,0589	5671	0,414
BOU-1-ART1-8	673	11,2%	28,3	444	9,853	2,288	0,0056	22,205	3,100	0,0048	7111	0,565
BOU-1-ART1-9	653	10,9%	28,0	440	10,129	2,315	0,0106	23,030	3,137	0,0111	7883	0,100
BOU-1-ART1-10	671	10,6%	28,0	439	8,603	2,152	0,0037	19,594	2,975	0,0031	7280	0,295
BOU-1-ART1-11	639	10,8%	27,9	439	10,773	2,377	0,0270	24,560	3,201	0,0288	8164	0,061
BOU-1-ART1-12	671	11,2%	28,1	442	9,762	2,278	0,0043	22,096	3,095	0,0041	6832	0,309
BOU-1-ART1-13	675	11,0%	28,0	440	8,296	2,116	0,0094	18,845	2,936	0,0090	6870	0,214
BOU-1-ART1-14	614	11,0%	28,0	440	9,842	2,287	0,0055	22,378	3,108	0,0059	7111	0,127
BOU-1-ART1-15	606	10,4%	28,3	445	9,615	2,263	0,0026	21,629	3,074	0,0018	7916	0,050
MOYENNE	618	10,85%	28,1	441	9,227	2,2127	-	20,920	3,0313	-	7171	0,179
ECART TYPE	62	0,24%	0,1	-	1,28	-	0,1441	2,89	-	0,1433	667	0,153
COV	10,06%	2,17%	0,51%	-	13,90%	-	-	13,83%	-	-	9,30%	85,57%

Table - B-3 Config. 1 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le chêne

EPROUVETTE	MASSE VOLU- MIQUE [kg/m³]	TENEUR EN HUMIDITE	LONGUEUR T _{PEN} [mm]	SURFACE CIAILLÉE [mm²]	EFFORT À RUPTURE MESURE [kN]			RESISTANCE À L'ARRACHEMENT [MP _A]			K _{SER} [N/mm]	JEU [mm]
					X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²	X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²		
CHE-1-ART1-1	749	12,3%	27,9	439	5,491	1,703	0,8949	12,518	2,527	0,8842	,153	0,092
CHE-1-ART1-2	815	12,2%	27,9	439	18,797	2,934	0,0810	42,853	3,758	0,0843	9995	0,703
CHE-1-ART1-3	748	12,2%	28,1	441	15,041	2,711	0,0038	34,107	3,530	0,0038	7557	0,967
CHE-1-ART1-4	754	12,3%	28,2	443	17,336	2,853	0,0415	39,101	3,666	0,0395	9647	0,461
CHE-1-ART1-5	843	12,7%	28,0	440	14,517	2,675	0,0007	33,005	3,497	0,0009	9091	0,180
CHE-1-ART1-6	776	12,2%	28,1	442	16,003	2,773	0,0153	36,224	3,590	0,0149	9708	0,243
CHE-1-ART1-7	785	12,2%	28,3	444	18,675	2,927	0,0774	42,048	3,739	0,0736	9912	0,082
CHE-1-ART1-8	735	11,9%	28,1	441	12,759	2,546	0,0106	28,931	3,365	0,0105	8421	0,193
CHE-1-ART1-9	777	12,3%	28,0	439	15,132	2,717	0,0046	34,466	3,540	0,0053	9213	0,183
CHE-1-ART1-10	751	12,1%	28,1	442	15,502	2,741	0,0084	35,089	3,558	0,0082	9255	0,343
CHE-1-ART1-11	718	12,1%	28,1	441	12,082	2,492	0,0248	27,396	3,310	0,0247	8077	0,290
CHE-1-ART1-12	842	12,5%	28,1	441	13,029	2,567	0,0067	29,518	3,385	0,0068	8296	0,115
CHE-1-ART1-13	742	12,0%	27,9	438	15,729	2,756	0,0113	35,890	3,580	0,0128	8288	0,144
CHE-1-ART1-14	737	12,0%	28,2	443	15,245	2,724	0,0057	34,386	3,538	0,0049	8373	0,171
CHE-1-ART1-15	738	11,5%	28,3	444	13,703	2,618	0,0010	30,879	3,430	0,0014	7769	0,151
MOYENNE	767	12,16%	28,1	441	14,603	2,649	-	33,094	3,468	-	8717	0,288
ECART TYPE	39	0,27%	0,1	-	3,19	-	0,291	7,21	-	0,290	896	0,248
COV	5,05%	2,21%	0,44%	-	21,86%	-	-	21,80%	-	-	10,28%	86,32%

Table - B-4 Config. 1 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le hêtre

EPROUVETTE	MASSE VOLU- MIQUE [kg/m³]	TENEUR EN HUMIDITE	LONGUEUR T _{PEN} [mm]	SURFACE CIAILLÉE [mm²]	EFFORT À RUPTURE MESURE [kN]			RESISTANCE À L'ARRACHEMENT [MP _A]			K _{SER} [N/mm]	JEU [mm]
					X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y)²	X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y)²		
HET-1-ART1-1	730	10,1%	22,0	345	13,274	2,586	0,0010	38,498	3,651	0,0004	7,514	-
HET-1-ART1-2	442	12,2%	22,2	349	13,466	2,600	0,0003	38,572	3,653	0,0004	6,438	0,266
HET-1-ART1-3	731	10,8%	21,9	344	14,814	2,696	0,0061	43,016	3,762	0,0082	5,560	0,156
HET-1-ART1-4	734	10,1%	22,2	349	13,466	2,600	0,0003	38,616	3,654	0,0003	6,438	3,840
HET-1-ART1-5	748	10,8%	22,4	351	17,256	2,848	0,0532	49,096	3,894	0,0495	8,971	0,252
HET-1-ART1-6	746	11,5%	22,3	350	12,383	2,516	0,0102	35,430	3,568	0,0108	7,399	0,600
HET-1-ART1-7	769	10,9%	22,3	351	11,294	2,424	0,0374	32,205	3,472	0,0397	7,592	0,287
HET-1-ART1-8	727	10,7%	22,1	347	11,969	2,482	0,0183	34,479	3,540	0,0171	8,509	0,402
HET-1-ART1-9	764	11,7%	22,3	350	14,361	2,665	0,0022	41,091	3,716	0,0020	8,146	0,236
HET-1-ART1-10	730	10,2%	22,4	352	15,014	2,709	0,0084	42,670	3,754	0,0068	9,390	0,064
HET-1-ART1-11	726	10,0%	22,2	349	13,697	2,617	0,0000	39,279	3,671	0,0000	9,000	0,175
HET-1-ART1-12	777	11,9%	22,2	349	15,715	2,755	0,0188	45,064	3,808	0,0187	8,996	5,210
HET-1-ART1-13	760	11,7%	22,2	349	13,375	2,593	0,0006	38,355	3,647	0,0006	8,883	0,589
HET-1-ART1-14	738	10,4%	22,3	350	14,155	2,650	0,0011	40,501	3,701	0,0009	7,974	0,214
HET-1-ART1-15	723	10,0%	22,1	347	12,447	2,522	0,0092	35,897	3,581	0,0082	7,881	6,560
MOYENNE	723	10,89%	22,2	349	13,779	2,618	-	39,518	3,671	-	7913	1,346
ECART TYPE	80	0,75%	0,1	-	1,53	-	0,109	4,32	-	0,108	1116	2,162
COV	11,02%	6,93%	0,61%	-	11,09%	-	-	10,93%	-	-	14,10%	160,61%

Table - B-5 Config. 2 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le LVL

EPROUVETTE	MASSE VOLU- MIQUE [kg/m³]	TENEUR EN HUMIDITE	LONGUEUR T _{PEN} [mm]	SURFACE CIAILLÉE [mm²]	EFFORT À RUPTURE MESURE [kN]			RESISTANCE À L'ARRACHEMENT [MP _A]			K _{SER} [N/mm]	JEU [mm]
					X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y)²	X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y)²		
LVL-2-ART1-1	810	7,9%	28,1	441	15,063	2,712	0,0006	34,126	3,530	0,0003	8935	0,219
LVL-2-ART1-2	798	8,0%	28,0	440	14,566	2,679	0,0001	33,117	3,500	0,0002	8845	1,210
LVL-2-ART1-3	811	7,8%	28,0	440	13,928	2,634	0,0030	31,668	3,455	0,0033	9131	0,047
LVL-2-ART1-4	804	7,9%	27,7	436	14,272	2,658	0,0009	32,772	3,490	0,0005	8795	0,186
LVL-2-ART1-5	805	7,9%	27,9	439	13,522	2,604	0,0071	30,826	3,428	0,0071	8208	0,077
LVL-2-ART1-6	821	8,1%	28,0	439	15,210	2,722	0,0011	34,613	3,544	0,0010	9074	0,217
LVL-2-ART1-7	809	8,1%	28,0	439	14,023	2,641	0,0023	31,940	3,464	0,0024	8294	0,113
LVL-2-ART1-8	805	7,8%	28,1	441	14,562	2,678	0,0001	32,991	3,496	0,0003	7705	0,100
LVL-2-ART1-9	807	7,8%	27,9	438	14,936	2,704	0,0002	34,112	3,530	0,0003	7596	0,084
LVL-2-ART1-10	802	7,8%	28,1	441	16,551	2,806	0,0139	37,531	3,625	0,0126	8226	0,173
LVL-2-ART1-11	812	7,6%	27,7	436	15,721	2,755	0,0044	36,098	3,586	0,0054	8229	0,198
LVL-2-ART1-12	799	7,6%	27,8	436	14,523	2,676	0,0002	33,318	3,506	0,0000	8341	0,052
LVL-2-ART1-13	796	7,8%	28,0	439	15,180	2,720	0,0010	34,575	3,543	0,0009	8703	0,156
LVL-2-ART1-14	805	7,6%	28,0	439	15,212	2,722	0,0011	34,617	3,544	0,0010	8165	0,237
LVL-2-ART1-15	829	7,9%	27,7	434	13,702	2,618	0,0051	31,547	3,451	0,0038	6729	0,629
MOYENNE	808	7,57%	27,9	439	14,73	2,689	-	33,59	3,513	-	8332	0,247
ECART TYPE	9	8,15%	0,144	-	0,81	-	0,0541	1,793	-	0,0529	640	0,301
COV	1,09%	0,17%	0,51%	-	5,47%	-	-	5,34%	-	-	7,68%	122,02%

Table - B-6 Config. 2 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le bouleau

EPROUVETTE	MASSE VOLU- MIQUE [kg/m³]	TENEUR EN HUMIDITE	LONGUEUR T _{PEN} [mm]	SURFACE CIAILLÉE [mm²]	EFFORT À RUPTURE MESURE [kN]			RESISTANCE À L'ARRACHEMENT [MP _A]			K _{SER} [N/mm]	JEU [mm]
					X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y)²	X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y)²		
BOU-2-ART1-1	675	11,4%	28,0	439	7,324	1,991	0,0978	16,668	2,813	0,0977	6614	0,171
BOU-2-ART1-2	615	10,9%	28,0	440	9,805	2,283	0,0004	22,293	3,104	0,0005	7701	0,373
BOU-2-ART1-3	631	11,2%	28,0	440	10,790	2,379	0,0056	24,534	3,200	0,0055	7349	0,709
BOU-2-ART1-4	635	11,0%	28,0	439	10,589	2,360	0,0031	24,096	3,182	0,0031	7840	0,641
BOU-2-ART1-5	643	11,3%	28,0	439	11,256	2,421	0,0137	25,616	3,243	0,0137	8277	0,641
BOU-2-ART1-6	591	10,9%	28,0	439	8,941	2,191	0,0128	20,366	3,014	0,0126	6078	0,606
BOU-2-ART1-7	598	11,2%	28,0	440	9,908	2,293	0,0001	22,526	3,115	0,0001	6977	0,712
BOU-2-ART1-8	586	11,3%	27,9	438	9,311	2,231	0,0053	21,246	3,056	0,0049	7333	0,950
BOU-2-ART1-9	598	11,4%	28,0	439	9,893	2,292	0,0001	22,512	3,114	0,0001	6900	0,305
BOU-2-ART1-10	590	11,2%	28,1	441	9,470	2,248	0,0031	21,492	3,068	0,0034	6346	0,291
BOU-2-ART1-11	646	10,6%	28,0	439	12,310	2,510	0,0426	28,013	3,333	0,0427	8453	0,442
BOU-2-ART1-12	597	10,6%	28,1	441	10,539	2,355	0,0026	23,898	3,174	0,0023	7936	0,280
BOU-2-ART1-13	655	11,8%	28,0	440	9,421	2,243	0,0037	21,419	3,064	0,0038	7347	0,557
BOU-2-ART1-14	620	11,0%	28,0	439	10,941	2,393	0,0078	24,899	3,215	0,0079	6740	0,671
BOU-2-ART1-15	636	10,6%	27,9	439	10,701	2,370	0,0044	24,396	3,194	0,0047	7151	0,670
MOYENNE	621	11,10%	28,0	440	10,080	2,3040	-	22,932	3,126	-	7269	0,535
ECART TYPE	27	0,34%	0,04	-	1,16	-	0,1205	2,641	-	0,1204	687	0,214
COV	4,41%	3,06%	0,15%	-	11,52%	-	-	11,52%	-	-	9,45%	40,11%

Table - B-7 Config. 2 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le chêne

EPROUVETTE	MASSE VOLU- MIQUE [kg/m³]	TENEUR EN HUMIDITE	LONGUEUR T _{PEN} [mm]	SURFACE CIAILLÉE [mm²]	EFFORT À RUPTURE MESURE [kN]			RESISTANCE À L'ARRACHEMENT [MP _A]			K _{SER} [N/mm]	JEU [mm]
					X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²	X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²		
CHE-2-ART1-1	838	12,6%	28,0	439	15,339	2,730	0,0523	34,938	3,554	0,0527	8363	0,402
CHE-2-ART1-2	670	11,2%	27,9	438	9,904	2,293	0,0436	22,599	3,118	0,0425	8704	0,125
CHE-2-ART1-3	890	12,4%	27,9	438	11,963	2,482	0,0004	27,296	3,307	0,0003	7494	0,338
CHE-2-ART1-4	728	12,1%	28,0	439	15,114	2,716	0,0458	34,426	3,539	0,0461	8998	0,274
CHE-2-ART1-5	775	11,5%	28,0	440	11,607	2,452	0,0025	26,389	3,273	0,0026	8479	0,793
CHE-2-ART1-6	683	10,9%	28,0	440	9,985	2,301	0,0402	22,701	3,122	0,0407	8233	0,387
CHE-2-ART1-7	680	10,9%	28,0	439	11,223	2,418	0,0070	25,540	3,240	0,0070	8829	0,131
CHE-2-ART1-8	720	11,8%	28,0	439	13,092	2,572	0,0050	29,794	3,394	0,0049	8640	0,477
CHE-2-ART1-9	687	12,1%	28,0	440	12,220	2,503	0,0000	27,759	3,324	0,0000	9053	0,595
CHE-2-ART1-10	677	11,0%	28,0	440	10,728	2,373	0,0166	24,391	3,194	0,0169	8348	0,374
CHE-2-ART1-11	759	11,2%	28,0	439	12,772	2,547	0,0021	29,065	3,370	0,0021	8849	0,382
CHE-2-ART1-12	762	11,2%	27,9	438	10,753	2,375	0,0160	24,536	3,200	0,0154	8259	0,448
CHE-2-ART1-13	801	13,3%	28,0	440	11,758	2,465	0,0014	26,710	3,285	0,0015	8306	0,269
CHE-2-ART1-14	758	12,6%	28,0	440	14,293	2,660	0,0250	32,497	3,481	0,0247	9810	0,365
CHE-2-ART1-15	742	12,1%	28,0	439	13,996	2,639	0,0188	31,851	3,461	0,0188	9433	0,552
MOYENNE	745	11,80%	28,0	439	12,316	2,502	-	28,033	3,324	-	8653	0,394
ECART TYPE	64	0,73%	0,04	-	1,75	-	0,141	3,98	-	0,140	554	0,171
COV	8,58%	6,21%	0,15%	-	14,21%	-	-	14,20%	-	-	6,41%	43,47%

Table - B-8 Config. 2 - Synthèse de l'effort maximal mesurée pour chaque essai d'arrachement dans le hêtre

EPROUVETTE	MASSE VOLU- MIQUE [kg/m³]	TENEUR EN HUMIDITE	LONGUEUR T _{PEN} [mm]	SURFACE CIAILLÉE [mm²]	EFFORT À RUPTURE MESURE [kN]			RESISTANCE À L'ARRACHEMENT [MP _A]			K _{SER} [N/mm]	JEU [mm]
					X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²	X _i	L _{N,Xi}	(L _{N,Xi} - m _y) ²		
HET-2-ART1-1	720	9,6%	28,0	439	14,564	2,679	0,0013	33,172	3,502	0,0013	8,741	0,075
HET-2-ART1-2	721	9,8%	27,9	438	13,466	2,600	0,0018	30,726	3,425	0,0016	6,438	0,266
HET-2-ART1-3	732	11,7%	27,9	439	14,814	2,696	0,0029	33,773	3,520	0,0030	5,560	0,156
HET-2-ART1-4	716	11,8%	28,0	439	13,466	2,600	0,0018	30,671	3,423	0,0017	6,438	0,266
HET-2-ART1-5	718	9,7%	28,0	439	17,256	2,848	0,0425	39,268	3,670	0,0422	8,971	0,252
HET-2-ART1-6	721	9,9%	27,9	439	12,383	2,516	0,0158	28,230	3,340	0,0155	7,399	0,600
HET-2-ART1-7	724	9,7%	28,0	439	11,294	2,424	0,0474	25,724	3,247	0,0474	7,592	0,287
HET-2-ART1-8	754	12,2%	27,9	438	11,969	2,482	0,0255	27,336	3,308	0,0246	8,509	0,402
HET-2-ART1-9	719	9,6%	28,0	439	14,361	2,665	0,0005	32,682	3,487	0,0005	8,146	0,236
HET-2-ART1-10	724	11,4%	28,0	439	15,014	2,709	0,0045	34,167	3,531	0,0044	9,390	0,064
HET-2-ART1-11	726	9,5%	28,0	439	13,697	2,617	0,0006	31,171	3,439	0,0007	9,000	0,175
HET-2-ART1-12	725	9,7%	28,0	439	15,715	2,755	0,0127	35,762	3,577	0,0125	8,996	0,388
HET-2-ART1-13	728	9,6%	28,0	440	15,423	2,736	0,0088	35,035	3,556	0,0083	7,869	0,851
HET-2-ART1-14	713	11,5%	28,0	439	14,092	2,646	0,0000	32,097	3,469	0,0000	8,545	0,182
HET-2-ART1-15	736	11,7%	28,0	440	14,271	2,658	0,0003	32,447	3,480	0,0002	7,964	0,106
MOYENNE	725	10,42%	28,0	439	14,119	2,642	-	32,151	3,465	-	7971	0,287
ECART TYPE	10	1,02%	0,04	-	1,52	-	0,109	3,43	-	0,108	1114	0,209
COV	1,38%	9,83%	0,13%	-	10,76%	-	-	10,68%	-	-	13,97%	72,88%