

PEUPLIER EN CONSTRUCTION

CAS D'APPLICATION DE LA DALLE ASSEMBLÉE DÉCALÉE CLOUÉE

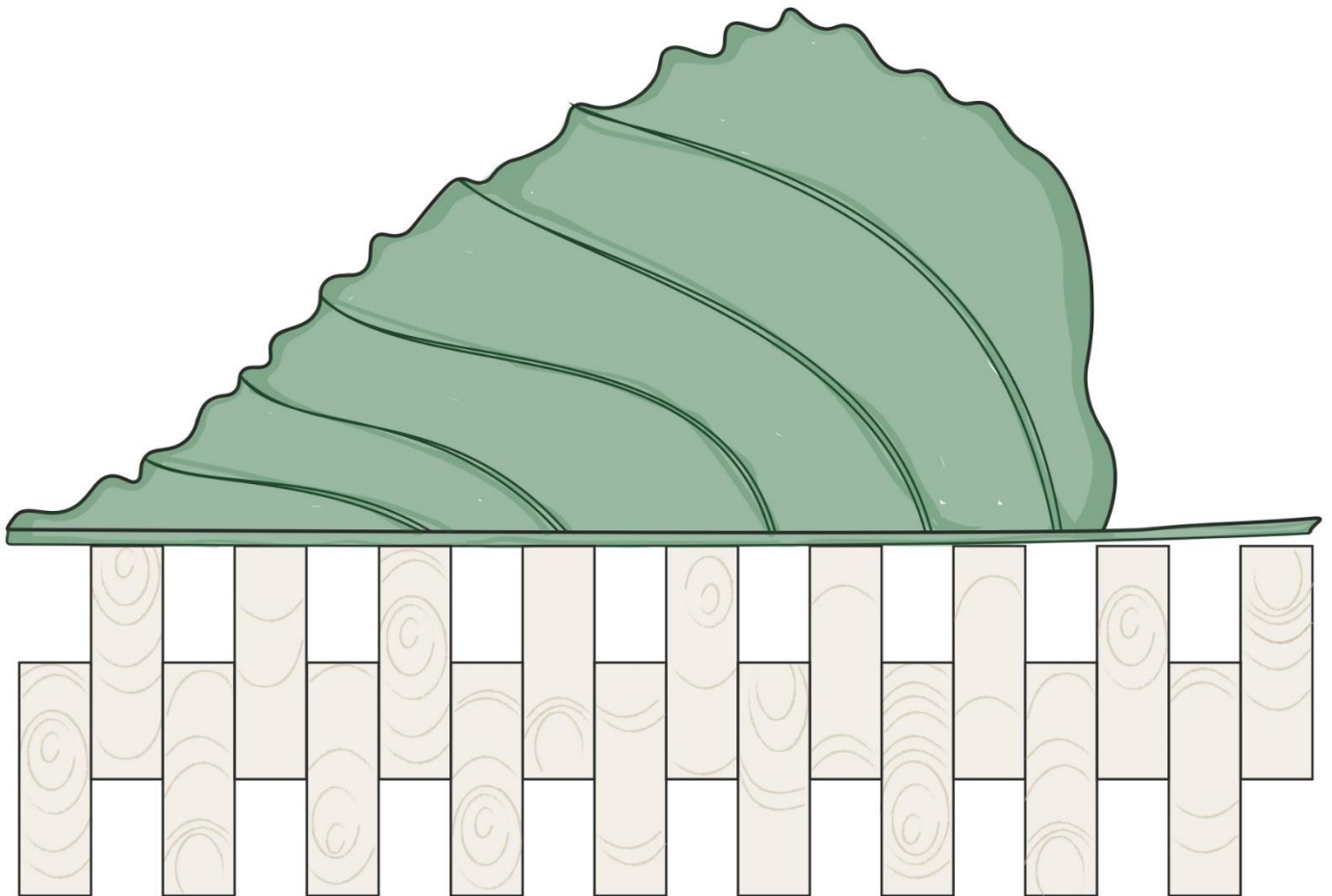


TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES.....	1
TABLE DES FIGURES	3
TABLE DES TABLEAUX.....	4
TABLE DES GRAPHIQUES.....	5
TABLE DES CARTES	5
GLOSSAIRE	6
REMERCIEMENTS.....	7
I. INTRODUCTION.....	8
II. ÉTAT DE L'ART DE L'UTILISATION DU PEUPLIER EN CONSTRUCTION.....	10
II.1. L'utilisation contemporaine du peuplier	10
II.1.1. Présentation de l'essence.....	10
II.1.1.1. Présentation générale	10
II.1.1.2. Localisation sur le territoire.....	11
II.1.1.3. Peuplier et environnement	12
II.1.1.4. Comparaison des différentes essences de bois avec le peuplier.....	13
II.1.1.5. Comparaison des différents cultivars de peuplier	13
II.1.2. Différents usages industriels du peuplier	15
II.1.3. Classement du peuplier et normes associées.....	17
II.2. Différents systèmes constructifs en peuplier	18
II.2.1. Le peuplier, un matériau structurel.....	18
II.2.1.1. Toiture en planches juxtaposées.....	18
II.2.1.2. Projet en peuplier mixant différentes techniques constructives.....	20
II.2.1.3. Pannes de charpente et porteurs verticaux	22
II.2.1.4. Poutre treillis en bois de petites sections.....	24
II.2.1.5. Caissons empilés autoportants	26
II.2.2. Retour d'expérience et enseignements à tirer sur l'utilisation actuelle du peuplier	27
II.2.2.1. Synthèse d'utilisation du peuplier.....	27
II.2.2.2. Les caractéristiques constructives.....	28
II.2.2.3. Les atouts du peuplier.....	30
II.2.3. Conclusion.....	30
III. EXPÉRIMENTATION D'UNE DALLE ASSEMBLÉE DÉCALÉE CLOUÉE	32
III.1. Principe constructif de la dalle O'portune® [33]	32
III.2. Réflexions sur la dalle assemblée décalée clouée	34
III.2.1. Qualités architecturales et aspects structurels	34
III.2.2. Mise en œuvre	35

III.3. Protocole envisagé pour l'expérimentation d'une dalle assemblée décalée clouée en peuplier	35
III.3.1. L'intérêt d'une expérimentation	35
III.3.2. Cas d'application proposé pour l'expérimentation.....	35
III.3.3. Prédimensionnement de la dalle assemblée décalée clouée	37
III.3.3.1. Calculs théoriques à l'ELU.....	39
III.3.3.2. Calculs théoriques à l'ELS	40
III.3.4. Description-des expérimentations retenues	41
III.3.5. Fiche de calcul des dalles expérimentées	43
III.3.6. Protocole d'expérimentation	47
III.3.6.1. Matériel à commander	47
III.3.6.2. Montage/assemblage des dalles.....	48
III.3.6.3. Présentation de l'expérience pour chaque proposition	49
III.3.7. Résultats attendus de l'expérimentation.....	51
III.4. Réalisation des expériences	51
III.4.1. Déroulement du protocole	51
III.4.2. Présentation des différentes dalles.....	52
III.4.3. Installation des dalles.....	56
III.4.4. Chargement des dalles	58
IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	60
IV.1. Résultat de chaque expérience	60
IV.1.1. Expérimentation 1 : Dalle de référence	61
IV.1.2. Expérimentation 2 : Dalle de peuplier Robusta orienté au vent dominant	63
IV.1.3. Expérimentation 3 : Dalle de peuplier Robusta non orienté au vent dominant.....	66
IV.1.4. Expérimentation 4 : dalle de peuplier avec plusieurs cultivars	67
IV.2. Comparaison et analyse des différentes expériences.....	69
IV.3. Analyse des résultats d'expérimentations et déduction par calcul des caractéristiques mécaniques de chaque dalle	71
IV.3.1. Calcul de la rigidité en flexion et du module d'Young de la dalle (voir feuille de calculs en annexe II.4.1).....	72
IV.3.2. Calcul de la contrainte de rupture : $\sigma_{rupture}$ (voir feuille de calculs en annexe II.4.2)	74
IV.3.3. Calcul de la contrainte élastique : $\sigma_{élastique}$ (voir feuille de calculs en annexe II.4.3)	76
IV.4. Analyse des résultats d'expérimentations en fonction des caractéristiques du peuplier	78
V. CONCLUSION.....	81
BIBLIOGRAPHIE	84

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Résumé des différents usages du peuplier [3].....	16
Figure 2: Tribunes du stade de football d'Étaples-sur-mer (62) [44] - Réalisé par Laurant Baillet.....	18
Figure 3: Plan des tribunes [44].....	18
Figure 4 : Coupe des tribunes [44].....	19
Figure 5: Installation de la toiture [44].....	19
Figure 6: Schéma de la couverture des tribunes [44].....	19
Figure 7: Photos de l'expérimentation à l'IUT de Béthune [44].....	20
Figure 8: Diagramme des efforts [44].....	20
Figure 9: Centre multi accueil faite à Courcelles-lès-Lens (62) [42] Réalisé par Laurant Baillet.....	20
Figure 10: Coupe montrant la toiture [41].....	21
Figure 11: Médiathèque municipale à Givenchy-en- Gohelle (62) [23] Réalisée par A&P Studio.....	22
Figure 12 : Coupes sur bâtiment (document réalisé par AP Studio - Laurence BASSIERE).....	22
Figure 13: Machine de Manfred Hudel (photo réalisée par Laurence BASSIERE) [26], [52] et [53].....	23
Figure 14: Machine d'expérimentation avec l'établissement Stabilame [26], [52] et [53].....	23
Figure 15: Salle polyvalente de Lezennes (59) [42] - Réalisé par Laurant Baillet.....	24
Figure 16 : Plan de la salle [43] et coupe longitudinale du bâtiment [30].....	24
Figure 17: Photos illustrant la mise en œuvre et des tests physiques [43].....	25
Figure 18: Principe de la poutre treillis [43].....	25
Figure 19: Maison solaire à Toul-Rosières (54) [31] - Réalisée par SAS Cartignies Canonica Architecture.....	26
Figure 20 : Frise chronologique des références en peuplier fait par auteur.....	27
Figure 21: Schéma de distribution de la grume [46].....	29
Figure 22: Section de bois coupé dans la grume fait par auteur.....	29
Figure 23: Coupe de la dalle O'pportune pour comprendre le système constructif [33].....	32
Figure 24: 2 manières de joindre les dalles entre elles [33].....	33
Figure 25: Photos d'applications de la dalle O'portune® [33].....	33
Figure 26: Schéma de plusieurs unités de dalle assemblée entre elles.....	36
Figure 27: Une unité de dalle.....	36
Figure 28: Dessin illustrant le cas d'application pour une dalle assemblée décalée clouée fait sous différents angles.....	36
Figure 29 : Coupe de la dalle assemblée décalée clouée.....	38
Figure 30: Plan de la dalle assemblée décalée clouée.....	39
Figure 31: Schéma illustrant la formule ci-dessus de l'inertie (en « comblant » les vides par des pleins).....	39
Figure 32: Coupes à l'échelle 1 de la dalle.....	41
Figure 33: Coupes à l'échelle 1/2 de la dalle.....	41
Figure 34: : Schéma de la dalle de référence.....	42
Figure 35: Schéma de la dalle de peuplier en C24.....	42
Figure 36: Schéma de la dalle peuplier avec des sections prélevées dans la même grume.....	42
Figure 37: Schémas de la dalle peuplier avec différents types de cultivar.....	43
Figure 38: Coupe des nouvelles dimensions de la dalle expérimentale.....	45
Figure 39: Schéma permettant de visualiser où sont placés les éléments et comment les disposer.....	48
Figure 40: Schémas illustrant les différentes étapes du montage de la dalle.....	49
Figure 41: Schémas illustrant le principe de mesures et relevé de la flèche.....	49
Figure 42: Synoptique des étapes de l'expérience.....	50
Figure 43: Schémas illustrant les appuis et le positionnement de la dalle.....	51
Figure 44: Schéma de vissage des planches de dalle.....	52
Figure 45: Photos de la construction des dalles.....	52

Figure 46: Explication de l'ordre de l'assemblage des planches avec des vis.....	53
Figure 47: Schémas montrant les bacs en OSB pour la charge en sable.....	53
Figure 48: Photos des différents bacs en OSB.....	53
Figure 49: Schéma de la dalle en épicéa.....	54
Figure 50: Photo montrant les planches de la dalle 2.....	54
Figure 51: Schéma de la dalle de peuplier Robusta orienté au vent dominant.....	54
Figure 52 : Photos des planches de la dalle 3.....	55
Figure 53: Schéma de la dalle peuplier Robusta non orienté au vent dominant.....	55
Figure 54: Photo des planches de la dalle 4.....	55
Figure 55: Schéma de la dalle peuplier avec différents cultivars.....	56
Figure 56: Photos illustrant le positionnement des appareils de mesure.....	56
Figure 57: Mesure avec le laser mètre (trait rouge) de la distance mesurée.....	57
Figure 58: Mesure avec le pied à coulisse et le laser mètre (traits rouges) et la distance mesurée.....	57
Figure 59: Mesure avec la feuille millimétrée avec un trou en rouge dans la feuille pour permettre de prendre la mesure par transparence de la planche de référence.....	57
Figure 60: Chargement du sable dans les caissons.....	58
Figure 61: Pose progressive des parpaings rang par rang en suivant la numérotation mentionnée.....	58
Figure 62: Photo des différentes fissures suite à rupture de la dalle 1.....	61
Figure 63: Schéma illustrant les vis qui se sont arrachées.....	62
Figure 64: Photo des différentes fissures suite à rupture de la dalle 2 bis.....	64
Figure 65: Photo des différentes fissures suite à rupture de la dalle 3.....	66
Figure 66: Photo des différentes fissures suite à rupture de la dalle 4.....	68
Figure 67: Schéma de distribution de la grume [46].....	79

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Tableau de la résistance et l'utilisation des bois en fonction des essences.....	13
Tableau 2 : Tableau de comparaison des différents types de cultivar en fonction de leur domaine d'utilisation fait par auteur [45] et [46].....	15
Tableau 3 : Comparatif des références précédemment citées.....	27
Tableau 4: Critères de dimensionnement d'une dalle fait par auteur.....	38
Tableau 5: Tableau des caractéristiques de la dalle assemblée décalée clouée (associée aux figures ci-dessus).....	39
Tableau 6: Résultats de calculs théoriques de la dalle à l'ELU.....	40
Tableau 7: Résultats de calculs théoriques de la dalle à l'ELS.....	40
Tableau 8: Rappel des résultats de calculs théoriques de la dalle à l'ELS.....	43
Tableau 9: Tableaux des différentes dimensions/critères à faire varier.....	44
Tableau 10: Tableau montrant les différentes dimensions/critères choisis pour l'expérimentation.....	45
Tableau 11: résultats calculs théoriques dalle expérimentée à l'ELU.....	46
Tableau 12: résultats calculs théoriques dalle expérimentée à l'ELS.....	46
Tableau 13 : Composition des différentes planches choisies pour la mise en œuvre de la dalle 2.....	54
Tableau 14: Composition des différentes planches choisies pour la mise en œuvre de la dalle 3.....	55
Tableau 15 : Composition des différentes planches choisies pour la mise en œuvre de la dalle 4.....	55
Tableau 16: Référence des différents appareils de mesure utilisés pour mesurer la flèche.....	56
Tableau 17: Feuille de relevé de mesures des expériences.....	59
Tableau 18 : Données des caractéristiques mécaniques du peuplier en fonction des différents cultivars [45] et [46]..	70
Tableau 19: Données issues des expériences réalisées.....	71

Tableau 20: Résultats des calculs pratiques de la raideur et du module d'Young dalle.....	73
Tableau 21 : Données des caractéristiques mécaniques du peuplier en fonction des différents cultivars [45], [46] et [48].....	74
Tableau 22: Comparaison des modules d'Young calculé et module d'Young de la littérature.....	74
Tableau 23: Résultats calculs pratiques de la contrainte de rupture des dalles.....	75
Tableau 24 : Données des caractéristiques mécaniques du peuplier en fonction des différents cultivars [45], [46] et [48].....	76
Tableau 25: Comparaison des contraintes de rupture calculé et contraintes de rupture de la littérature.....	76
Tableau 26: Résultats des calculs pratiques de la contrainte élastique des dalles.....	77
Tableau 27: Comparaison des contraintes élastiques des dalles.....	77

TABLE DES GRAPHIQUES

Graphique 1: Durée pour atteindre la maturité (an) avant utilisation en fonction des essences [3].....	10
Graphique 2: Volume de bois sur pied des peupliers cultivés dans les peupleraies par classe de diamètre [3].....	11
Graphique 3: Comparaison de lots de bois de peuplier en fonction de la fréquence et les module d'élasticité [15]....	14
Graphique 4: Données intéressantes réalisées pendant l'expérience « données quantitatives et qualitatives » [30]....	25
Graphique 5: Graphique type montrant le diagramme des charge-déplacement.....	60
Graphique 6: Diagramme des charge-déplacement de la dalle 1 en résineux.....	61
Graphique 7: Diagramme des charge-déplacement de la dalle 2 en peuplier cultivar Robusta dans la même grume au vent (charge tombée avant rupture).....	63
Graphique 8: Diagramme des charge-déplacement de la dalle 2 bis en peuplier cultivar Robusta dans la même grume au vent (avec une rupture).....	64
Graphique 9: Diagramme des charge-déplacement prenant en compte la dalle 2 et la dalle 2 bis.....	65
Graphique 10: Diagramme des charge-déplacement de la dalle 3 bis en peuplier cultivar Robusta dans la même grume non au vent.....	66
Graphique 11 : Diagramme des charge-déplacement de la dalle 4 en peuplier avec différents types de cultivar.....	67
Graphique 12: Diagramme des charge-déplacement pour la comparaison de toutes les courbes de chaque dalle.....	69
Graphique 13: Diagramme des charge-déplacement pour la comparaison de toutes les courbes de tendance de chaque dalle.....	69
Graphique 14: Points caractéristiques sur le diagramme des charge-déplacement.....	72

TABLE DES CARTES

Carte 1: Carte des volumes de feuillus et résineux en France.....	8
Carte 2: Carte des peupleraies par commune [4] et carte des peupleraies en fonction des vallées alluviales [5].....	11

GLOSSAIRE

BLC	Bois Lamellé-Collé
BMA	Bois Massif Abouté
CBS	Concept Bois Structure
CBT	Concept Bois Technologie
CE	Communauté Européenne
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CLT	Cross Laminated Timber
CMBS	Classement Mécanique des Bois de Structure
CNDB	Comité National pour le Développement du Bois
CNP	Conseil National du Peuplier
CNPF	Centre National de la Propriété Forestière
CO2	Dioxyde de carbone
CODIFAB	Comité professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois
COV	Composant Organique Volatile
CRPF	Centre Régional de la Propriété Forestière
DPLG	Diplômé Par Le Gouvernement
EN	Norme Européenne
FCBA	centre technique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement.
FNB	Fédération Nationale du bois
IGN	Institut National de l'information Géographique et forestière
IUT	Institut Universitaire de Technologie
LC	Lamellé-Collé
LVL	Laminated Veneer Lumber
MLP	Merci Le Peuplier
NF	Norme Française
OFB	Office Français de la Biodiversité
ONF	Office National des Forêts
OSB	Oriented Strand Board

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à mon travail et qui m'ont soutenue pendant cette période. Mais aussi à ceux qui m'ont permis d'évoluer et de me surpasser tout au long de ces semestres. La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à toutes ces personnes qui m'ont tendu la main.

Tout premièrement, je voudrais remercier les enseignants de séminaire : Mme Suzel BALEZ, Mme Nazila Kahina BELKADI, Mr Dalil HAMANI, Mr Marc LEYRAL, Mr Yves MAHIEU et Mr Benoît ROUGELOT qui m'ont suivi tout au long de mon mémoire. Vous m'avez donné des conseils avisés, répondu à mes nombreuses questions, transmis des outils méthodologiques indispensables pour conduire à bien mes recherches. Vos critiques et vos judicieux conseils ont guidé mes réflexions et m'ont fait progresser au fur et à mesure de mon mémoire.

Je voudrais exprimer toute ma gratitude à Mme BALEZ et Mme Nazila Kahina BELKADI pour leur implication et leur bienveillance ainsi qu'à toutes les corrections et différentes relectures qu'elles ont réalisées.

Votre soutien m'a permis de ne pas baisser les bras.

Je tiens également à remercier Mr LEYRAL pour m'avoir guidé plus particulièrement dans la compréhension des calculs et des différentes mises en œuvre pour les expérimentations.

Votre disponibilité et votre réactivité m'ont été précieuses.

Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui m'ont accordé du temps pour mieux appréhender mon sujet : Mme Elsa LIVERANI, Mme Prescillia RANSAY, Mr Laurent BAILLET, Mr Benjamin LAFARGE et Mr Hugues NOBECOURT, Mr Lucas JAY et Mr Emmanuel NAUDIN. Ils m'ont accordé des rendez-vous téléphoniques puis consacré d'autres temps de discussions au fil des semestres pour m'expliquer leur métier, les projets réalisés et leur savoir-faire.

Vous avez alimenté ma réflexion et permis d'affiner ma problématique, tout en me passionnant.

Un merci particulier à Mme Elsa LIVERANI, Mr Laurent BAILLET, Mr Emmanuel NAUDIN pour avoir partagé explications et informations ainsi que leurs réseaux de connaissances, mais surtout leur passion pour le bois de peuplier.

De plus vous avez fait évoluer mon mémoire en commentant mon rendu intermédiaire.

Un immense merci à Mr Hugues NOBECOURT qui m'a permis, en me donnant un lieu, de réaliser l'expérimentation de mes différentes propositions de dalles et mais aussi en mettant gracieusement à disposition tous les matériaux et outils nécessaires. Comment assez le remercier pour avoir pris le temps de m'expliquer son métier, de m'avoir fait visiter son entreprise, d'avoir partagé sa passion pour le peuplier et tant de bienveillance et de générosité ?

Grace à vous, j'ai pu pousser mon séminaire jusqu'à l'expérimentation et "casser des planches" de mes dalles.

Enfin, je tenais à exprimer toute ma reconnaissance à ma famille. A mes parents : Sophie et Jean-Luc et à mes sœurs : Juliette et Maude. Merci pour tout le soutien qu'ils m'ont apporté tout au long de mes études et de ne jamais avoir cessé de croire en moi. Particulièrement pour ces longues soirées de débat sur mon mémoire, ces vérifications de calculs, ces relectures très tardives où mes phrases devaient être reformulées, mes fautes d'orthographe corrigées. Ils ont su me soutenir au niveau émotionnel, moral, intellectuel, économique... Ils m'ont permis d'aller toujours plus loin.

Je ne pourrais jamais assez vous remercier d'avoir su rester patient, de m'avoir consacré autant de temps et un soutien inconditionnel.

MERCI

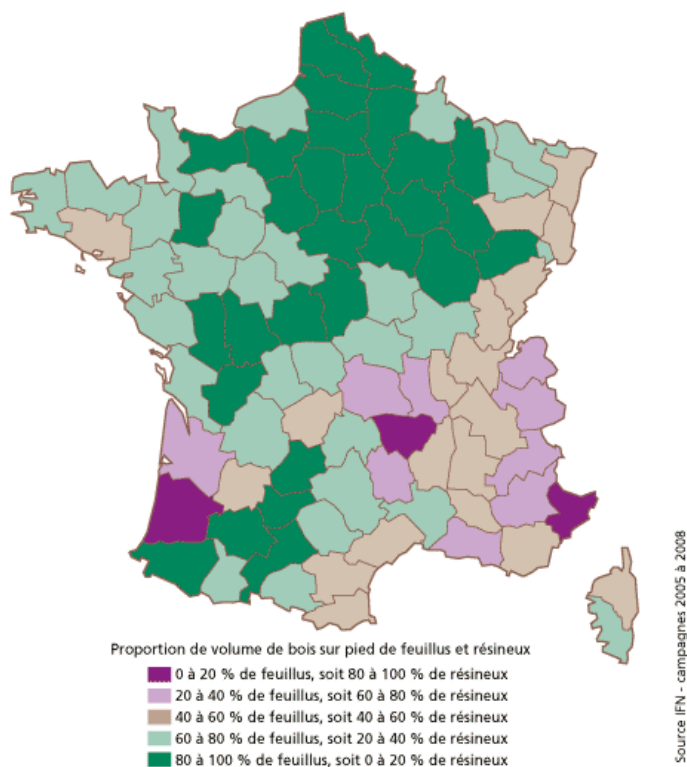
I. INTRODUCTION

“La forêt française vue d’avion va bien, 31% du territoire français, en 20 ans elle a gagné 10 fois la surface de Paris, ... maintenant si on regarde de plus près, la croissance des arbres diminue suite aux conditions climatiques et sanitaires, et les arbres meurent de plus en plus. En moins de dix ans, la mortalité des arbres a augmenté de près de 35%. Le changement climatique, nos forêts le subissent de plein fouet !

Y a-t-il d’ailleurs meilleure synthèse que la forêt, ... la forêt c’est notre absorbeur de CO2 le plus naturel du monde, elle préserve la biodiversité, fournit le matériau nécessaire à la transition énergétique, elle nous chauffe aussi parfois, elle fournit des emplois et elle est privée aussi pour $\frac{3}{4}$ de sa surface. ” [1].

En fait, si on veut préserver la ressource du bois, il est important de s’intéresser à la hiérarchie des usages de la forêt, c’est à dire ne pas prendre des arbres qui peuvent servir à construire des maisons, à fabriquer des objets pour du bois énergie mais plutôt stocker du bois pour la construction et utiliser des co-produits comme les sciures, les déchets et les arbres de faible dimension en énergie. On utilise malheureusement et exploite de plus en plus les forêts non pas pour du bois d’œuvre, mais pour des utilisations énergétiques (production de bois de chauffage, de granulés, biocarburant). Il faut aussi s’attacher à utiliser les ressources de bois disponibles localement pour répondre à la problématique de développement durable.

D’après les données de l’Inventaire forestier national de l’IGN qui décrit l’ensemble des écosystèmes forestiers et la ressource en bois des forêts publiques ou privées, la forêt française est essentiellement composée de feuillus et leur part ne cesse d’augmenter depuis 60 ans (voir carte1).



Carte 1: Carte des volumes de feuillus et résineux en France

Les efforts de plantation de résineux (notamment les douglas qui ont des grandes vertus pour la construction) ont été faits pour approvisionner la France en résineux car trop de sciages résineux sont encore importés et pas assez produits à ce jour.

Si on observe les besoins en construction, les charpentes sont essentiellement faites en résineux. Ce n'est pas une fatalité, on essaie de copier les pays du Nord qui ont des forêts majoritairement de résineux. Il serait intéressant de développer en France des techniques, qui consistent à utiliser plus facilement en construction nos feuillus comme par exemple celle des lamellés-collés. Si on avait une industrie qui demandait plus de feuillus, elle serait en adéquation avec les ressources forestières et elle irait dans le sens de protection des forêts. Il faut que toute la chaîne industrielle soit en adéquation avec la variété des différentes essences de feuillus qui poussent localement que peut fournir la Forêt française [1].

Si le chêne est un bois que l'on sait déjà bien valoriser, il existe d'autres variétés secondaires de feuillus de qualité plus ou moins variables. C'est pourquoi il faut avoir des scieries qui soient capables d'exploiter ces arbres pour fournir du bois d'œuvre. L'essence peuplier largement présent sur le territoire français, en est un bon exemple.

Pourquoi le peuplier ? Je me suis toujours intéressée à la construction bois, notamment les chalets de montagne. Le travail de fin de licence m'a permis de découvrir cette essence particulière, noble (bois blanc sans nœud), aux caractéristiques atypiques et aux multiples usages industriels.

Au fil de mes découvertes sur le sujet, mes interrogations se sont donc portées sur l'utilisation peu connue du peuplier en construction. Construire en bois local va dans le sens de la préservation de la biodiversité, peut-être une réponse au changement climatique. Les quelques références que j'ai pu trouver, les entretiens menés démontrent qu'il est possible de trouver d'autres alternatives à l'utilisation classique du peuplier et de développer les applications de construction, à partir du moment où l'on s'adapte aux singularités de cette essence.

Je vais donc développer dans ce séminaire les spécificités du peuplier et la thématique suivante : "Comment s'adapter face à l'hétérogénéité du peuplier pour une utilisation structurelle ?"

Mes différentes recherches ont permis d'explorer différents systèmes constructifs en peuplier et notamment la découverte du système constructif en peuplier des tribunes du stade de football d'Étaples-sur-mer (62), utilisant des planches clouées pour la réalisation de la couverture. Cet exemple d'application similaire au système constructif de la dalle O'portune® de l'entreprise CBS-CBT m'a non seulement donné l'idée d'expérimenter une dalle similaire en peuplier massif, mais m'a aussi orienté vers la problématique suivante :

LES PARTICULARITÉS DU BOIS PEUPLIER SONT-ELLES COMPATIBLES AVEC LE SYSTÈME CONSTRUCTIF DE LA DALLE ASSEMBLÉE DÉCALÉE CLOUÉE ?

II. ÉTAT DE L'ART DE L'UTILISATION DU PEUPLIER EN CONSTRUCTION

II.1. L'utilisation contemporaine du peuplier

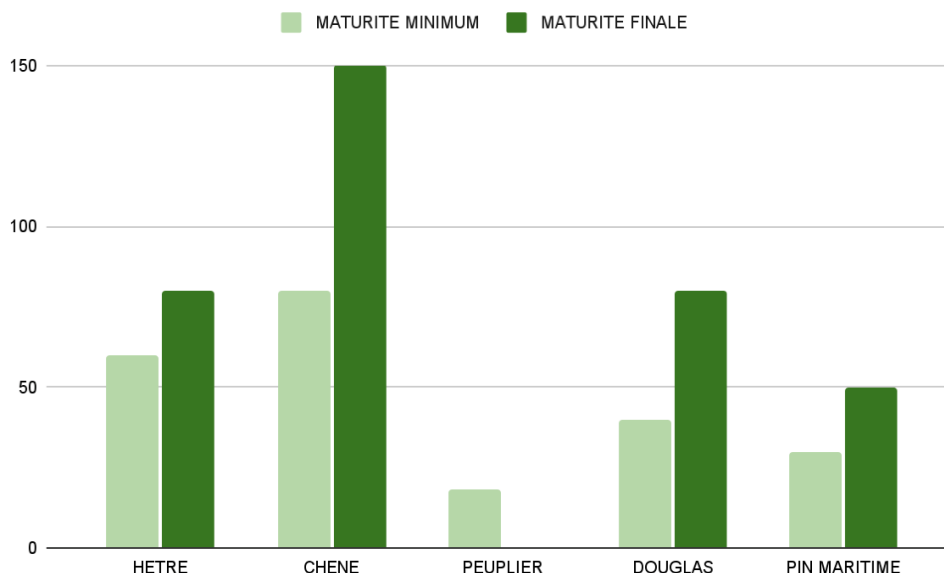
II.1.1. Présentation de l'essence

II.1.1.1. Présentation générale

"Historiquement, le bois de peuplier a toujours été utilisé en charpente. Dans certaines maisons, on retrouve encore des vieilles charpentes en peuplier. La volige est très répandue, surtout dans l'Ouest et le Nord de la France" [2].

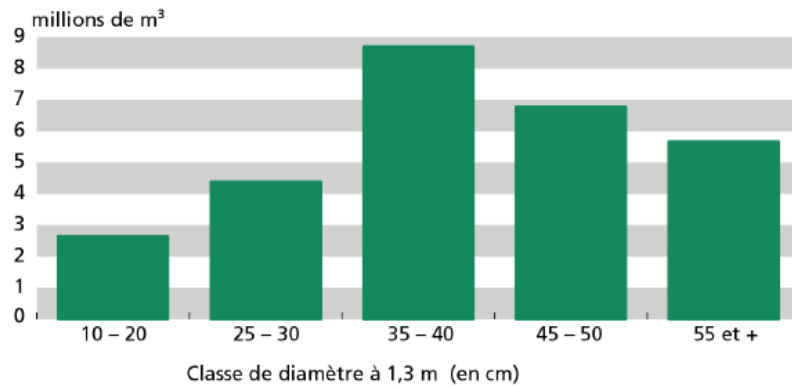
Ce bois à ce jour est très peu connu dans le domaine de la construction contrairement à d'autres essences de résineux ou de feuillus déjà largement utilisées en bois d'œuvre (chêne, hêtre). Le peuplier est plutôt communément utilisé dans l'industrie de l'emballage. Ses usages principaux sont les emballages légers en bois, la pâte à papier et le bois d'énergie, ... Ces différentes utilisations ont pu évoluer grâce à l'industrialisation des processus de transformation du bois.

Le peuplier fait partie des bois feuillus avec une silhouette très atypique, son feuillage a une forme de losange ou triangulaire avec une couleur très douce (vert pâle). Il appartient à la même famille que les saules (Salicacées). Il aime pousser en région tempérée dans les zones humides et en bord de rivières. L'essence peuplier compte plus de 35 espèces. C'est un bois blanc peu nouveau. De plus, il peut atteindre 20 mètres en moins de 15 ans. Sa croissance rapide le rend plus attrayant face à d'autres essences (comme le chêne où il faut au moins 80 ans pour arriver à maturité) (voir graphique 1).



Graphique 1: Durée pour atteindre la maturité (an) avant utilisation en fonction des essences [3]

Selon l'inventaire annuel de l'IGN de 2016, la répartition des volumes de bois sur pied en fonction des classes de diamètre est précisée dans le graphique 2 ci-dessous [5]. La croissance du peuplier permet d'avoir très rapidement des troncs de taille importante pour l'utilisation du bois d'œuvre.

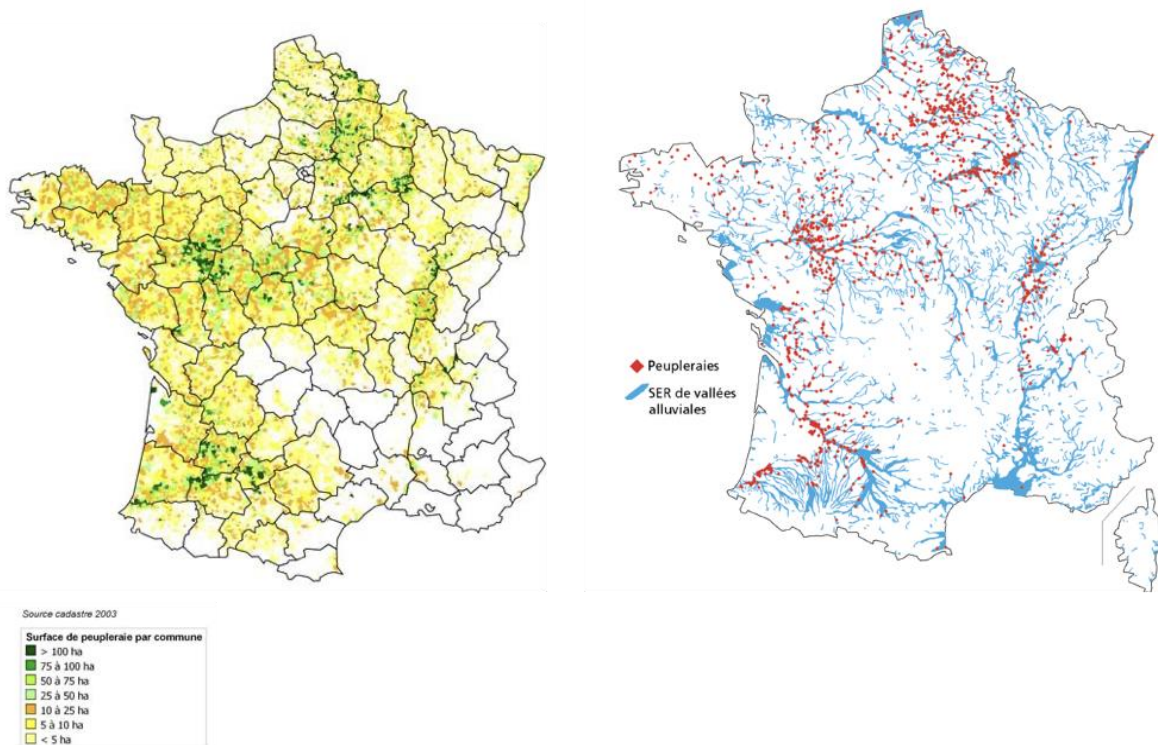


* Les classes de diamètre sont des valeurs centrées.
 Par exemple, la classe 10-20 regroupe les diamètres [7,5 - 17,5 cm],
 la classe 25-30 regroupe les diamètres [17,5 - 27,5 cm], etc.
 Les arbres d'un diamètre inférieur à 7,5 cm ne sont pas comptabilisés ▲

Graphique 2: Volume de bois sur pied des peupliers cultivés dans les peupleraies par classe de diamètre [3]

II.1.1.2. Localisation sur le territoire

L'exploitation de ce bois est aussi intéressante d'autant qu'il pousse largement sur le territoire français (voir carte 2 ci- dessous) ce qui permet une utilisation locale.



Carte 2: Carte des peupleraies par commune [4] et carte des peupleraies en fonction des vallées alluviales [5]

Les principales régions où sont cultivés les peupliers sont :

- Hauts de France,
- Centre-Val de Loire,
- Pays de la Loire,
- Bretagne,
- Occitanie.

Les données présentées par Emmanuel Naudin durant un colloque "Du peuplier pour l'avenir" précisent le rang du peuplier en comparaison d'autres essences :

- "Le peuplier représente 2% des surfaces feuillues avec 200 000 hectares, mais il passe relativement inaperçu à l'échelle du paysage forestier français.
- Pourtant c'est la deuxième essence que l'on récolte après le chêne, c'est-à-dire 27% de la récolte.
- La France est le 1er producteur européen et est au 2ème rang mondial après la Chine. Il est récolté chaque année, 220 m³/ha de bois d'œuvre " [6]
- Les régions qui aident au reboisement des peupliers suivant la charte "Merci Peuplier" sont les suivantes : Poitou-Charentes, Nouvelle-Aquitaine, Centre-Val-de-Loire, Grand-Est, Pays de la Loire [7]

II.1.1.3. Peuplier et environnement

Le peuplier, arbre souvent trouvé en zone humide, a des impacts positifs et négatifs sur son environnement concernant principalement l'implantation en zone humide, la biodiversité au sein des peupleraies et le stockage du carbone. En France, ces impacts varient selon les variétés de peupliers plantés, l'emplacement de la peupleraie et surtout selon la station (interaction sol/climat).

Le peuplier est aussi un arbre qui supporte bien les sols humides. Il est donc fréquent en zones humides et les boisements aux bords des cours d'eau appelés ripisylves. Il joue un rôle important dans la filtration des nappes phréatiques et de stockage en eau. Il joue aussi un rôle non négligeable dans la prévention des risques d'inondation. En effet, la ripisylve et les peupliers peuvent limiter les conséquences des crues en freinant les courants d'eau et diminuer l'amplitude de celle-ci [9]. Ils permettent de limiter l'érosion du sol avec sa structuration racinaire. Toutefois, lorsqu'il est placé en bordure direct du cours d'eau, certaines variétés de peuplier ne permettent pas la stabilisation des berges et peuvent causer des problèmes d'embâcles.

De plus, le peuplier est très efficace pour la dépollution des sols ou la phytoremédiation [10]. En effet, le peuplier est reconnu pour pouvoir décontaminer les sols pollués en zinc, cadmium, chrome, cuivre, mercure et composés organiques. Sur les sols habituels, son système racinaire (système racine / mycorhizes / bactéries) favorise particulièrement la filtration en nitrates et phosphates des nappes phréatiques [11].

Les avis sur les impacts des peupleraies sur la biodiversité sont controversés. La plantation d'une peupleraie est souvent accusée d'une banalisation de la biodiversité. L'installation d'une seule espèce et avec une maturité rapide (donc récolte fréquente) limite l'installation d'autres espèces. De plus, la présence de bois mort et de vieux arbres reste rare limitant alors la présence biodiversité associés comme les insectes saproxyliques, les chauves-souris et les oiseaux arboricoles.

On rencontre dans les peupleraies des habitats et espèces de faunes et de flores patrimoniaux et une biodiversité « plus ordinaire ». De plus, les peupleraies constituent un réservoir de milieux ouverts et semi-ouvert avec parfois la biodiversité associée à ces milieux. Les peupleraies peuvent aussi être utilisées comme couloir écologique [11]. La plantation d'une peupleraie peut être aussi considérée comme une simple modification voire une amélioration de biodiversité lorsqu'elle remplace par exemple une parcelle agricole à faible degré de naturalité.

Le peuplier (comme toutes plantes) réalise la photosynthèse et stocke du carbone, c'est donc un réservoir de carbone. Toutefois, la croissance rapide du peuplier lui permet d'avoir un stockage rapide du carbone atmosphérique [11]. En France, le stockage de carbone par les peupleraies est estimé à 14 tC/ha/an [CNP, 2020]. Dans un contexte de changement climatique, le stockage de carbone est un élément non négligeable.

Finalement, le peuplier est souvent utilisé dans les systèmes d'agroforesterie (pratiques associant des arbres avec des cultures et/ou animaux sur une même parcelle agricole). Cette pratique permet d'avoir une

productivité agricole et un stockage de carbone accru tout en étant, plus adapté au changement climatique, plus favorable à la biodiversité que des cultures simples [13].

II.1.1.4. Comparaison des différentes essences de bois avec le peuplier

Voici quelques caractéristiques physiques du peuplier : « C'est un bois tendre, léger aux fibres longues. Il est moyennement nerveux, sa résistance mécanique est bonne malgré son poids et il résiste bien en flexion.

- Masse volumique : entre 420 et 480 Kg/m³ (bois léger à très léger)
- Module de Young : 8 800 à 9 800 MPa en moyenne
- Dureté : 1,3 N/mm (bois très tendre)
- Stabilité : Moyenne » [14]

Voici ci-après le tableau 1 de comparaison des différentes essences de feuillus et résineux utilisés en bois d'œuvre.

ESSENCES	Masse volumique	Module de Young	Dureté	Stabilité	Usages en lien avec la construction
PEUPLIER	420 et 480 Kg/m ³ (bois léger à très léger)	8 800 à 9 800 MPa	1,3 N/mm (bois très tendre)	Moyenne	Structure (exceptionnellement)
CHATAIGNER	565 et 750 Kg/m ³ (bois mi-lourd)	8 500 à 13 300 MPa	2,9 N/mm (bois tendre à mi-dur)	Moyenne	Structure Pages
HÊTRE	680 et 710 Kg/m ³ (bois mi-lourd)	14 300 à 15 300 MPa	3,9 à 4,2 N/mm (bois mi-dur à dur)	Faible	Structure (rare)
CHÊNE	700 et 800 Kg/m ³ (bois mi-lourd à lourd)	12 500 MPa	3 à 5 N/mm (Bois mi-dur à dur)	Moyenne	Structure
FRÊNE	680 et 720 Kg/m ³ (bois mi-lourd)	12 900 MPa en moyenne	5,1 à 5,3 N/mm (bois mi-dur)	Moyenne	Pas en structure
EPICÉA	450 Kg/m ³ (bois léger à très léger)	11 000 à 11 900 MPa	1,4 à 2,2 N/mm (bois très tendre)	Moyennement stable	Structure (ossature notamment)
DOUGLAS	540 Kg/m ³ (bois moyennement lourd)	11 100 à 12 100 MPa en moyenne	2,2 à 3,2 N/mm (bois tendre)	Moyennement stable	Structure (ossature notamment)
SAPIN	450 à 490 Kg/m ³ (bois léger à moyennement lourd)	12 200 à 14 300 MPa en moyenne	1,5 à 2,5 N/mm (bois très tendre)	Moyennement stable	Structure (ossature notamment)

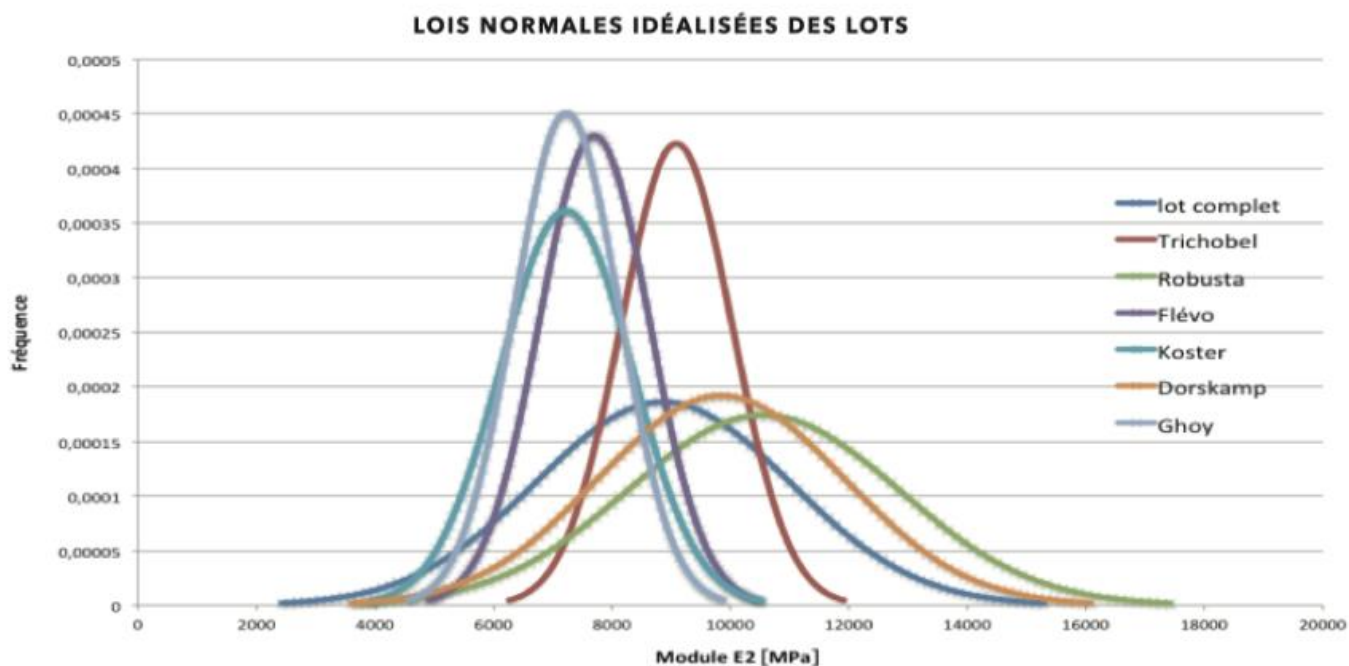
Données de la Fédération nationale du bois (Préférez les bois de France, 2016) [14]
Tableau 1 : Tableau de la résistance et l'utilisation des bois en fonction des essences

Ce tableau 1 donne les caractéristiques moyennes des différentes essences. Il démontre que les caractéristiques du peuplier (notamment le module d'Young) sont en deçà de celles des bois résineux généralement utilisés en structure (épicéa, sapin, douglas). C'est pourquoi il est indispensable de s'intéresser plus précisément aux différents cultivars de peuplier.

II.1.1.5. Comparaison des différents cultivars de peuplier

L'essence de peuplier dénombre plus de 35 espèces (ou cultivars).

D'après les études du CMBS [15], il est aussi important de remarquer que ces différents cultivars du peuplier ont un module d'élasticité qui peut être plus ou moins homogène. Ici, est réalisée la comparaison des lots (ensemble de pièces issues de grumes de même essence) de six essences différentes de peuplier : DORSKAMP, ROBUSTA, KOSTER, GHOY, FLÉVO et TRICHOBEL.



Graphique 3: Comparaison de lots de bois de peuplier en fonction de la fréquence et les module d'élasticité [15]

Ce graphique permet de distinguer clairement 2 groupes de cultivars :

- un premier groupe dont la valeur médiane du module d'élasticité avoisine les 10 000 MPa.
- un second groupe avec une valeur médiane inférieure (autour de 7500 MPa)

Construire en essence de DORSKAMP ou ROBUSTA (premier groupe) demande une mesure du module d'élasticité pièce par pièce. En effet, la variance du module d'élasticité de ces espèces de peuplier est plus élevée (amplitude importante entre les valeurs maximales et minimales) ce qui se traduit par un lot hétérogène (voir graphique 3).

A l'inverse, construire avec les essences KOSTER, GHOY, FLEVO et TRICHOBEL (second groupe) ne demande pas une mesure du module d'élasticité pièce par pièce mais une vérification par lot. En effet, la variance du module d'élasticité de ces espèces de Peuplier est faible (amplitude faible entre les valeurs maximales et minimales) ce qui se traduit par un lot homogène (voir graphique en dessous).

“L'essence TRICHOBEL possède le lot le plus homogène avec en plus une valeur de module d'élasticité élevée. Par ailleurs, il présente une facilité de sciage et une grande stabilité dimensionnelle lors du séchage.”

On peut en conclure qu'il est important d'utiliser le peuplier en construction à condition d'utiliser les essences à bon escient en structure verticale (poteaux poutres et ossature bois) et horizontale / charpente (solivage traditionnel / planchers cloués / panneaux CLT / caissons de toiture).

Voici le tableau 2 récapitulatif des cultivars et de leurs domaines d'utilisation [45] et [46] :

CULTIVAR	STRUCTURE	UTILISATION EN PALETTE	MENUISERIE	EMBALLAGE LEGER, PANNEAUX CONTREPLAQUES ET LVL			PAPETERIE
				APTITUDE EN DEROULAGE	QUALITE DE PLACAGES VERTS	QUALITE MECANIQUE DES PANNEAUX	
A4A							
ALCINDE							
BRENTA							
DVINA							
I-214							
KOSTER							
LAMBBRO							
LENA							
MELLA							
POLARGO							
SOLIGO							
TARO							
TRICOBEL							
TRIPLO							
BEAUPRE							
BLANC DU POITOU							
DORSKANP							
FLEVO							
FRITIZI PAULEY							
GHOY							
I214							
I 45/51							
RASPALJE							
ROBUSTA							

Légende :

Vert : Cultivar pouvant être utilisé sans problème.

Orange : Cultivar utilisable avec des précautions préalables : tri sélectif ou classement visuel des grumes/billons ou adaptation du process industriel.

Vert : Cultivar à éviter pour l'utilisation donnée.

Tableau 2 : Tableau de comparaison des différents types de cultivar en fonction de leur domaine d'utilisation fait par auteur [45] et [46]

Le tableau 2 illustre la variété de cultivars et leurs particularités. On peut constater que tous les cultivars ont une bonne aptitude en déroulage. Deux cultivars se distinguent pour un usage dans la majorité des domaines : le SOLIGO sans exception et le ROBUSTA à l'exception du domaine de la papeterie. Les autres cultivars ont des usages plus limités et ce tableau illustre l'hétérogénéité du peuplier en fonction des cultivars.

II.1.2. Différents usages industriels du peuplier

Les caractéristiques physiques du peuplier facilitent ses utilisations industrielles (voir figure 1) :

- bois tendre, il est facile à travailler et donc aussi très économe en énergie
- robuste mais souple
- léger, résistant
- son aspect velouté et blanc léger est très apprécié pour de nombreuses applications



Figure 1: Résumé des différents usages du peuplier [3]

Le peuplier est un bois tendre qui est facile à travailler. Voici ses principaux usages industriels [16] :

- **Emballages légers :**

“Le bois de peuplier permet de fabriquer des emballages légers et robustes (cagettes...) très prisés par exemple dans le secteur alimentaire (boîtes alimentaires, ...). Leur fabrication par déroulage, sciage et assemblage, est beaucoup moins consommatrice d’énergie que celle des emballages équivalents en carton ou en plastique.”

- **Sciage :**

“Les palettes, emballages industriels ou la literie restent les emplois les plus connus des sciages de peuplier, levier de valorisation incontournable des bois de plus petites dimensions. Les sciages de peuplier seront aussi de plus en plus valorisés en construction. Le bois de peuplier, une fois chauffé (traitement thermique), peut même être utilisé en extérieur”

- **Panneaux / contreplaqués :**

“Façonné à 100 % en peuplier ou en mélange avec d’autres essences, le panneau contreplaqué français est un matériau performant capable de répondre à la diversité des exigences tant de l’agencement intérieur,

du mobilier et de la menuiserie, que de l'industrie automobile, l'aéronautique, le nautisme ou la caisserie alimentaire et industrielle.

Depuis 2015, la production française de contreplaqué à partir de peuplier a augmenté de 40%, contribuant au renforcement de la filière populicole en termes de valeur ajoutée, débouchés, réponses aux enjeux d'économie circulaire & solidaire et de circuits courts."

- **Cosmétique / Médecine**

"Le peuplier est connu pour ses propriétés cosmétologiques et pour la santé. La Propolis extraite des bourgeons de peuplier est particulièrement réputée, et sa sève "eau de Peuplier" sert entre autres dans la confection de savon. "

Dès l'Antiquité, les Grecs avaient reconnu des vertus thérapeutiques au peuplier. Le médecin grec Galien recommandait une pommade faite avec les bourgeons de peupliers. Le peuplier a aussi certaines vertus thérapeutiques : anti-inflammatoires, antiseptiques, cicatrisantes, diurétiques et calmantes [34].

- **Autres utilisations :**

"La partie du bois qui n'est pas valorisable en déroulage ou en sciage, ainsi que les produits connexes des produits plus nobles et ses broyats de recyclage, peuvent servir à fournir de l'énergie, fabriquer des panneaux de particules, faciliter le compostage de biodéchets, ou encore servir de paillage."

L'utilisation massive du peuplier dans ces différents domaines a naturellement limité son emploi en tant que bois d'œuvre en comparaison des essences de feuillus ou de résineux largement utilisés en construction.

II.1.3. Classement du peuplier et normes associées

Il est important de réaliser une analyse normative comparative des différents bois d'œuvre et de situer le peuplier par rapport aux autres essences.

Les normes définissent des classes, des essences et des provenances ayant des propriétés de résistances similaires, ce qui les rend ainsi interchangeables. Cette standardisation permet alors à un concepteur de prescrire une classe de résistance choisie et d'utiliser les valeurs de résistance caractéristiques de cette classe dans les calculs de conception [49].

En effet, la méthode de classement du bois d'œuvre va se faire en fonction des connaissances des propriétés mécaniques. Les deux méthodes visuelle et mécanique existent pour réaliser ce classement (voir annexe IV.).

Historiquement, le peuplier est un bois particulier puisqu'il est classé comme un résineux (lettre C) lorsque l'on donne sa classe de résistance mécanique maximale [35]

Pour développer l'utilisation structurelle du peuplier dans les meilleures conditions, l'orientation a été prise de passer par des mesures de la résistance mécanique systématique pièce par pièce pour viser des valorisations différentes en fonction de la performance des bois (création de lots homogènes)" [15].

Les études du CMBS et les entretiens réalisés auprès des professionnels utilisant le peuplier [35, 36, 37, 38, 39] démontrent que le peuplier est un bois particulier avec un classement atypique à l'inverse des autres essences. Sa classe mécanique peut aller jusqu'à C35 et est comparable à celle d'autres essences de résineux et feuillus couramment utilisés en bois structurel.

Les variétés de peupliers exigent donc des contrôles pièce par pièce compte tenu de l'hétérogénéité de lots de grumes pour un usage en construction. Le tableau récapitulatif des cultivars de leurs domaines

d'utilisation définit les essences à retenir pour une utilisation en bois d'œuvre (voir tableau 2 paragraphe II.1.2).

II.2. Différents systèmes constructifs en peuplier

Des références intéressantes ont confirmé ma réflexion sur cette essence qui est utilisée dans une multitude de domaines (l'agroalimentaire, la structure finition extérieure ou intérieure). Mais l'intérêt recherché est de trouver des projets dans lesquels le peuplier est utilisé en tant que bois d'œuvre. La plupart des sources que je présente, se situent dans les Hauts de France. La construction en bois local et en essence peuplier s'est fortement développée dans cette région depuis ces dernières années. Tous ces exemples sont également réalisés en circuit court. Ces références sont classées par système constructif de la plus pertinente à la moins importante par rapport à l'utilisation du bois de construction en peuplier.

II.2.1. Le peuplier, un matériau structurel

II.2.1.1. Toiture en planches juxtaposées



Figure 2: Tribunes du stade de football d'Étaples-sur-mer (62) [44] - Réalisé par Laurant Baillet

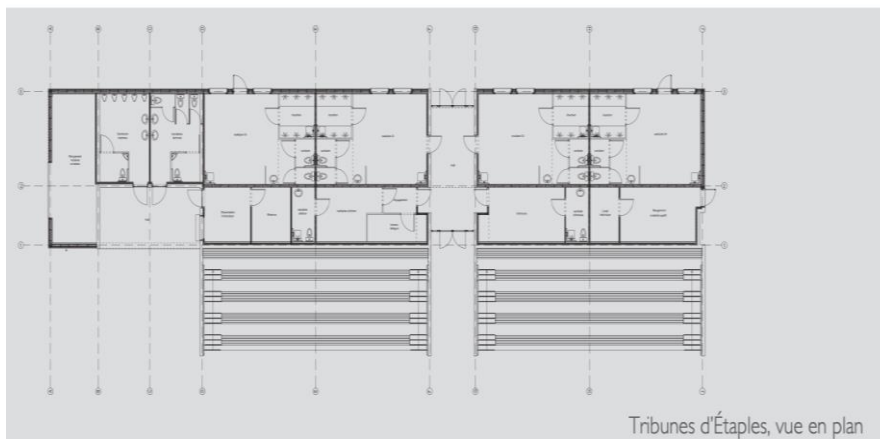


Figure 3: Plan des tribunes [44]

« La structure de la nouvelle tribune mesure 15,00m avec un porte-à-faux de 5,00m au-dessus des tribunes » [44]. Le porte-à-faux correspond donc à 1/3 de la toiture globale (voir figure 3)

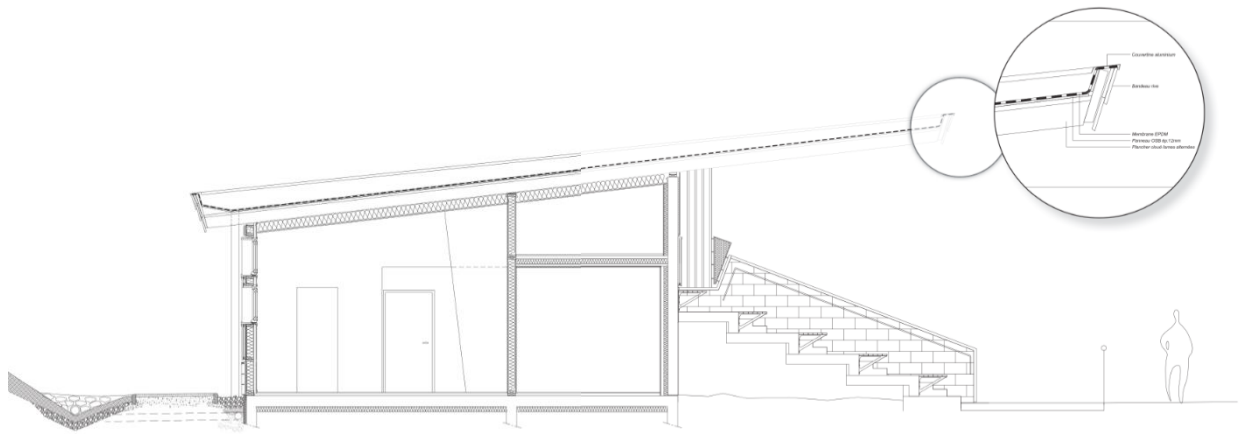


Figure 4 : Coupe des tribunes [44]



Figure 5: Installation de la toiture [44]

« Afin de produire des pièces de longueur souhaitée, des essais d'aboutage par entures collées ont été effectués permettant de produire les planches de 15,00m et de section 48x205mm nécessaires au projet. Des dalles de plancher cloué de 15,00m de longueur ont été pré assemblées en atelier à un module de 48cm de large.

Afin d'obtenir une inertie suffisante, les planches juxtaposées sont clouées entre elles avec un décalage, une planche sur deux de 70mm dans le sens de la hauteur. Le clouage a été réalisé en quinconce sur les 135 mm de chevauchement avec des pointes torsadées de 100 mm. » [44].

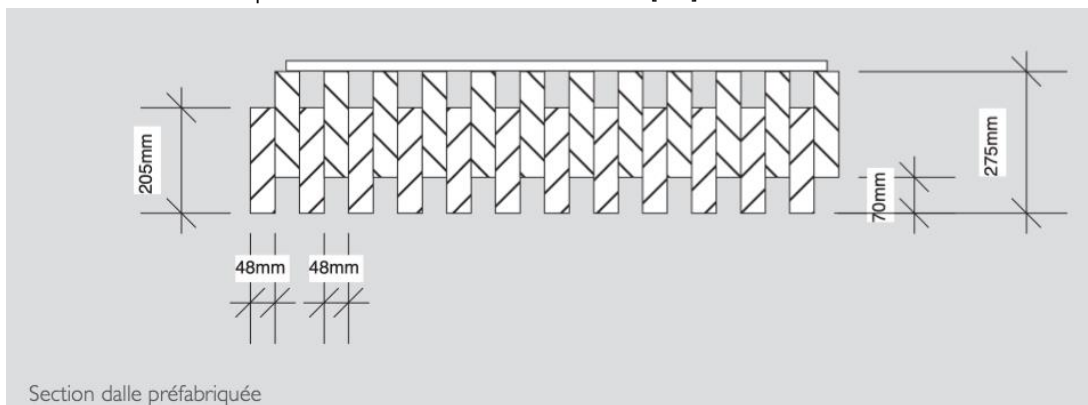


Figure 6: Schéma de la couverture des tribunes [44]

Des essais ont été réalisés à l'Institut Universitaire de Technologie de Béthune pour vérifier :

- La résistance de flexion sous contrainte à trois points
- La résistance en sortie de séchoir
- La fréquence de résonance de la toiture sous sollicitation des vents extrêmes
- La résistance à la flexion sous charge de service
- La charge de rupture « La rupture a eu lieu à 2,5 fois la contrainte admissible » [44].



Essais à l'IUT de Béthune

Figure 7: Photos de l'expérimentation à l'IUT de Béthune [44]

C'est principalement la déformation de la poutre sous les charges de vent extrême qui a permis de déterminer la section des dalles bois constituant la couverture des tribunes.

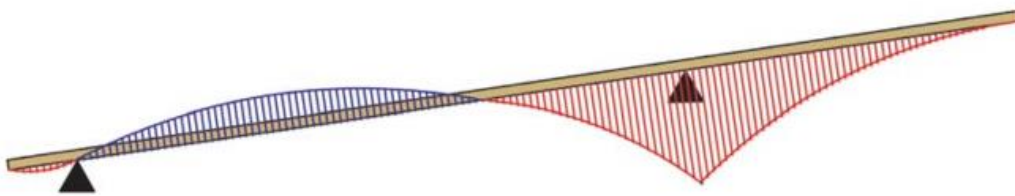


Figure 8: Diagramme des efforts [44]

Ce projet a été réalisé par retour d'expérience avec un porte à faux de 5 m : "Porté par le savoir-faire et la passion de Laurent Baillet, l'architecte, l'ensemble des acteurs a contribué à la réalisation d'un projet innovant autour d'une essence de bois locale : le peuplier."

"La couverture des tribunes a donc été le sujet du développement de l'utilisation du bois de peuplier. La technique de la planche clouée a été retenue pour la réalisation de la couverture. Les expérimentations déjà effectuées ont permis de réaliser le classement mécanique de toutes les pièces de bois." [44].

Pour plus de détails se référer à l'annexe V.1

II.2.1.2. Projet en peuplier mixant différentes techniques constructives



Figure 9: Centre multi accueil faite à Courcelles-lès-Lens (62) [42]
Réalisé par Laurant Baillet

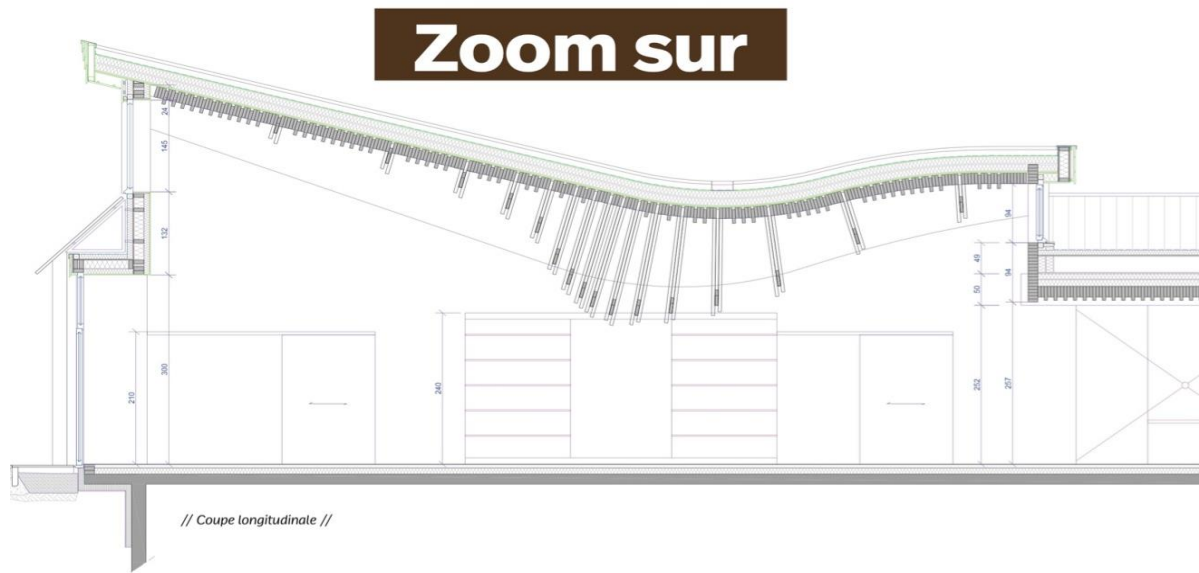


Figure 10: Coupe montrant la toiture [41]

Les essences retenues pour ce bâtiment sont essentiellement des essences régionales : peuplier, hêtre, chêne. La seule non locale est l'épicéa. Chaque essence a une place bien particulière dans le bâtiment en fonction de ces spécificités :

- Structure :
Essences utilisées : peuplier et épicéa. L'ossature et la charpente sont entièrement réalisées en peuplier cultivar "Robusta".
 - o Structure verticale : poteaux, poutres et ossature bois
 - o Structure horizontale - charpente : solivage traditionnel, plancher cloué, panneau CLT, caisson de toiture).

- Revêtement extérieur : bardage bois pose verticale à claire-voie.
Essence utilisée : chêne

- Menuiserie :
 - o Menuiserie extérieure : menuiseries en bois massif.
Essence utilisée : chêne
 - o Menuiserie intérieure : menuiseries, cloison ondulatoire, portes, mobilier et aménagements spécifiques
Essence utilisée : hêtre

- Aménagement extérieur : préau et rangements en bois massif.
Essence utilisée : chêne brut de sciage

Pour plus de détails se référer à l'annexe V.2

II.2.1.3. Pannes de charpente et porteurs verticaux



Figure 11: Médiathèque municipale à Givenchy-en-Gohelle (62) [23]
Réalisée par A&P Studio

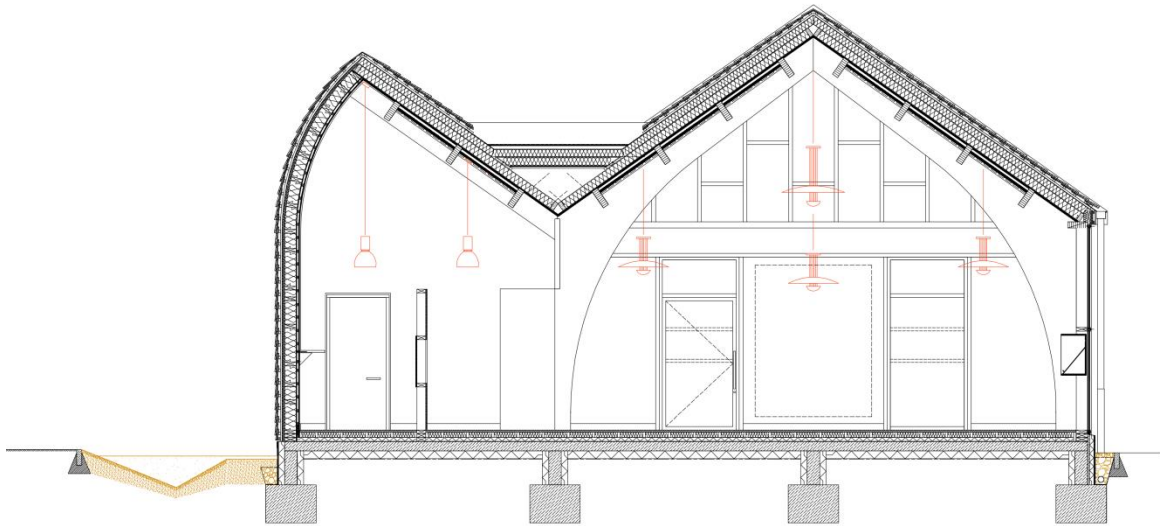


Figure 12 : Coupes sur bâtiment (document réalisé par AP Studio - Laurence BASSIERE)

Les essences utilisées dans cette réalisation sont *principalement* des feuillus : « le peuplier (43%), le hêtre (28%) et le chêne (18%). » Tous les bois choisis pour ce projet proviennent de bois locaux et de filière courte à part le portique en épicéa [26], [52] et [53].

Les bois de peuplier ont été préalablement travaillés pour répondre aux exigences du projet de la médiathèque. Voici les opérations réalisées par les entreprises ALGAVE et BEL'BOIS [26], [52] et [53] :

- Bois séché à 12% d'hygrométrie.
- Recherche du cultivar ayant la meilleure homogénéité de caractéristiques structurelles : le cultivar choisi pour ce projet est le ROBUSTA.
- Comme le peuplier n'avait pas de classement mécanique à l'époque (classement visuel uniquement), chaque planche est testée unitairement pour satisfaire à la résistance mécanique requise.
- Construction des pannes LC lamellée collée d'une portée de 7m40.
- Essais mécaniques de ces pannes à l'IUT de Béthune pour vérifier : la résistance, la flexion sous charge de service et la charge de rupture.
- Préfabrication de ces pannes en LC dans les ateliers de Bel'Bois.

Ce projet est finalement composé uniquement de bois local avec des utilisations diverses en fonction de leur caractéristique [26], [52] et [53] :

- Le peuplier, 60m³, pour sa très bonne résistance mécanique en bois d'œuvre.
 - o La **charpente** est composée par une structure primaire, d'un ensemble de portiques courbe en épicéa (car on ne savait pas le faire en peuplier) et par une structure secondaire entre portiques constitués par les pannes en lamellé-collé de peupliers.
 - o Les **épinés des grands pignons vitrés et l'ossature** en périphérie sont réalisées en peuplier. Les grandes hauteurs sont en lamellé-collé (BLC) et les petites hauteurs en bois massif abouté (BMA).

- Le Chêne, 35 m³, pour sa durabilité et sa noblesse.
 - o Les **menuiseries extérieures** sont fabriquées par l'Entreprise MENUISERIE DU HAUT PAYS située à Preures (62).
 - o Les **bardeaux** recouvrant la façade nord et les toitures sont également en chêne de pays. Les bardeaux sont sciés en tailles variables dans l'atelier Bel'bois et mis en œuvre de manière aléatoire pour préserver l'aspect irrégulier des bardeaux fendus.
 - o Le **bardage** en lames brut de sciage de chêne est cloué verticalement sur les pignons.
 - o Le **parquet intérieur** est en chêne massif issu localement. Le parquet recouvre la totalité de l'espace de consultation. Il sera huilé avec une huile sans COV à saturation. »

- Le Hêtre, 15 m³, essence adaptée à l'ameublement.

L'ensemble des **éléments menuisés intérieurs** sont en hêtre, essence couramment utilisée pour la fabrication d'escaliers et de mobiliers. Le parti pris architectural a été de ne pas cacher le bois notamment aux plafonds, sur les placards, en claustras, ... C'est l'entreprise LEFETZ, située à quelques km de Givenchy qui a obtenu le marché. Comme pour BELBOIS ça a été la première fois qu'elle s'est tournée vers les scieurs locaux.

Pour le test unitaire des planches de peuplier, des machines de test ont été spécifiquement créées par Manfred Hudel (charpentier) en partenariat avec l'IUT de Béthune [26], [52] et [53].



Figure 13: Machine de Manfred Hudel (photo réalisée par Laurence BASSIERE) [26], [52] et [53]



Figure 14: Machine d'expérimentation avec l'établissement Stabilame [26], [52] et [53]

Pour plus de détails se référer à l'annexe V.3

II.2.1.4. Poutre treillis en bois de petites sections



Figure 15: Salle polyvalente de Lezennes (59) [42] - Réalisé par Laurant Baillet

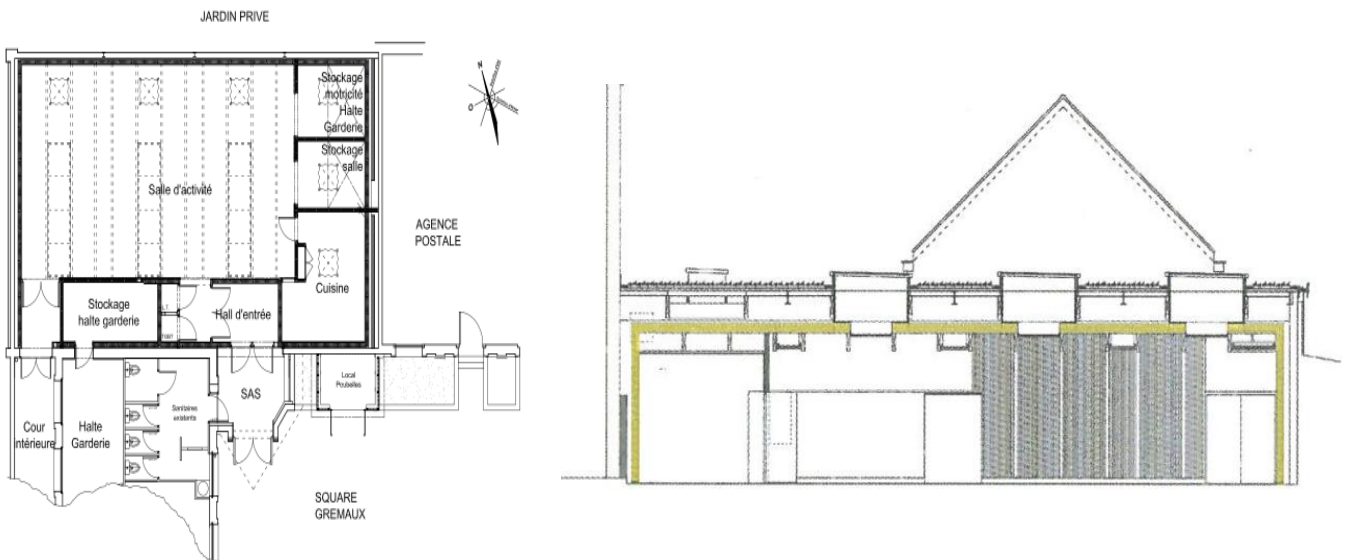


Figure 16 : Plan de la salle [43] et coupe longitudinale du bâtiment [30]

Les éléments structurels de cette construction sont constitués en peuplier abouté et lamellé-collé. Ces poutres treillis font écho aux anciennes charpentes en peuplier (bois régional). Les exigences « en qualité environnementale » de ce projet ont permis un choix de bois, de traitements et de déchets minimums sur le chantier. « L'emploi d'une essence nouvelle devait se traduire par un nouveau dessin structurel tout en conservant l'idée constructive originelle. » [28]

Voici quelques constats relevés au fur et à mesure du projet démontrant le niveau d'exigences attendu autour de ce principe constructif innovant :

- Dans un premier temps, il a été indispensable de prouver que l'essence le Robusta était un bois fait pour la construction et que le classement visuel n'était sans doute pas la méthode la plus adaptée pour cette essence.
- Un travail réalisé par la scierie « pour localiser les différences de résistance des pièces dans une même grume. ». C'est ainsi que la méthode de sciage "quartelot" a été retenue « consistant à faire tourner la bille sur elle-même à chaque coupe ». « Les parties latérales du Robusta se sont révélées les plus appropriées, atteignant un niveau de type C35 contre un type ne dépassant pas C16 en cœur de grume » [30]



Graphique 4: Données intéressantes réalisées pendant l'expérience « données quantitatives et qualitatives » [30]

Comme précédemment expliqué, le peuplier est un bois hétérogène. Les 1500 pièces de ces poutres treillis ont donc été toutes testées mécaniquement pour être utilisés dans la structure. « La difficulté d'obtenir de grandes longueurs brutes a orienté le choix vers la conception d'une poutre en treillis, dont un prototype a été réalisé dans le département de Génie Civil de l'IUT de Béthune. » [30].



Figure 17: Photos illustrant la mise en œuvre et des tests physiques [43]

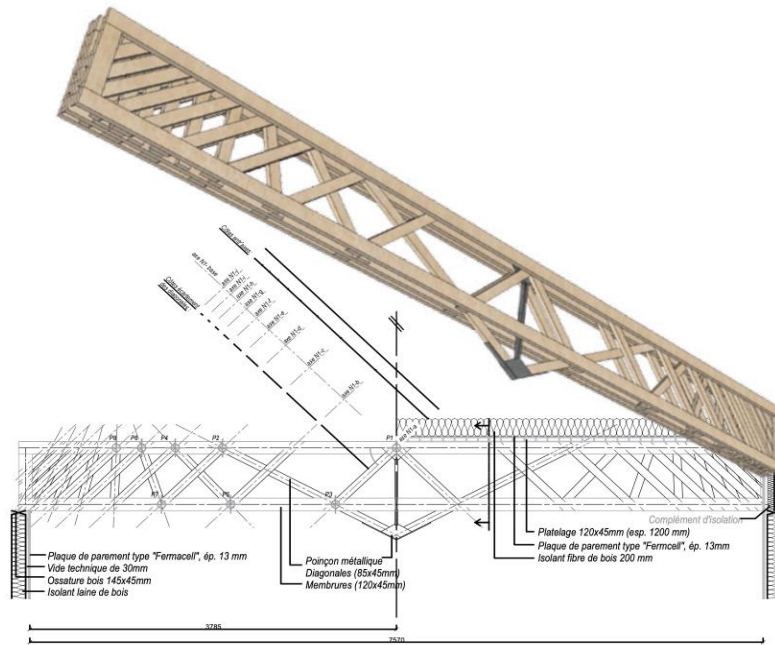


Figure 18: Principe de la poutre treillis [43]

L'assemblage retenu est montré sur le dessin ci-dessus. Les dimensions des poutres treillis sont de 8,50 m de longueur par 40 cm de hauteur et ces dernières se répètent 11 fois sur la longueur de la salle.

Pour plus de détails se référer à l'annexe V.4

II.2.1.5. Caissons empilés autoportants



Figure 19: Maison solaire à Toul-Rosières (54) [31] - Réalisée par SAS Cartignies Canonica Architecture

« Pour concrétiser la forme de la géode de 18 mètres de diamètre, le principe de caissons préfabriqués s'impose. Concrètement, ces caissons sont en contreplaqué de peuplier, de 25 mm d'épaisseur. La structure repose sur 24 sections verticales (en référence à la course solaire). » [31] « En alternant l'orientation des fibres des trois plis de bois formant le panneau, on obtient la stabilité nécessaire à une structure empilée. Les caissons se superposent en quinconce et sont fixés par le côté créant de nervures structurelles » [2]. « Toutefois, l'inertie variable de cette structure a une conséquence évidente : il n'y a pas deux caissons identiques sur une même section. Les découpes sur machine à commandes numériques apportent la précision nécessaire à ce travail d'orfèvre. Les caissons sont assemblés, sur site, par clouage après remplissage avec un isolant et pose d'un joint d'étanchéité entre chaque élément. La structure, autostable, est indépendante du noyau béton. Les caissons, recouverts côté extérieur par un revêtement en acier Corten, sont laissés apparents côté intérieur » [31]. « Le dernier quart de la hauteur de la sphère est fermé par une coupole composée d'arc en lamellés-collés de sapin... La structure a été habillée en sous face de panneaux de contreplaqué en peupliers. » [2]

Pour plus de détails se référer à l'annexe V.5

II.2.2. Retour d'expérience et enseignements à tirer sur l'utilisation actuelle du peuplier

II.2.2.1. Synthèse d'utilisation du peuplier

	Salle polyvalente Grémaux	Tribunes du stade de football	Batiment industriel	Médiathèque municipale	Centre multi accueil de la petite enfance	Maison de l'énergie solaire
Date	2010	2010	2013	2014-2015	2015	2014-2015
Lieu de construction	Lezennes (59)	Etaples-sur-mer (62)	Audruicq (62)	Givenchy-en-gohelle (62)	Courcelles les Lens (62)	Toul Rosières (54)
Architecte	Actes Architecte Laurent Baillet	Actes Architectures Laurent Baillet	Laurent Baillet & Mathieu Marty	Studio A&P	Laurent Baillet	Architecte SAS Cartignies canonica Architecture
Entreprise / scieur / ingénieur	Ingénieur : BET Ingébois Charpentier : AS bois Scieur : SPL	Entreprise : AS bois Scieries : Patte et fils SARL (80), Tripette SAS (02), Aglave et fils (62), Nobécourt SARL (80), Mordome SEIS (02)	Bet : IPE (50) Scieries : Scierie de Chênelet	Scieurs : Entreprise ALGAVE Entreprise : BEL'BOIS	Scieur : L'entreprise ALGAVE et LAVOGEZ Bet : Ingebois Structures Entreprise bois : Bois concept littoral	BET bois : Anglade Structure bois BET : OTE Ingenierie Entreprise bois : Drouin
Filière Bois	Filière locale	Filière locale	/ (cf.note)	Filière locale	Filière locale	/ (cf.note)
Circuit court	Oui	Oui	/ (cf.note)	Oui	Oui	/ (cf.note)
Essences utilisées	Peuplier	Peuplier	Peuplier	Peuplier, hêtre, chêne, épicéa	Peuplier, hêtre, chêne, épicéa	Peuplier, Sapin
Cultivar du peuplier utilisé	Robusat	Robusat	/ (cf.note)	Robusat	Robusat	/ (cf.note)
Utilisation du peuplier	Structure	Structure : Charpente	Structure : Charpente	Structure	Structure : Ossature et charpente	Structure
Bois brut ou bois recomposé	Bois brute petit section BMA (Bois Massif Abouté) BLC (Bois Lamellé Collé)	BMA (Bois Massif Abouté)	BMA (Bois Massif Abouté) Contreplaqué	BLC (Bois Lamellé Collé) BMA (Bois Massif Abouté)	BLC (Bois Lamellé Collé) BMA (Bois Massif Abouté)	Contreplaqué
Système constructif	Poutre treillis	Toiture en planches juxtaposées	Fermes à Gousset	Charpente en panes de peuplier en Bois Lamellé Collé Structure des grands pignons vitrés (épinés) et ossature périphérique en peuplier BLC et BMA	Structure verticale : poteaux poutres et ossature bois Structure horizontale-Charpente : solivage traditionnel / plancher cloué / panneau CLT / caisson de toiture	Caissons
Expérimentations réalisées pour le projet	Oui Comprendre si le peuplier peut être un bois structurel	Oui BMA (Bois Massif Abouté) en grande portée	/ (cf.note)	Oui BLC (Bois Lamellé Collé)	Non S'inspire de toutes les références réalisées précédemment pour étendre l'utilisation du peuplier dans la construction	/ (cf.note)

Nota : les données n'ont pas été trouvées.

Tableau 3 : Comparatif des références précédemment citées

La frise chronologique (voir figure 21) ci-dessous permet de situer dans le temps les références précédemment citées.

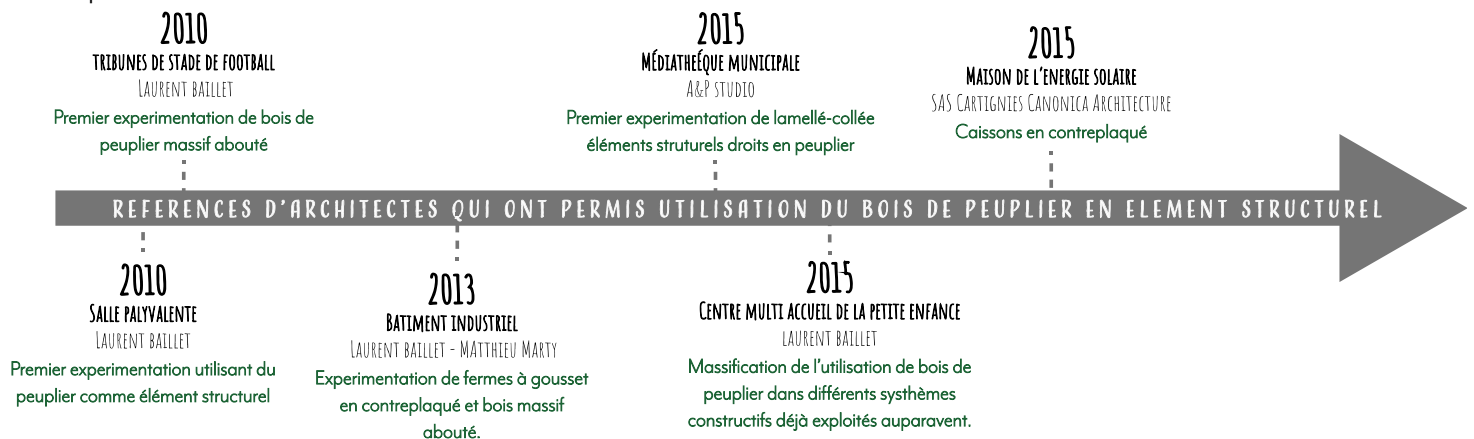


Figure 20 : Frise chronologique des références en peuplier fait par auteur

Ce tableau comparatif et la frise mettent en avant tous ces projets qui ont permis de développer la filière du peuplier en construction. La motivation de professionnels intéressés (architectes, scieurs, entreprises, bureau étude...) par de nouveaux concepts ou idées, l'intérêt et la volonté de travailler avec des matériaux que l'on trouve localement ont permis à des projets novateurs de prendre forme et à la filière peuplier de se développer à plus grande échelle.

Au travers de la frise chronologique, chacun de ses projets pilotes a permis d'apporter une plus-value, un retour d'expérience (système constructif, assemblage) qui ont grandement participé au développement de

la filière du peuplier en tant que bois de construction. Ces différentes expériences à l'échelle d'une région (Hauts de France) ont permis d'autres développements de la filière à l'échelle nationale.

II.2.2.2. Les caractéristiques constructives

Les principaux retours d'expérience et enseignement des projets pilotes sont les suivants :

- **Classement mécanique (machine)**

Les bois de peuplier utilisés dans le cadre de références précitées ont été systématiquement testés sur des machines de test homologuées afin de déterminer la classe avant montage site sur la structure des ouvrages.

Les projets réalisés dans les Hauts de France sont les projets pilotes qui ont démontré la possibilité d'utiliser du peuplier en tant que bois d'œuvre.

Des interviews n'ont pu malheureusement être menées faute de disponibilité des acteurs ci-dessous et de temps pour comprendre plus précisément les principes de ces essais et trouver les résultats des essais de résistance (compression, traction, flexion, cisaillement) :

- o Scierie ALGLAVE : scierie utilisant exclusivement du peuplier et possédant une machine de test homologuée
- o Manfred HUDEL : charpentier et concepteur machine de classement mécanique du peuplier dans le cadre de la Médiathèque municipale Givenchy-en-Gohelle (62)

- **Hétérogénéité du bois**

Le peuplier est un bois hétérogène en comparaison des résineux. Il existe 3 niveaux différents d'hétérogénéité. Ce point m'a été présenté durant l'entretien de Mr. Laurent Baillet [35] et rappelé dans les autres entretiens.

1er niveau d'hétérogénéité du peuplier : multitude de cultivars avec des propriétés différentes.

Chaque cultivar est approprié à une utilisation :

- o Cultivar peu dense : utilisation pâte à papier (1 transformation)
- o Cultivar un peu plus dense : utilisation emballage, contreplaqué (2 transformations : déroulage + collage)
- o Cultivar plus dense : utilisation palette, mobilier
- o Cultivar encore plus dense : exemple du cultivar Robusta adapté à la construction : ce cultivar avec des méthodes de classement mécaniques peut atteindre des classes C18, C24, voire bien supérieures aux classes des résineux comme C35.

2nd niveau d'hétérogénéité du peuplier : intrinsèquement à la grume

Le peuplier est hétérogène sur la hauteur de l'arbre (contrairement à un résineux homogène sur toute la hauteur)

- o Les 3 parties de l'arbre : culée partie qui reste (dans le sol), bille (jusqu'à 6m) et surbille

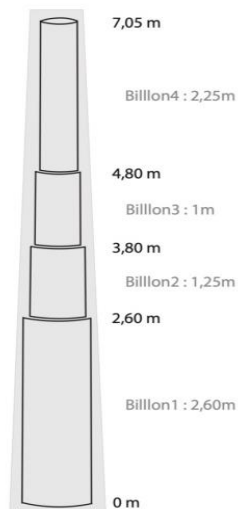


Figure 21: Schéma de distribution de la grume [46]

- Hétérogénéité entre bille et surbille : le bois de surbille est de moins bonne qualité à la construction que le bois de bille à contrario des mélèzes, douglas, pin noir et pin laricio qui sont bois homogène entre bille et surbille. Par contre, le pin blanc et le sapin sont similaires au peuplier pour la justification d'utilisation

3ième niveau d'hétérogénéité du peuplier : sur la section de la grume

Le peuplier est hétérogène sur la section de la grume : les parties centrales du noyau du peuplier sont de moins bonne qualité que les parties latérales.

- Impose une méthode spécifique de découpe de la grume différent de celle des résineux
- Sciage sur "quartelot" pour le peuplier : sciage de 2 tranches à chaque ¼ de tour de la grume

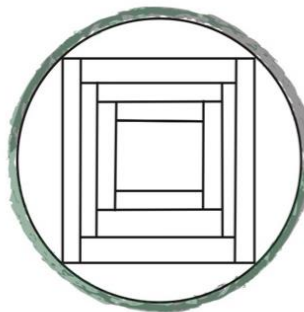


Figure 22: Section de bois coupé dans la grume fait par auteur

- Pour une même grume d'un même cultivar adapté à la construction, on a 2 filières :
- Bois latéral = bois de construction
- Bois central bois de finition (palette, lambris, plinthe, bouclier, ...)
- Classement du bois associé :
- Bois latéral : C30 voire C35 (utilisation possible en aéronautique, hélices)
- Bois latéral un peu plus près du centre : C24
- Bois central : C18

- **Les cultivars principalement utilisés en tant que bois d'œuvre**

Dans toutes les références trouvées dans les Hauts de France, le seul cultivar de peuplier utilisé est le Robusta. C'est essentiellement lié à ses propriétés physiques adaptées à la construction, mais aussi c'est un bois local. Du fait de l'hétérogénéité des autres cultivars, ces derniers n'ont pas été mis en œuvre.

Dans les "référentiels qualités du bois des cultivars de peuplier" [45] et [46] édités par le CNP, les caractéristiques techniques de chaque cultivar sont comparées au Robusta. Il existe d'autres cultivars dont les propriétés restent presque équivalentes à celles du Robusta et dites " utilisables en construction" comme :

- I 45/51
- Raspalje
- Lambro
- Soligo
- Dvina
- Taro

Un point essentiel est la disponibilité des cultivars. Il est essentiel d'avoir les stocks disponibles. C'est le cas dans les Hauts de France où les sylviculteurs et les scieurs se sont organisés pour développer la filière peuplier [36].

II.2.2.3. Les atouts du peuplier

Les principaux atouts du peuplier remontés pendant les entretiens sont :

- Nodosité faible
- Croissance rapide (20m en 15 ans)
- Pousse très droit
- Bois léger, souple, facile à travailler
- Bois approprié aux assemblages par clouage (très peu fissile)
- Bois esthétiquement très beau

II.2.3. Conclusion

Quand l'on évoque le bois peuplier, on pense plus aux emballages légers qu'à un bois œuvre. C'est pourquoi le peuplier est une essence relativement peu connue dans le domaine de la construction malgré des possibilités et ses atouts. Le développement de la filière a été centré essentiellement sur la région Hauts de France, où des constructions en Robusta démontrent le potentiel de cette essence.

Ces projet pilotes démontrent son utilisation en bois œuvre mais met en avant des mises en œuvre très rigoureuses. Toutes les planches utilisées dans le domaine de la structure doivent être systématiquement testées. Des principes constructifs spécifiques permettent une utilisation plus ouverte de cette essence. Les références évoquées ci-dessus ont contribuées au développement de la filière du peuplier en construction.

Néanmoins, le bois de peuplier reste un bois très hétérogène qui reste délicat à traiter en construction nécessitant une disponibilité de la machine de classement. Ces trois niveaux d'hétérogénéité montrent que l'utilisation du peuplier se recentre sur quelques cultivars, notamment le robusta qui est la variété la plus utilisée à ce jour dans la construction et qui a des propriétés homogènes. L'ensemble des projets mentionnés utilise ce cultivar.

Les tribunes du stade de football d'Étaples-sur-mer (62) en est un excellent exemple et le système constructif de la toiture en peuplier a démontré d'excellentes performances structurelles. Ce principe est similaire à celui développé pour la dalle O'portune® de la société CBS-CBT. Et c'est ce type de dalle que j'ai choisi de développer dans mon mémoire. Il va être pertinent de comprendre comment pallier à l'hétérogénéité du peuplier pour pouvoir l'utiliser plus facilement et le promouvoir dans d'autres bassins de peupleraies. L'idée est donc d'ouvrir le panel des cultivars pour rester sur un circuit court d'approvisionnement.

L'utilisation du principe constructif de planches décalées clouées en peuplier mérite donc d'être approfondie et expérimentée et permettra, si les résultats sont satisfaisants, d'ouvrir une potentielle voie d'utilisation du peuplier en construction.

III. EXPÉRImentation D'UNE DALLE ASSEMBLÉE DÉCALÉE CLOUÉE

Comme constaté depuis le début de cette recherche, le peuplier est un bois peu connu dans le monde la construction. La particularité principale de ce bois est son hétérogénéité qui nécessite un test mécanique planche par planche à la machine avant sa mise en œuvre.

Sur l'exemple du système constructif mis en œuvre par Mr Laurent Baillet dans les tribunes du stade de football d'Étapes-sur-mer (62), ce paragraphe reprend dans un premier temps le principe constructif de la dalle O'portune® et définit dans un second temps le protocole d'expérimentation imaginée pour une dalle assemblée décalée clouée en peuplier.

III.1. Principe constructif de la dalle O'portune® [33]

La dalle O'portune® est une dalle qui est fabriquée par l'entreprise CBS-CBS. Historiquement c'est un bureau d'étude bois CBS (Concept Bois Structure) fondé depuis plus de 30 ans et ensuite l'entreprise CBT (Concept Bois Technologie) a été développée dans un 2nd temps où on développe des appareils qui permettent de tester la résistance du bois entre autres (SYLVA TEST, SYLVA TEST TRIO, appareil portatif, ...) (cf. entretien CBS-CBT) [32].

Une dalle O'portune® est un système constructif innovant, qui pour des structures horizontales de type dalle, permet d'atteindre de hautes performances mécaniques et/ou de grandes portées, jusqu'à 11 m sans appuis intermédiaires." La dalle est fabriquée en résineux (épicéa le plus souvent). Les planches utilisées sont généralement classées C24 pour du bois massif et GL 24 pour du lamellé-collé. Les hauteurs des sections vont changer en fonction de la portée : plus la portée est importante, plus la section va être grande. Toutes les planches sont assemblées avec des vis, celles-ci traversent 3 planches à la fois. L'entraxe entre chaque vis ne va pas améliorer la résistance de la dalle)

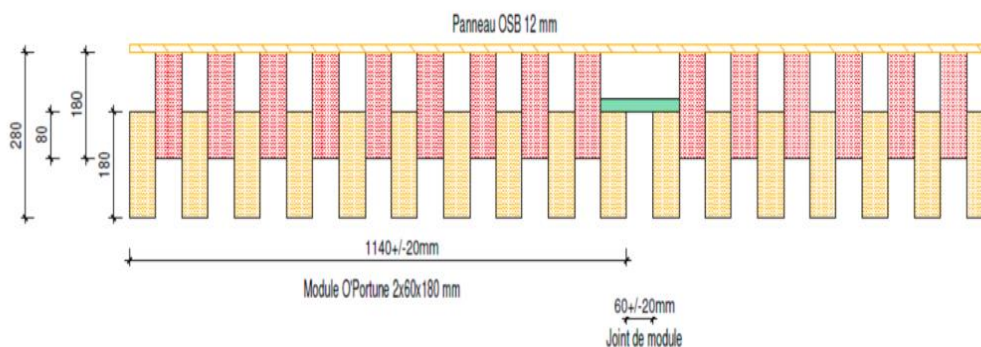


Figure 23: Coupe de la dalle O'portune pour comprendre le système constructif [33]

La dalle repose sur 2 principes importants qui sont :

- L'utilisation de planches massives brutes de sciages ou aboutées (sections allant de 60/120 mm à 60/260 mm et longueurs de 4 m à 11 m), assemblées par vissage de façon décalées les unes des autres, pour augmenter la hauteur statique de la dalle. Avec des planches de 60/200 mm, on obtient par exemple une hauteur statique de 320 mm, ce qui double l'inertie de la planche nominale.
- La création d'une dalle permettant de supporter les charges ponctuelles avec une bonne diffusion des contraintes dans la direction orthogonale aux planches, par la mise en œuvre d'un panneau type OSB ou LVL vissé sur les planches hautes.

Pour des dalles à fortes charges concentrées, un panneau LVL à plis croisés avec une épaisseur proportionnelle à la charge peut être mis en œuvre pour permettre de diffuser les contraintes locales et d'optimiser la hauteur des planches.

Pour des dalles à charges réparties uniquement, un panneau de type OSB entre 12 mm et 18 mm d'épaisseur est suffisant.

Ce type de dalle peut être préfabriquée en usine sous forme de module de 1,14m de largeur. Les modules sont assemblés entre eux sur chantier par la mise en œuvre de joints de modules vissés.

Les joints entre deux modules peuvent être constitués de deux manières différentes (voir figure 25)

- Joint de type 1 : joint le plus fréquent
- Joint de type 2 : joint fait dans le cas où les planchers ont besoin de dilatation dans les zones humides

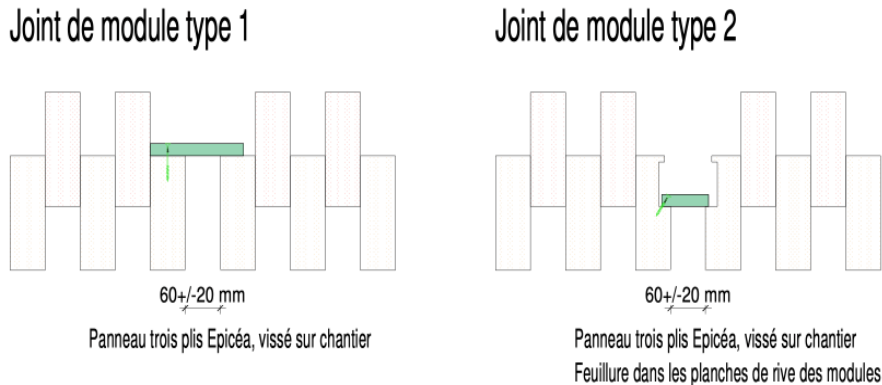


Figure 24: 2 manières de joindre les dalles entre elles [33]

Cette dalle s'adapte en fonction des points d'appuis (bois, béton, métal, cloison) qu'elle va rencontrer.

La dalle O'portune® a déjà été utilisée pour de nombreux projets. Comme par exemple " ZAC Clichy-Batignolles (Ilot 06A), à Paris"

"Construction de 77 logements sociaux en R+16, d'une résidence sociale de 55 studios en R+7, d'une école maternelle de 8 classes, d'une crèche de 66 berceaux et d'un commerce. Lots structure et façades bois de la crèche et de l'école - Etudes, fourniture et pose des poteaux poutres BLC, dalles O'Portune® en plancher et toiture, murs ossature bois, bardage bois, traitement M1 des dalles, BLC en mélèze."

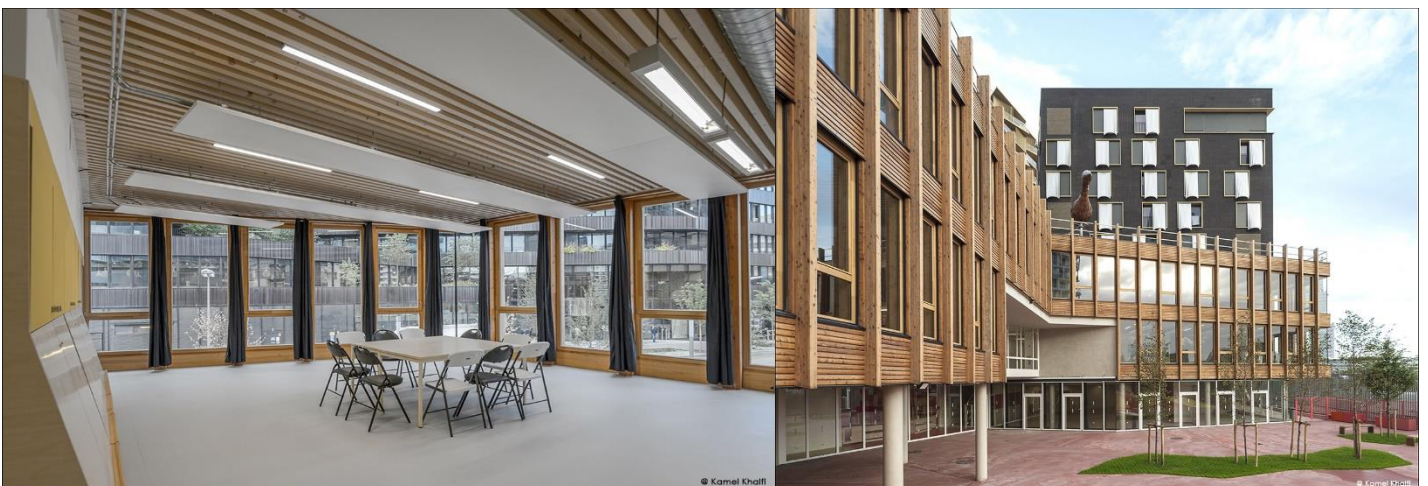


Figure 25: Photos d'applications de la dalle O'portune® [33]

Chaque application spécifique de dalle O'portune® fait l'objet d'un pré dimensionnement réalisé par le bureau d'étude CBS/CBT. Elle est dimensionnée selon l'Eurocode 5 [50, 51]. Il est déterminé une rigidité équivalente en flexion afin de vérifier les critères de dimensionnement. Les vérifications de base portent sur le calcul de la déformée (instantanée et à long terme) et de la contrainte de flexion. Dans les domaines de l'habitat et des ponts, la fréquence propre peut également être dimensionnante. Quand la dalle est

dimensionnée pour ces deux caractéristiques, la vérification du flux de cisaillement présent dans la section composée permet de déterminer le type, le nombre et la disposition des connecteurs (clous ou vis). La zone de croisement des planches est un critère d'optimisation très important, qui sera donné en fonction des besoins d'implantation des connecteurs, et éventuellement d'une résistance au feu supérieure (R60 ou plus)."

Les points forts d'une dalle O'portune® sont [38] :

- Épaisseur moins importante qu'un solivage en bois classique puisque l'entraxe est réduit.
- En termes de confort, la fréquence des planchers est plus intéressante qu'un solivage en bois classique aussi, en marchant dessus, l'impression que le plancher bouge est moins importante
- Par rapport au CLT qui a les 2 avantages précités, aucune colle n'est utilisée pour une dalle en bois massif
- Les planchers sont recyclages et bas carbone
- Par rapport aux planchers classiques en béton de taille similaire, le poids est inférieur
- Par rapport à l'acoustique, sur des logements collectifs, une chape flottante par-dessus est coulée pour éviter les chocs directs, et pour l'acoustique aérien, les ondes capturent les bruits et évitent les résonances ; un isolant acoustique (type ROCKFON) peut être rajouté en fond d'ondes pour atténuer encore plus les bruits aériens
- Architecturalement, on peut jouer visuellement avec les couleurs que l'on souhaite, pour "casser" le tout bois

Les points négatifs d'une dalle O'portune® est la consommation de bois pas forcément optimisée par rapport à un solivage classique [38].

III.2. Réflexions sur la dalle assemblée décalée clouée

La mise en œuvre d'une dalle assemblée décalée clouée reprenant le principe constructif de la dalle O'portune® amène aux réflexions suivantes.

III.2.1. Qualités architecturales et aspects structurels

La dalle assemblée décalée clouée est une solution séduisante dans le cadre des projets tout en bois. Elle offre une sous-face très esthétique : le plafond apparent est dessiné par les planches inférieures décalées. Ce point sera renforcé en utilisant le peuplier (bois blanc sans nœud). Les paramètres de déclinaison architecturale seront :

- L'épaisseur des planches
- Le décalage
- La finition (naturelle ou colorée) des planches
- Des coupes proches des appuis pour développer des corniches négatives
- L'intégration de l'éclairage
- Le type de planches (planches massives simples aboutées ou non, des alternances d'essences ou de couleurs pour un zébrage de couleur naturelle, etc...).

Le profil en créneau de la dalle peut jouer un rôle prépondérant en matière de confort acoustique vis à vis des bruits aériens. Celui-ci peut être amélioré par l'ajout d'un correcteur acoustique selon les schémas suivants [38]. Dans le domaine du bruit d'impact, un système de sols multicouches fonctionnant selon le principe de masse - ressort - masse, devra être développé en complément.

Le point négatif reste l'utilisation massive de bois en comparaison d'un solivage classique, mais néanmoins le carbone du bois utilisé reste stocké.

D'un point de vue structurel, les points importants à relever sont les suivants :

- Système constructif en bois massif
- Grande portée sans point d'appui intermédiaire
- Performances vibratoires
- Préfabrication de dalle du fait d'une mise en œuvre modulaire
- Techniques de fabrication industrielle

III.2.2. Mise en œuvre

La dalle assemblée décalée collée est un concept de base multifonctionnel (dalle avec plafond acoustique intégré). Son principe d'assemblage est simple : à partir d'une préfabrication par modules transportables, un montage sec et très rapide est prévisible.

La légèreté permet d'optimiser les descentes de charge, donc le dimensionnement des murs et des fondations.

L'utilisation de planches massives standardisées et un principe de connexion par vis en font un principe constructif extrêmement simple,

Le coût matière bois, fini posé est économique (coût matière bois, préfabrication en atelier, économie de faux plafond et optimisation des murs avec des descentes de charges réduites)

La dalle a un bilan extrêmement favorable sur les deux critères environnementaux, énergie et CO2 si on considère le bois comme stockant du CO2 et la planche massive comme matière première à faible niveau de transformation. De ce fait, le coût énergétique de la dalle est très faible.

III.3. Protocole envisagé pour l'expérimentation d'une dalle assemblée décalée clouée en peuplier

III.3.1. L'intérêt d'une expérimentation

L'idée est donc de mener une expérimentation qui consiste à produire, en peuplier, une dalle assemblée décalée clouée (similaire aux systèmes constructifs de la dalle O'portune® décrit précédemment et de la toiture des tribunes du stade de football de Laurent BAILLET). Cette expérimentation doit permettre de vérifier et comprendre comment la dalle peut réagir en fonction de l'hétérogénéité du bois de peuplier.

Il sera également réalisé une comparaison avec une dalle réalisée suivant le même principe, mais en résineux (bois usuellement utilisé en construction).

En conclusion, le but de cette expérience est de vérifier si ce principe constructif est réalisable et permet de s'affranchir des propriétés hétérogènes du peuplier.

III.3.2. Cas d'application proposé pour l'expérimentation

L'expérimentation consiste à construire et tester une dalle assemblée décalée clouée. Elle reprend le cas d'application d'un plancher d'un logement entre 2 points d'appui composé de plusieurs modules de dalles assemblées décalées clouées. Les schémas ci-dessous illustrent le plancher et la partie surlignée en brun met en avant un module élémentaire. L'expérience portera uniquement sur ce module élémentaire.

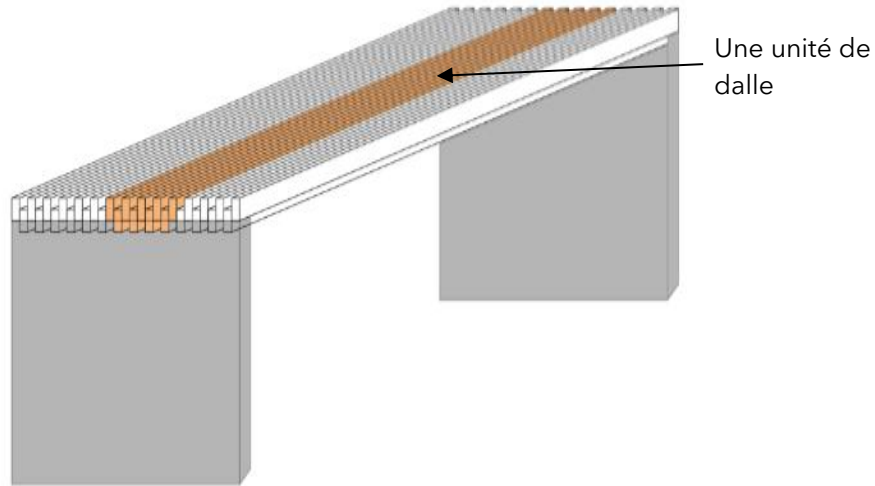


Figure 26: Schéma de plusieurs unités de dalle assemblée entre ..

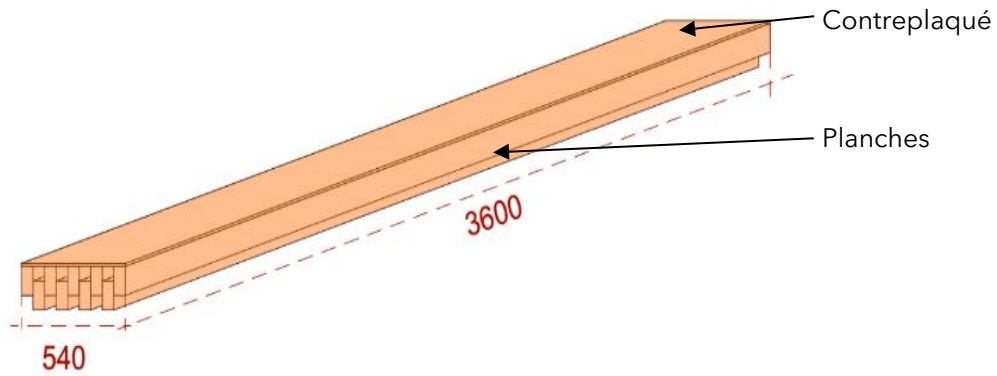


Figure 27: Une unité de dalle

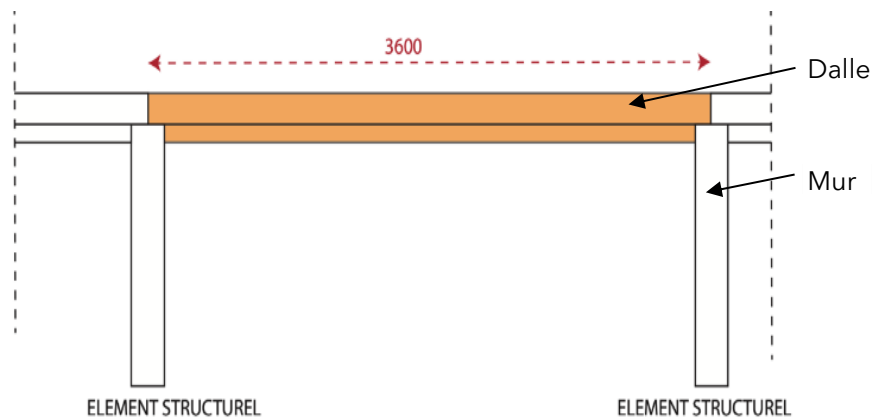


Figure 28: Dessin illustrant le cas d'application pour une dalle assemblée décalée clouée fait sous différents angles.

Pour tester le module élémentaire de cette dalle en peuplier, les variables ou différents paramètres sur lesquels on va jouer sont les suivants :

- Portée de la dalle
- Sections des planches inférieures et supérieures de la dalle

- Décalage des planches inférieures et supérieures
- Espacement des clous/vis maintenant les planches inférieures et supérieures
- Classification du bois utilisé
- Cultivars de peuplier à utiliser
- Panneaux supérieurs (type OSB ou LVL ou contreplaqué en peuplier) vissés sur les planches supérieures
- ...

Compte tenu du temps et des moyens limités pour mener à bien mes essais, les paramètres variables retenus sont les suivants. Ils sont ajustés au besoin, en fonction des matériaux disponibles sur le marché :

- Classification du bois utilisé sur la totalité de la dalle
- Cultivars de peuplier à utiliser

Les autres paramètres restent fixes (portée, espacement des clous/vis, composition du panneau supérieur)

Ce choix permettra de jouer de 2 manières différentes sur l'hétérogénéité de cette essence : par planche ou par cultivar. Plusieurs expérimentations sont donc à mener mais elles le seront par comparaison à une dalle de référence (dalle O'portune®) en résineux.

Ces comparaisons à la dalle en résineux permettront éventuellement de conclure si la dalle assemblée décalée clouée en peuplier peut être une des réponses à l'utilisation du peuplier en construction.

III.3.3. Prédimensionnement de la dalle assemblée décalé clouée

Les critères de dimensionnement d'un plancher en général sont résumés dans le tableau ci-après. Les valeurs limites de chaque critère sont définies au regard des normes en vigueur.

Critères d'étude	Définition	Valeurs limites associées	Normes de référence	Critères retenus (Oui/Non) Commentaires
Résistance	Charge maximale par unité de surface que peut supporter un plancher de logement	150 kg/m ²	Eurocode 5 [50]	Oui
Flèche instantanée	Flèche instantanée sous charges variables (Q) où L est la portée	< L/300	Eurocode 5 [50]	Oui
Flèche à long terme	Flèche finale et à long terme après fluage sous charges (G +Q) où L est la portée	< L/200	Eurocode 5 [50]	Non retenu (voir nota)
Flèche de second œuvre	Flèche qui fragilise les éléments de second œuvre (carrelage, cloison en placoplâtre, ...) où L est la portée	< L/500	[DTU ou Avis Technique second œuvre]	Non retenu (voir nota)
Vibratoire	voir nota	voir nota	voir nota	non
Thermique	voir nota	voir nota	voir nota	Non

Critères d'étude	Définition	Valeurs limites associées	Normes de référence	Critères retenus (Oui/Non) Commentaires
Acoustique	Bruit d'impact reçu : niveau de bruit reçu aux bruits d'impact entre 2 locaux dans un logement collectif	< 58db	Arrêté du 30 juin 1999 relatif aux modalités d'application de la réglementation acoustique	Non
Acoustique réverbération	Capacité d'une surface à réverbérer le son	voir nota	voir nota	Non
Résistance au feu	Catégorie de résistance : stable au feu (SF), pare flamme (PF), coupe feu (CF)	CF REI xx mn cf nota	EN 13501 [40] et Eurocode 5 [51]	Non
Energie grise	voir nota	voir nota	voir nota	Non

Nota : Les points suivants pourraient être développés ultérieurement.

Tableau 4: Critères de dimensionnement d'une dalle fait par auteur

Compte tenu du cadre réduit possible de l'expérimentation, le nombre de critères d'étude sur lequel sera réalisé l'expérimentation est volontairement limitée à 2 :

- Résistance à l'ELU
- Flèche instantanée à l'ELS

D'autres critères pourront être déduits par calcul et extrapolation comme par exemple, la flèche à long terme et la flèche de second œuvre.

- Dans le cadre de l'expérience, des calculs préliminaires sont nécessaires pour s'assurer du respect des valeurs limites de dimensionnement pour la dalle assemblée décalée clouée :
- **Charge de rupture** : permet de déterminer la charge maximale à l'ELU par unité de surface que peut supporter la dalle assemblée décalée clouée dans le cas d'application d'un logement
- **Flèche instantanée** : permet de trouver la flèche à l'ELS que peut supporter la dalle assemblée décalée clouée

Voici les principales caractéristiques et dimensions de la dalle assemblée décalée clouée.

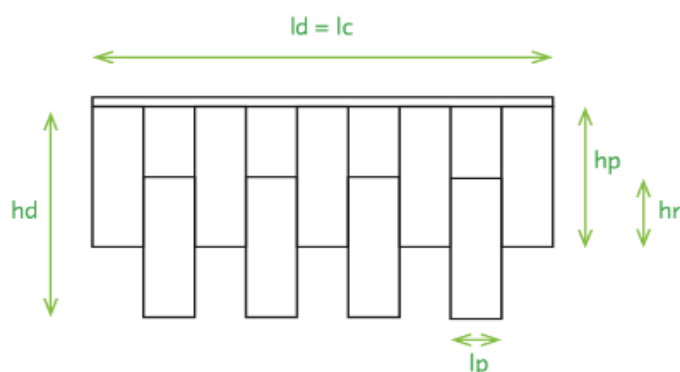


Figure 29 : Coupe de la dalle assemblée décalée clouée

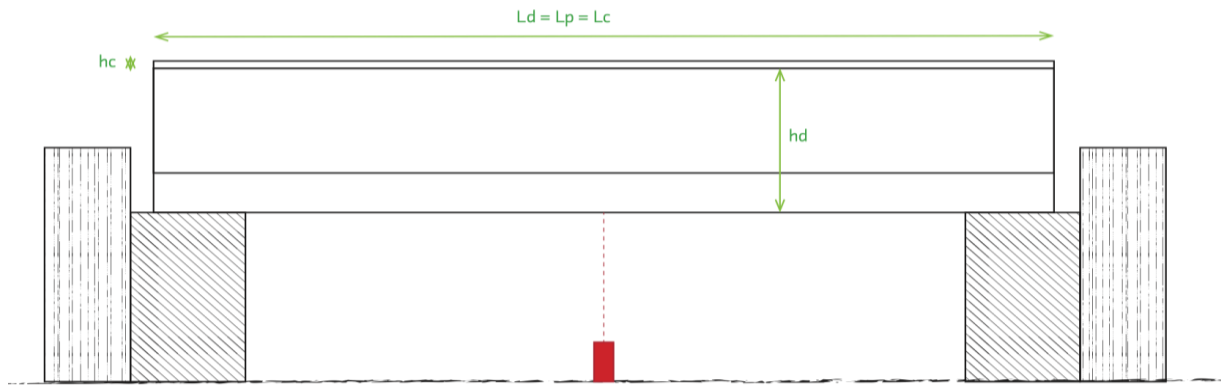


Figure 30: Plan de la dalle assemblée décalée clouée

CARACTERISTIQUES DALLE ASSEMBLEE DECALEE CLOUEE	données	unité
Ld = Dalle longueur	3,6	m
ld = largeur dalle	0,54	m
hd = hauteur dalle	0,180	m
Lp = longueur planche	3,6	m
lp = largeur planche	0,06	m
hp = hauteur planche	0,12	m
hr = hauteur recouvrement planche	0,06	m
np = nombre planche	9	
Lc = longueur contreplaqué	3,6	m
lc = largeur contreplaqué	0,54	m
hc = hauteur contreplaqué	0,012	m
MV= Masse volumique du robusta	480	Kg/m ³
Module d'élasticité du robusta	11600	MPa
kdef = (?)	0,6	
G = accélération de la pesanteur	10	m/s ²
Lportée = Portée entre appuis	3,6	m

Tableau 5: Tableau des caractéristiques de la dalle assemblée décalée clouée (associée aux figures ci-dessus)

Les calculs théoriques de prédimensionnement suivants sont à réaliser :

III.3.3.1. Calculs théoriques à l'ELU

Calcul de l'inertie (**Idalle**) : (voir feuille de calculs en annexe II.1.1)

$$I_{dalle} = \text{Inertie dalle pleine} / 2 + \text{Inertie chevauchement} / 2 + \text{Inertie contreplaqué}$$

$$= (ld \cdot hd^3 / 12) / 2 + (ld \cdot hr^3 / 12) / 2 + (lc \cdot hc^3 / 12)$$

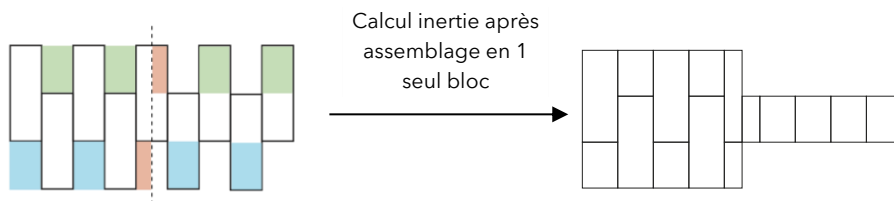


Figure 31: Schéma illustrant la formule ci-dessus de l'inertie (en « comblant » les vides par des pleins)

Calcul de la **charge répartie (P rep)** à l'ELU

$$P_{rep} = 1.35 \times (G_{rep} + G'_{rep}) + 1.5 \times Q_{rep}$$

G_{rep} : charges structurelles

G'_{rep} : charges non structurelles

Q_{rep} : charges variables d'exploitation

Calcul à l'ELU du **moment (M)** et de la **contrainte (sigma)**

Moment M = charge répartie x Lportée² / 8

Contrainte = σ = Moment x distance axe neutre/ I (moment quadratique)

Vérification si taux de travail de < 100 %

Taux de travail = Contrainte /12

Les calculs théoriques donnent les résultats suivants : (voir feuille de calculs en annexe II.1.2)

Calculs théoriques à l'ELU	Unité	Echelle 1	Echelle 1/2
Inertie = Idalle	m ⁴	0,000506	0, 000032
Charge Répartie = Prep	kN/m ²	6,60	5,98
Charge Répartie = Prep	kN/ml	3,6	1,6
Moment = M	kN.m	5,8	0,7
Contrainte = σ	MPa	1,60	1,45
Taux de travail	%	13	12

Tableau 6: Résultats de calculs théoriques de la dalle à l'ELU

III.3.3.2. Calculs théoriques à l'ELS

Calcul de la charge répartie à l'ELS (**Prep**)

Prep = 1 x (Grep +G'rep) + 1 x Qrep

Grep : charges structurales

G'rep : charges non structurales

Qrep : charges variables d'exploitation

Calcul flèche instantanée (**fi**)

fi = 5 x Prep x Lportée⁴ / 384 E module young x Inertie

Vérification si taux de travail < 100 %

Taux de travail

= Flèche instantanée / valeur limite flèche instantanée suivant l'Eurocode 5 [50]

=fi / (Lportée / 300)

Les calculs donnent les résultats suivants : (voir feuille de calculs en annexe II.1.3)

Calculs théoriques à l'ELS	Unité	Echelle 1	Echelle 1/2
Inertie = Idalle	m ⁴	0,000506	0, 000032
Charge Répartie = Prep	kN/m ²	4,72	4,26
Charge Répartie = Prep	kN/ml	2,55	1,15
Flèche instantanée = fi	mm	1	0,4
Taux de travail	%	8	7

Tableau 7: Résultats de calculs théoriques de la dalle à l'ELS

Les calculs ci-dessus montrent un prédimensionnement correct de la dalle assemblée décalée clouée conforme aux valeurs limites définies dans l'Eurocode 5 [50].

Ce système constructif est donc dimensionné à la résistance plutôt qu'à la flèche (les taux de travail sont bien plus élevés sur les ELU que sur les ELS). C'est intéressant car le bois et les planchers bois sont très généralement dimensionnés à la flèche et non à la résistance. Cela explique aussi en partie que ces planchers sont utilisés pour des grandes portées.

Les dalles étant correctement pré-dimensionnées, les expérimentations retenues peuvent être définies.

III.3.4. Description des expérimentations retenues

Pour rappel, l'idée retenue est donc de jouer sur le type de cultivars, le classement du bois et la coupe a différentes positions dans la grume. Plusieurs expériences seront à mener en comparaison à une dalle de référence en résineux.

Pour l'expérimentation, sera assemblée une dalle assemblée clouée à l'échelle 1/2 afin de limiter les quantités de bois utilisées et simplifier la mise en œuvre.

La composition de la dalle assemblée décalée clouée réelle à **l'échelle 1** est la suivante :

- Dalle composée de 5 planches supérieures et 4 planches inférieures de taille unitaire 60mm x 120mm x 3,6m
- Contreplaqué de 12 mm d'épaisseur
- Vis d'au moins de 180 mm de longueur pour pouvoir traverser 3 planches contiguës.

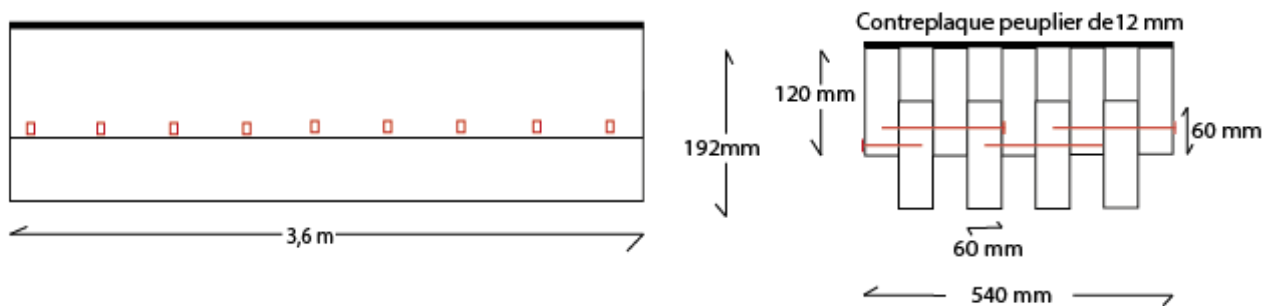


Figure 32: Coupes à l'échelle 1 de la dalle

La composition de la dalle assemblée décalée clouée expérimentale à **l'échelle 1/2** est la suivante :

- Dalle composée de 5 planches supérieures et 4 planches inférieures de taille unitaire 30mm x 60mm x 1,8m
- Contreplaqué de 6 mm d'épaisseur
- Vis d'au moins de 90 mm de longueur pour pouvoir traverser 3 planches contiguës.

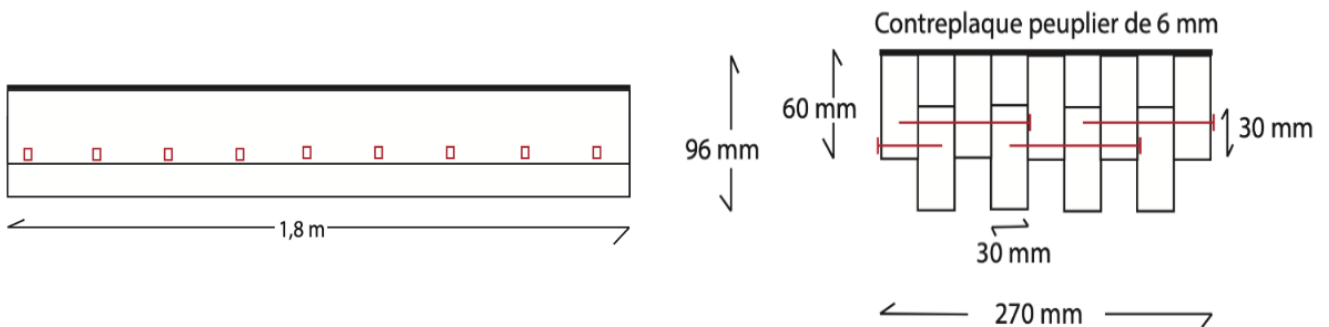


Figure 33: Coupes à l'échelle 1/2 de la dalle

L'expérimentation doit répondre au fait que le principe constructif potentiel est réalisable malgré l'hétérogénéité du peuplier suivant le critère retenu suivant (classification du bois utilisé, différents cultivars de peuplier à utiliser). C'est pourquoi différentes propositions de composition de dalles ont été imaginées. Pour chaque proposition, un prédimensionnement et des mesures seront réalisés. L'analyse des résultats d'expérience permettra de vérifier le comportement du peuplier en fonction de son hétérogénéité. Chaque dalle est construite de manière identique avec différents critères de variabilité.

Pour rappel, l'objectif de l'expérimentation est :

- dans un 1er temps de comparer les différentes compositions de dalles assemblées décalées clouées en peuplier à la dalle de référence en résineux.
- dans un 2nd temps, la comparaison sera réalisée entre les différentes compositions de dalles assemblées décalées clouées en peuplier

Voici donc les différentes compositions de dalles proposées :

- Proposition 1 : Dalle de référence (dalle 1)
 - o Essence : résineux (à définir en fonction de la disponibilité)
 - o Classification homogène des planches supérieures et inférieures en C24
 - o Contreplaqué

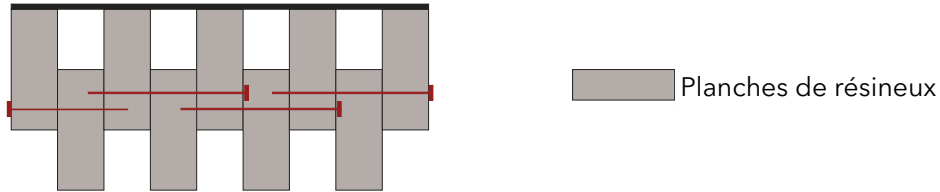


Figure 34: : Schéma de la dalle de référence

- Proposition 2 : comparaison d'une dalle en peuplier à une dalle en résineux (dalle 2)
 - o Essence : peuplier
 - o Cultivar utilisé : Robusta
 - o Classification homogène des planches supérieures et inférieures en C24
 - o Contreplaqué

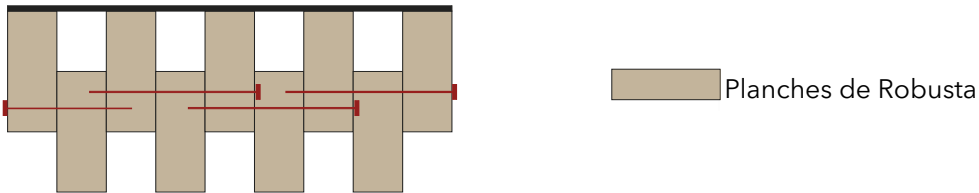


Figure 35: Schéma de la dalle de peuplier en C24

Le but est dans un premier lieu de comparer la déformation de la dalle en résineux avec celle en peuplier avec de 2 essences sous une charge similaire charge jusqu'à rupture. Un diagramme de force-déformation devrait être identique face à ces deux dalles qui ont des bois de classement identique (C24).

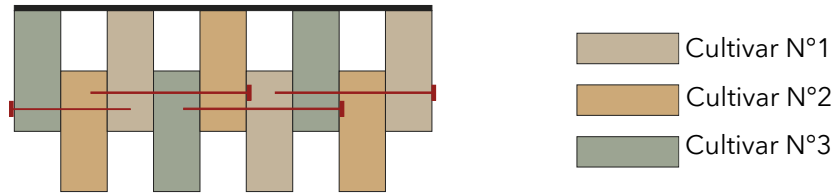
- Proposition 3 : impact de la classification du bois pour un même cultivar peuplier (dalle 3)
 - o Essence : peuplier
 - o Cultivar utilisé : Robusta
 - o Planches d'une même grume de l'arbre
 - o Contreplaqué



Figure 36: Schéma de la dalle peuplier avec des sections prélevées dans la même grume

Dans ce cas, l'idée est de vérifier l'impact de l'hétérogénéité du bois de peuplier au niveau de la grume sur ce principe constructif. Le test ici sera de répartir aléatoirement les différentes planches d'une même grume sans connaître le classement et vérifier le comportement de cette dalle et de comparer le diagramme de force-déformation avec celui de la proposition 1.

- Proposition 4 : impact de l'hétérogénéité des cultivars de peuplier (dalle 4)
 - o Essence : peuplier
 - o Toutes sortes de cultivars
 - o Contreplaqué



Il s'agit ici de vérifier l'impact de l'hétérogénéité des cultivars de peuplier sur ce principe constructif. Le test ici sera de prendre différentes planches de cultivars différents sans connaître le classement et vérifier le comportement de cette dalle et de comparer le diagramme de contraintes-déformation avec celui de la proposition 1.

Toutes ces propositions seront ajustées en fonction des stocks de bois qui seront disponibles au moment des expériences (voir paragraphe III.4.2)

III.3.5. Fiche de calcul des dalles expérimentées

Préliminairement à l'expérimentation proprement dite, une fiche de calcul de la dalle assemblée clouée en peuplier est réalisée pour s'assurer de la faisabilité de chaque expérience (mesurabilité de la flèche, charge nécessaire jusqu'à l'ELS et la rupture). Le prédimensionnement réalisé au paragraphe III.3.3 **Erreur ! Source d'un renvoi introuvable.** pour le calcul de la flèche instantanée (en mm) à l'ELS sont aboutis aux résultats suivants : (voir feuille de calculs en annexe II.1.1)

Calculs théoriques à l'ELS	Unité	Echelle 1	Echelle 1/2
Flèche instantanée = f_i	mm	1,0	0,4

Tableau 8: Rappel des résultats de calculs théoriques de la dalle à l'ELS

Ces résultats de calculs aboutissent avec les dimensions initiales de la dalle à l'échelle 1/2 **à une flèche instantanée inférieure au mn** et donc difficilement visible à l'œil nu et mesurable. Il est donc nécessaire de reprendre les calculs et jouer sur les dimensions des planches de la dalle, afin d'augmenter la flèche résultante (voir tableau 9).

- L_d → Longueur de la dalle (test 1)
- l_p → Largeur de la planche (test 4)
- h_p → Hauteur de la planche (tests 2 et 6)
- h_r → Hauteur de recoupement du plancher (tests 3 et 5)
- n_p → Nombre de planches (test 7)

Echelle	1	1	1	1
	Dalle oportune	Test 1	Test 2	Test 3
CARACTERISTIQUES DALLE ASSEMBLEE DECALEE CLOUEE				
Ld = Dalle longueur (m)	3,6	4	4	4
ld = largeur dalle (m)	0,54	0,54	0,54	0,54
hd = hauteur dalle (m)	0,280	0,280	0,160	0,190
Lp = longueur planche (m)	3,6	4	4	4
lp = largeur planche (m)	0,06	0,06	0,06	0,06
hp = hauteur planche (m)	0,18	0,18	0,12	0,12
hr = hauteur recoupement planche (m)	0,08	0,08	0,08	0,05
np = nombre planche	9	9	9	9
FLECHE INSTANTANNEE THEORIQUE ELS (mm)	0,49	0,74	3,18	2,1

Echelle	1/2	1/2	1/2	1/2
	Dalle oportune	Test 1	Test 2	Test 3
CARACTERISTIQUES DALLE ASSEMBLEE DECALEE CLOUEE				
Ld = Dalle longueur (m)	1,8	2	2	2
ld = largeur dalle (m)	0,27	0,27	0,27	0,27
hd = hauteur dalle (m)	0,14	0,14	0,14	0,14
Lp = longueur planche (m)	1,8	2	2	2
lp = largeur planche (m)	0,03	0,03	0,03	0,03
hp = hauteur planche (m)	0,09	0,09	0,06	0,06
hr = hauteur recoupement planche (m)	0,04	0,04	0,04	0,025
np = nombre planche	9	9	9	9
FLECHE INSTANTANNEE THEORIQUE ELS (mm)	0,49	0,2	0,74	0,3

Echelle	1	1	1	1	1
	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Données choisies
CARACTERISTIQUES DALLE ASSEMBLEE DECALEE CLOUEE					
Ld = Dalle longueur (m)	4	4	4	4	4,5
ld = largeur dalle (m)	0,18	0,18	0,18	0,08	0,36
hd = hauteur dalle (m)	0,190	0,160	0,120	0,120	0,140
Lp = longueur planche (m)	4	4	4	4	4,5
lp = largeur planche (m)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04
hp = hauteur planche (m)	0,12	0,12	0,1	0,1	0,1
hr = hauteur recoupement planche (m)	0,05	0,08	0,08	0,08	0,06
np = nombre planche	9	9	9	4	9
FLECHE INSTANTANNEE THEORIQUE ELS (mm)	2,08	3,14	6,07	5,82	19,75

Echelle	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Données choisies
CARACTERISTIQUES DALLE ASSEMBLEE DECALEE CLOUEE					
Ld = Dalle longueur (m)	2	2	2	2	3
ld = largeur dalle (m)	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
hd = hauteur dalle (m)	0,14	0,14	0,14	0,14	0,075
Lp = longueur planche (m)	2	2	2	2	3
lp = largeur planche (m)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
hp = hauteur planche (m)	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05
hr = hauteur recoupement planche (m)	0,025	0,04	0,04	0,04	0,025
np = nombre planche	9	9	9	4	9
FLECHE INSTANTANNEE THEORIQUE ELS (mm)	3,18	1,35	2,1	0,89	8,68

Tableau 9: Tableaux des différentes dimensions/critères à faire varier

On peut constater que certains points font peu évoluer la flèche instantanée :

- np → Nombre de planches (test 7)
- lp → Largeur de la planche (test 4)

Par contre, d'autres permettent d'observer une évolution significative de la flèche instantanée comme :

- $L_d \rightarrow$ Longueur de la dalle (voir test 1)
- $h_p \rightarrow$ Hauteur de la planche (voir tests 2 et 6)
- $h_r \rightarrow$ Hauteur de recouvrement du plancher (voir tests 3 et 5)

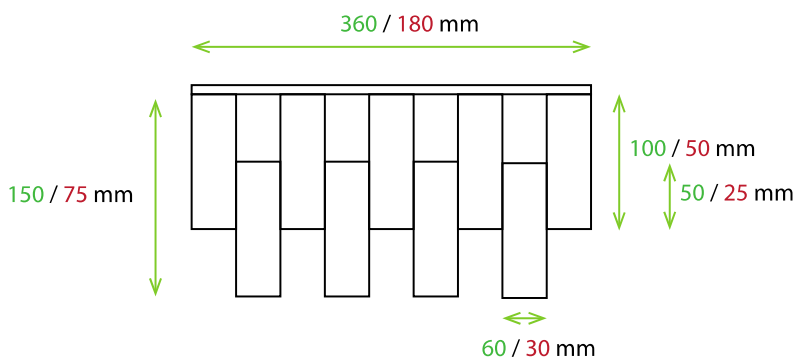
Finalement, en jouant sur ces 3 derniers critères on passe d'une flèche de :

- 0,49 mm (rouge dans le tableau) à 7,36 mm (violet dans le tableau) à échelle 1
- 0,2 mm (rouge dans le tableau) à 3,25 mm (violet dans le tableau) à échelle 1/2

En conclusion, les nouvelles dimensions retenues de la dalle assemblée décalée clouée pour les expérimentations sont les suivantes (voir tableau 10 et figure 39):

Echelle	1
	Données choisies
CARACTERISTIQUES DALLE ASSEMBLEE DECALEE CLOUEE	
Ld = Dalle longueur (m)	4,5
ld = largeur dalle (m)	0,36
hd = hauteur dalle (m)	0,140
Lp = longueur planche (m)	4,5
lp = largeur planche (m)	0,04
hp = hauteur planche (m)	0,1
hr = hauteur recouvrement planche (m)	0,06
np = nombre planche	9
FLECHE INSTANTANEE THEORIQUE ELS (mm)	19,75
Echelle	1/2
	Données choisies
CARACTERISTIQUES DALLE ASSEMBLEE DECALEE CLOUEE	
Ld = Dalle longueur (m)	3
ld = largeur dalle (m)	0,27
hd = hauteur dalle (m)	0,075
Lp = longueur planche (m)	3
lp = largeur planche (m)	0,03
hp = hauteur planche (m)	0,05
hr = hauteur recouvrement planche (m)	0,025
np = nombre planche	9
FLECHE INSTANTANEE THEORIQUE ELS (mm)	8,68

Tableau 10: Tableau montrant les différentes dimensions/critères choisis pour l'expérimentation



Echelle 1
Echelle 1/2

s

Figure 38: Coupe des nouvelles dimensions de la dalle expérimentale

Compte tenu de ces nouvelles dimensions, voici les résultats de calcul de la flèche instantanée (en mm) en considérant toujours à l'ELS la charge répartie suivante :

Charge Répartie = Prep = 1 x (Grep + G'rep) + 1 x Qrep

Grep : charges structurelles (poids propre de la dalle)

G'rep : charges non structurelles (contreplaqué uniquement)

Qrep : charges variables d'exploitation (charge d'exploitation pour un logement)

Flèche instantanée = fi = 5 Prep x Lportée⁴ / (384 x Ebois x Idalle)

Lportée = portée entre appuis

Ebois = module d'élasticité (module Young) bois utilisé (résineux ou peuplier)

Idalle = Inertie dalle

Taux de travail

= Flèche instantanée / valeur limite flèche instantanée suivant l'Eurocode 5 [50]

Les calculs repris à l'ELS donnent les résultats suivants : (voir feuille de calculs en annexe II.3.3)

Calculs théoriques à l'ELS	Unité	Echelle 1	Echelle 1/2
Charge Répartie = Prep	kN/m ²	1,98	1.74
Charge Répartie = Prep	kN/ml	1,07	0.47
Flèche instantanée = fi	mm	19,75	8,68
Taux de travail	%	99	87

Tableau 11: résultats calculs théoriques dalle expérimentée à l'ELU

Les résultats de calculs aboutissent à des dimensions de flèche plus mesurables de la dalle à l'échelle 1/2. Toutefois il sera indispensable d'être précis au mm (voir dixième de mm) pour les mesures lors de l'expérience pour apprécier une évolution de la flèche en fonction du chargement.

Voici également les résultats de calcul du moment M (kN.m) et de la contrainte (en MPa) en considérant toujours à l'ELU la charge répartie suivante

Charge répartie ELU = Prep = 1.35 x (Grep + G'rep) + 1.5 x Qrep

Grep : charges structurelles (poids propre de la dalle)

G'rep : charges non structurelles (contreplaqué uniquement)

Qrep : charges variables d'exploitation (charge d'exploitation pour un logement)

Moment = M = P repartie x Lportee² / 8

Lportée = Portée entre appuis

Contrainte = σ = Moment x distance axe neutre / I dalle (moment quadratique)

Distance axe neutre = h dalle / 2

I dalle = moment quadratique ou inertie dalle

Les calculs repris à l'ELU donnent les résultats suivants : (voir feuille de calculs en annexe II.3.2)

Calculs théoriques à l'ELU	Unité	Echelle 1	Echelle 1/2
Charge Répartie = Prep	kN/m ²	2,90	2,57
Charge Répartie = Prep	kN/ml	1,6	0.7
Moment = M	KN.m	7,04	0,78
Contrainte = σ	MPa	6,71	5,96
Taux de travail	%	56	50%

Tableau 12: résultats calculs théoriques dalle expérimentée à l'ELS

Ce changement de dimensions des planches a été préalablement vérifié auprès du scieur, pour qu'à l'échelle ½ les planches ne soient pas trop fines pour la découpe et l'assemblage des planches de la dalle.

En conclusion, ces calculs préalables ont permis de :

- S'assurer de la faisabilité des mesures avant l'expérience
- Appréhender les valeurs en jeu pour
 - o la flèche instantanée attendue.
 - o le chargement à l'ELS (de l'ordre de 120kg)

La non-réalisation de ces calculs préliminaires m'aurait amenée dans une impasse lors de l'expérimentation, car la flèche n'aurait pu être mesurée sur place.

III.3.6. Protocole d'expérimentation

Pour exécuter cette expérimentation, la dalle assemblée décalée clouée l'expérience sera à l'échelle ½ pour permettre une exécution plus simple de l'expérience.

Cette expérience pourra être effectuée dans une scierie me fournissant le bois et m'autorisant d'effectuer mon expérimentation dans leurs locaux. Voici la liste des matériaux et d'outils nécessaires pour appréhender toutes les phases de l'expérience.

III.3.6.1. Matériel à commander

La dalle assemblée décalée clouée se compose à minima de :

- 11 (9+3+0) planches de cultivar Robusta C24
- 3 (0+3+0) planches de cultivar Robusta C18
- 3 (0+0+3) planches de cultivar Robusta C12
- 9 planches de cultivars différent
- 1 lot de clous/vis longueur 200 mm
- 3 Panneaux (type contreplaqué peuplier) vissés sur les planches supérieures : contreplaqué de 12 mm à 5 plis croisés (utilisé pour les dalles à charges réparties)
- 2 bastaings d'appuis et 2 bastaings de cales
- Masses élémentaires de 10kg ou eau
- Lasermètre (mesure de la flèche) ou un matériel plus précis
- Balances
- Bâche
- Matériels et outils :
 - o Marteaux
 - o Scie sauteuse
 - o Crayons /scotch

Lieu de l'expérimentation : Scierie à définir

Représentation de l'expérimentation :

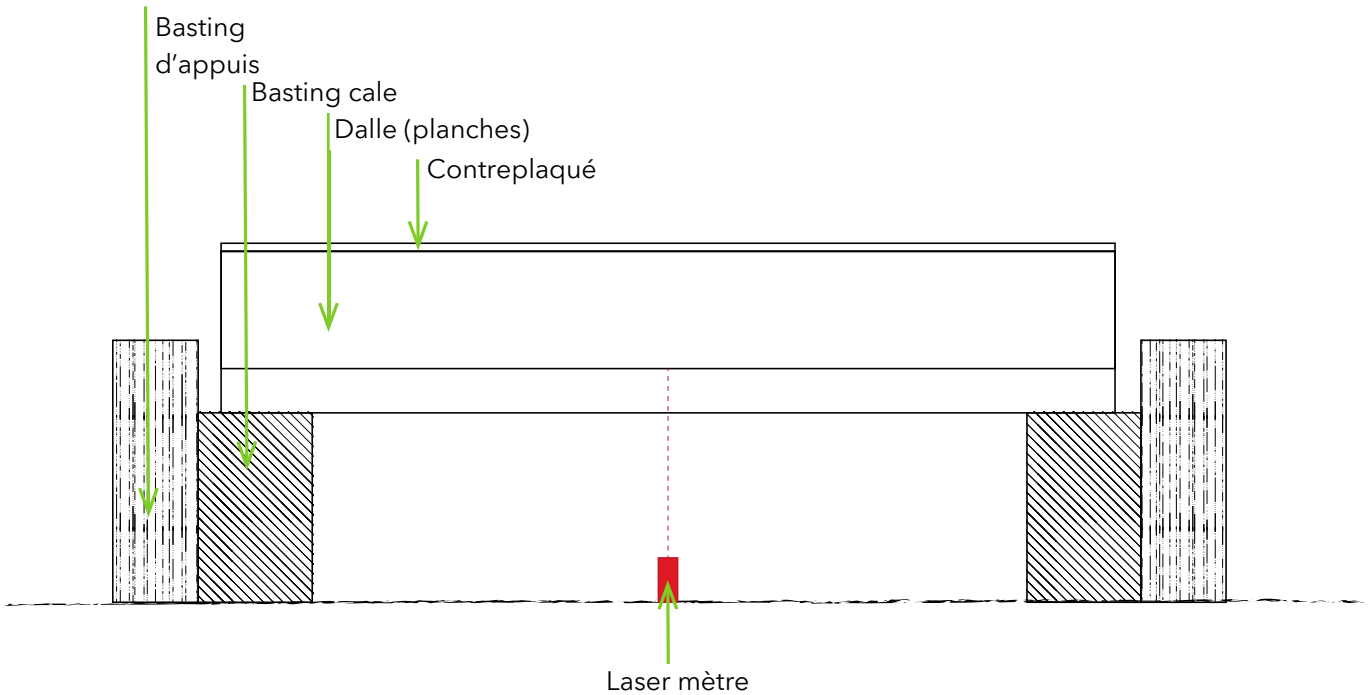


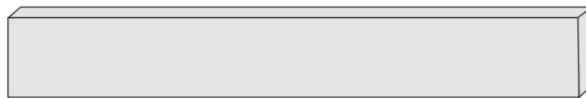
Figure 39: Schéma permettant de visualiser où sont placés les éléments et comment les disposer

III.3.6.2. Montage/assemblage des dalles

En premier temps, les supports de la dalle sont disposés de manière à supporter la dalle avec son chargement.

Dans un second temps, les dalles sont assemblées comme suit :

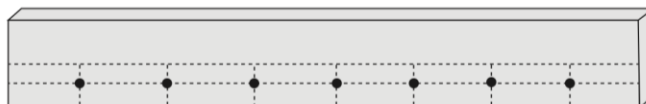
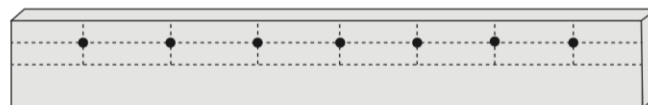
- Regrouper les planches entre elle pour chaque proposition avec : planches, contreplaqués et clous.
- Proposition 1 : Dalle de référence résineux : 9 planches en C24 résineux + contreplaqué + clous
- Proposition 2 : 9 planches en C24 de robusta + contreplaqué + clous
- Proposition 3 : 9 planches de robusta avec classement hétérogène + contreplaqué + clous
- Proposition 4 : 9 planches cultivar de peupliers différents + contreplaqué + clous



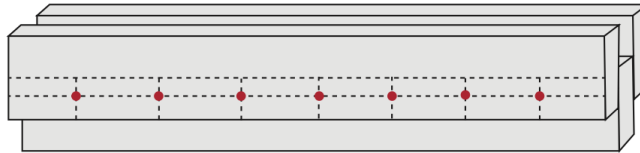
- Puis tracer le milieu de chaque hauteur des planches pour pouvoir les assembler



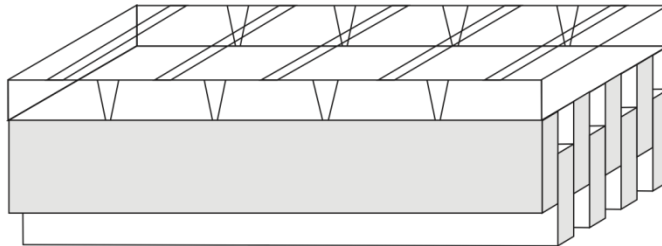
- Puis retracer le milieu pour pouvoir planter chaque clou à distance égale



- Puis planter les clous pour transpercer 3 planches et demi



- Puis créer le coffre en contreplaqué
- Puis le clouer à la dalle



- Ajouter une bâche dans le coffrage en contreplaqué qui permet de la remplir d'eau

Figure 40: Schémas illustrant les différentes étapes du montage de la dalle

Support de la dalle : bastaings d'appui cloués aux bastaings de cale

Cette dalle sera posée sur les bastaings. Ce support sera posé sur les balances pour connaître le chargement en eau.

III.3.6.3. Présentation de l'expérience pour chaque proposition

L'expérience consiste à réaliser la mesure directe de la charge à la rupture et de la flèche instantanée par chargement progressif du plancher. Un graphique sera produit à l'issue des mesures et permettra de déterminer le "moment de cassure" où la poutre se déforme plus vite avec une même augmentation de charge (domaine élastique/ domaine élastoplastique).

Le déroulement de chaque proposition sera identique :

- La dalle sera posée sur les supports (bastaings) qui seront posés sur les balances.
- Le poids et la flèche seront notés avant le début de l'expérimentation
- Puis une croix au sol sera tracée pour poser le lasermètre toujours à la même position
- De l'eau sera disposée dans le coffrage pour répartir la charge sur la surface totale de la dalle
- Remplissage de l'eau de 10 kilos en 10 kilos
- Mesure de la flèche tous les 10 kilos (à reporter dans un tableau)

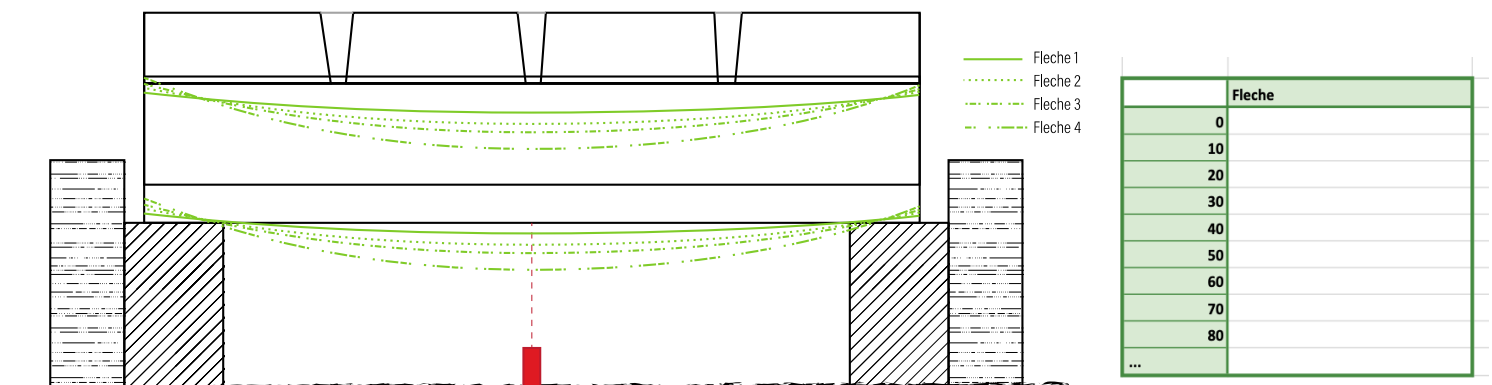


Figure 41: Schémas illustrant le principe de mesures et relevé de la flèche

Ce protocole permettra de mesurer la flèche instantanée, image de :

- la déformation progressive de la dalle
- le comportement de la dalle face à l'ensemble des charges
- l'atteinte du point de rupture de la dalle

Un diagramme de charge - déformation de la dalle sera tracé au fil de l'expérience.

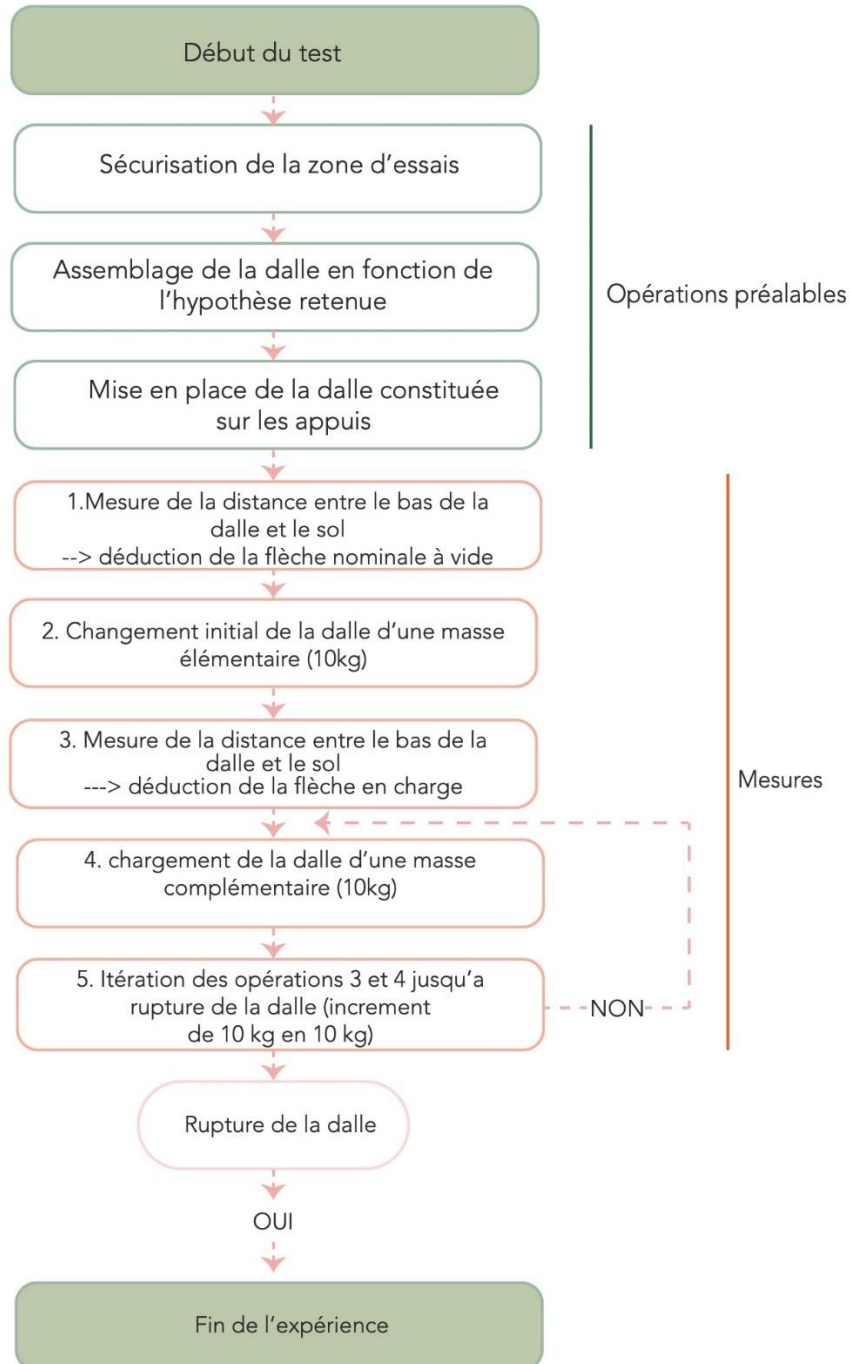


Figure 42: Synoptique des étapes de l'expérience

Les mesures élémentaires seront réalisées 3 à 4 fois de suite pour en déduire statistiquement la valeur moyenne de la mesure à considérer.

III.3.7. Résultats attendus de l'expérimentation

Les résultats attendus sont :

- dans un premier temps, la comparaison et la cohérence entre les valeurs calculées (prédimensionnement) et les valeurs mesurées
 - o Charge de rupture
 - o Flèche instantanée
- dans un second temps, la comparaison de la dalle assemblée décalée clouée avec la dalle de référence en résineux de mêmes caractéristiques (dalle 1)
- dans un troisième temps, l'influence du classement sur la résistance de la dalle par comparaison des expériences entre les hypothèses 1, 2 et 3

Ces séries d'expérimentations et analyses associées permettront de définir les solutions adaptées pour la mise en œuvre de la dalle assemblée décalée clouée et conclure si ce système constructif est réalisable en peuplier et si l'hétérogénéité du peuplier n'est plus un obstacle à son utilisation en tant que bois d'œuvre pour ce principe constructif de dalle.

III.4. Réalisation des expériences

III.4.1. Déroulement du protocole

Les expériences se sont déroulées pendant 3 jours dans la scierie Nobécourt à Brie dans le département de la Somme (80). Le scieur a fourni l'ensemble des matériaux et matériels définis au paragraphe précédent pour les 4 essais prévus. Il a scié les planches de bois en résineux et peuplier en fonction des grumes disponibles sur le parc.

Dans un premier temps, nous avons monté les 4 dalles prototypes pour pouvoir, dans un deuxième temps, les charger et les tester.

Les protocoles initialement imaginés au paragraphe III.3 des expériences ont changé pour s'adapter aux conditions et aux matériaux disponibles sur place et sont décrits dans les paragraphes suivants. Ont notamment évolué les points suivants :

- Utilisation de parpaings au lieu de bastaings (non disponible dans l'atelier). De plus les parpaings offrent davantage de rigidité sous le poids de la dalle chargée. Les bastaings sous le poids de la charge se seraient comprimés avec un risque de fausser les résultats

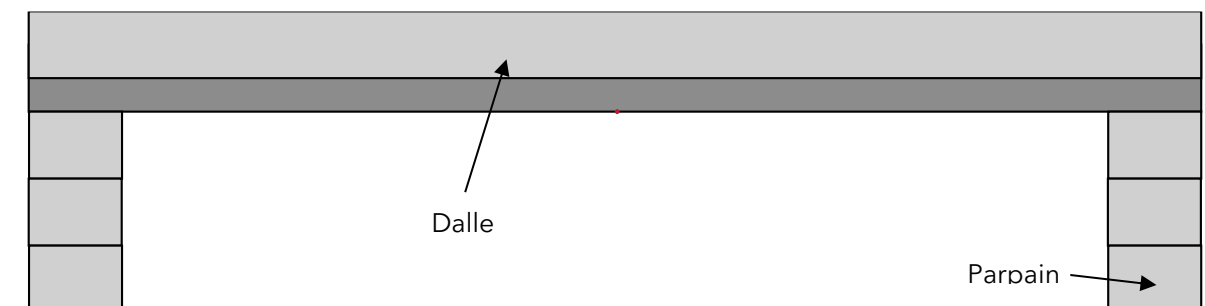


Figure 43: Schémas illustrant les appuis et le positionnement de la dalle

- Utilisation de sable mouillé au lieu de l'eau (non disponible dans l'atelier). Le sable mouillé a l'avantage d'avoir une masse volumique plus élevée. De plus on gaspille moins de matière car on peut la récupérer par la suite une fois tombée.
- les bacs en OSB ont été utilisés uniquement dans le cadre de l'expérience 1 (voir ci-dessous analyse de l'expérience 1 paragraphe IV.1.1).

- les bois mises à disposition par le scieur sont des bois non classés et non secs. Ce dernier ne dispose pas de machine de classement sur place. Cependant il connaît par expérience le classement prévisible des planches en fonction du cultivar de peuplier et de l'endroit dans la grume où les planches ont été sciées
- la méthode de chargement a été modifiée à partir de l'expérience 2 (voir ci-dessous analyse de l'expérience 1 paragraphe IV.1.2)
- Des instruments de mesures ont été ajoutés (pied à coulisse et la feuille millimétrée pour compléter le laser mètre (voir présentation ci-dessous). L'instrument de mesure initialement imaginé est le mètre-laser qui a une pression de 1 mm. On a voulu donc trouver un instrument de mesure plus précis (pied à coulisse précis au 1/10e de mm). Par contre ce dernier est limité à une flèche de 15 cm

III.4.2. Présentation des différentes dalles

Nous avons commencé par fabriquer les différentes dalles suivant le mode opératoire du paragraphe III.3.6.2. Chaque dalle a été construite de la même manière, la seule variabilité était la composition des planches. Pour assembler les dalles, nous avons assemblé planche après planche avec des vis de longueurs adaptées suivant le schéma constructif suivant :

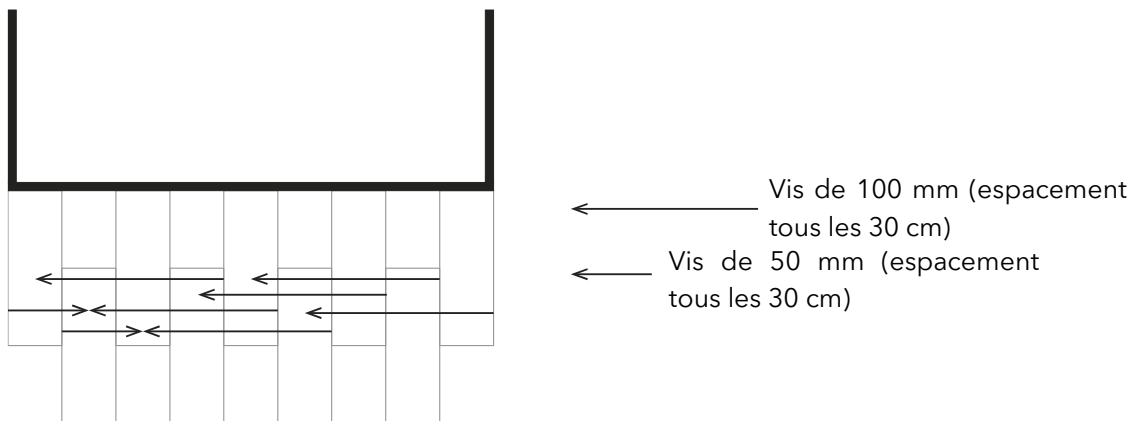


Figure 44: Schéma de vissage des planches de dalle

Un ruban métré tous les 5 cm a permis le positionnement régulier des vis sur la longueur de la dalle. A chaque nouvelle planche, les vis ont été décalées de 5 cm par rapport à la précédente.



Ruban métré pour positionner les vis

Superposition des planches

Vissage des planches

Figure 45: Photos de la construction des dalles

Le principe d'assemblage de la dalle ci-dessous a été réfléchi pour assurer un maintien de chaque planche par 3 vis minimum.

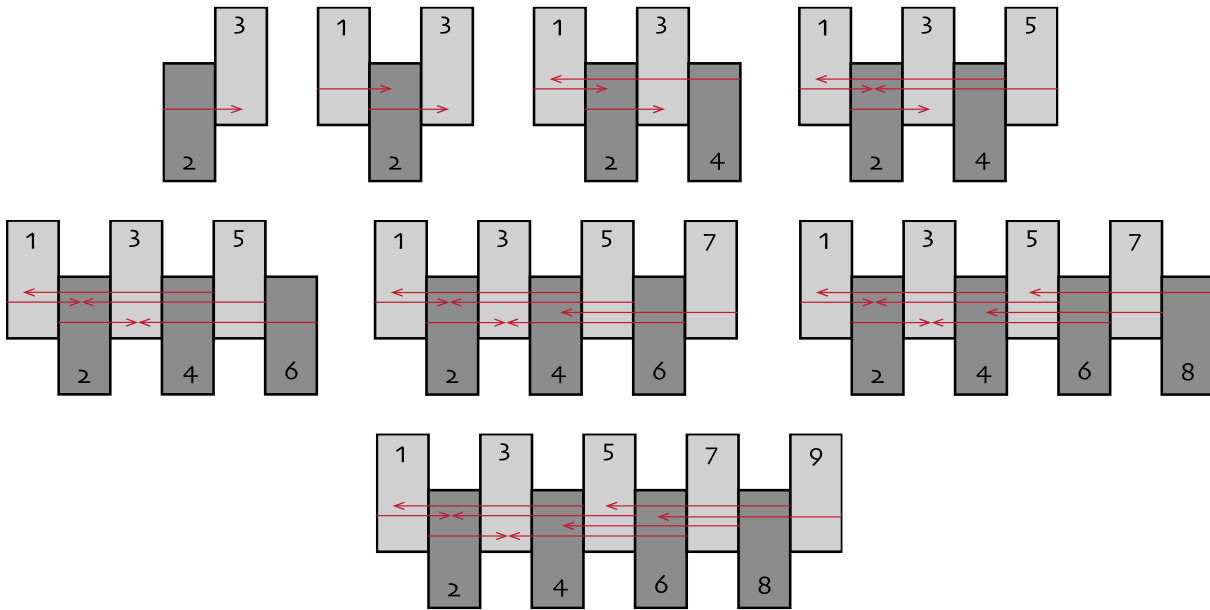
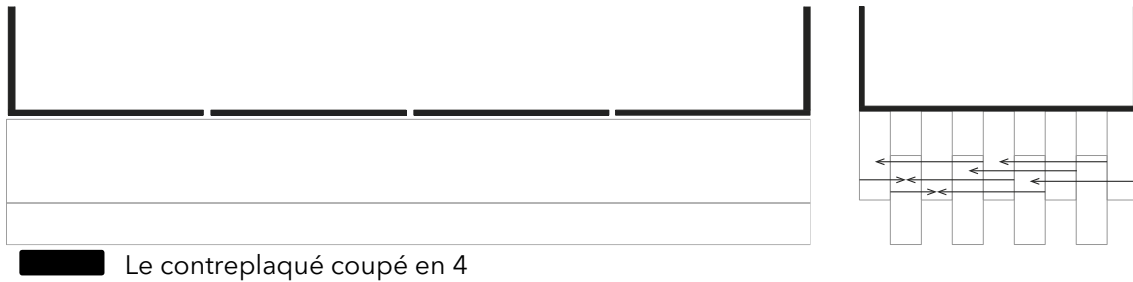


Figure 46: Explication de l'ordre de l'assemblage des planches avec des vis.

Nous avons également préparé les bacs en OSB (contreplaqué non disponible) pour contenir la charge de sable mouillé et de répartir au mieux la charge sur toute la surface de la dalle suivant (figure 48 et figure 49):



Le contreplaqué coupé en 4

Figure 47: Schémas montrant les bacs en OSB pour la charge en sable



Figure 48: Photos des différents bacs en OSB

Voici les différentes compositions des dalles réalisées :

Expérimentation 1 : Dalle de référence en épicéa

- Essence : Epicéa (résineux)
- Classification homogène en C24 des planches supérieures et inférieures

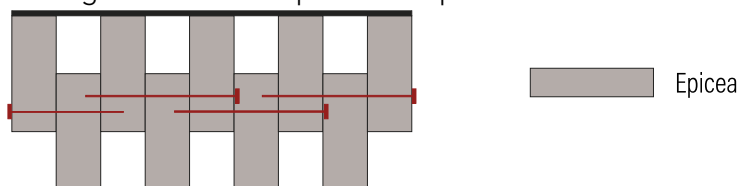


Figure 49: Schéma de la dalle en épicéa

Expérimentation 2 : Dalle de peuplier Robusta orienté au vent dominant

- Objectif : Comparaison d'une dalle en peuplier à une dalle en résineux
- Essence : Peuplier
- Cultivar : Robusta
- Classification non certifiée par le scieur (estimée par expérience à C30)
- Bille de pied et surbille de la grume de l'arbre
- Partie de l'arbre orientée au vent dominant

COMPOSITION DALLE	
Essence/ cultivar/ positionnement dans la grume	N° planche
Peuplier Robusta au vent pied de bille (PR)	planche 1
Peuplier Robusta au vent surbille (SR)	planche 2
Peuplier Robusta au vent pied de bille (PR)	planche 3
Peuplier Robusta au vent surbille (SR)	planche 4
Peuplier Robusta au vent pied de bille (PR)	planche 5
Peuplier Robusta au vent surbille (SR)	planche 6
Peuplier Robusta au vent pied de bille (PR)	planche 7
Peuplier Robusta au vent surbille (SR)	planche 8
Peuplier Robusta au vent pied de bille (PR)	planche 9

Tableau 13 : Composition des différentes planches choisies pour la mise en œuvre de la dalle 2

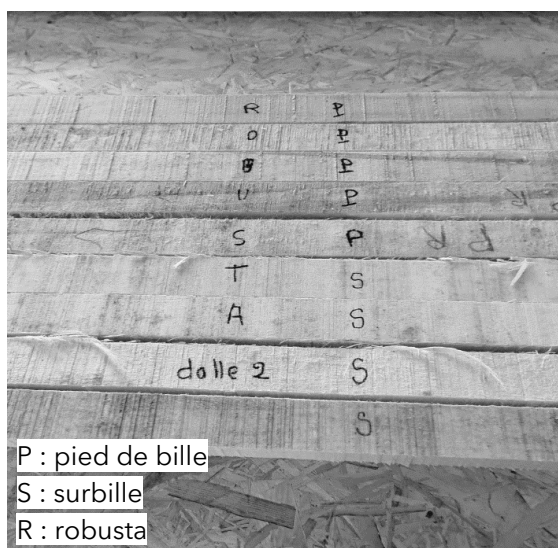


Figure 50: Photo montrant les planches de la dalle 2

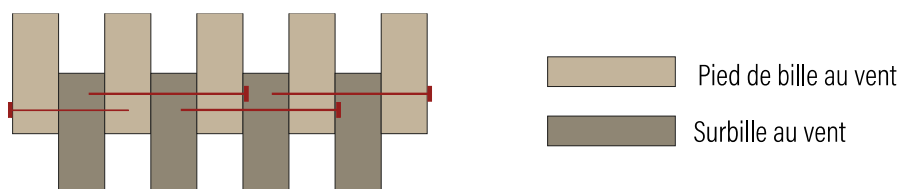


Figure 51: Schéma de la dalle de peuplier Robusta orienté au vent dominant

Expérimentation 3 : Dalle de peuplier Robusta non orienté au vent dominant

- Objectif : Etudier l'impact de l'hétérogénéité au niveau de la section au sein d'une même grume de l'arbre
- Essence : peuplier
- Cultivar : Robusta
- Classification non certifiée par le scieur (estimée par expérience à C24)
- Surbille de la grume de l'arbre
- Partie de la bille orientée non au vent

COMPOSITION DALLE	
Essence/ cultivar/ positionnement dans la grume	N° planche
Peuplier Robusta non au vent pied de bille (PR)	Planche 1
Peuplier Robusta non au vent pied de bille (PR)	Planche 2
Peuplier Robusta non au vent pied de bille (PR)	Planche 3
Peuplier Robusta non au vent pied de bille (PR)	Planche 4
Peuplier Robusta non au vent pied de bille (PR)	Planche 5
Peuplier Robusta non au vent pied de bille (PR)	Planche 6
Peuplier Robusta non au vent pied de bille (PR)	Planche 7
Peuplier Robusta non au vent pied de bille (PR)	Planche 8
Peuplier Robusta non au vent pied de bille (PR)	Planche 9

Tableau 14: Composition des différentes planches choisies pour la mise en œuvre de la dalle 3



Figure 52 : Photos des planches de la dalle 3

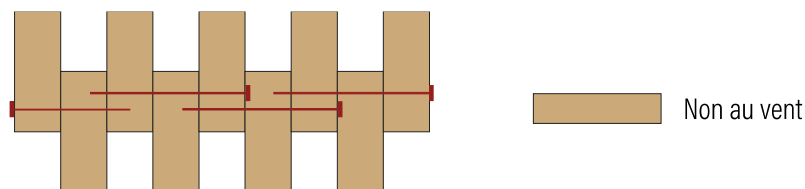


Figure 53: Schéma de la dalle peuplier Robusta non orienté au vent dominant

Expérimentation 4 : Dalle de peuplier avec plusieurs cultivars

- Objectif : Etudier l'impact de l'hétérogénéité des cultivars de peuplier
- Essence : peuplier
- Cultivars : Beaupré et I214
- Classification non certifiée par le scieur (estimée par expérience inférieure à C18)
- Pied de bille et surbille de la grume des arbres
- Partie de la bille orientée non au vent (à l'aspect du bois)

COMPOSITION DALLE	
Essence/ cultivar/ positionnement dans la grume	N° planche
Peuplier I214 pied de bille (IP)	Planche 1
Peuplier Beaupré surbille (BS)	Planche 2
Peuplier I214 surbille (IS)	Planche 3
Peuplier Beaupré surbille (BS)	Planche 4
Peuplier I214 pied de bille (IP)	Planche 5
Peuplier Beaupré surbille (BS)	Planche 6
Peuplier I214 surbille (IS)	Planche 7
Peuplier Beaupré surbille (BS)	Planche 8
Peuplier I214 surbille (IS)	Planche 9

Tableau 15 : Composition des différentes planches choisies pour la mise en œuvre de la dalle 4

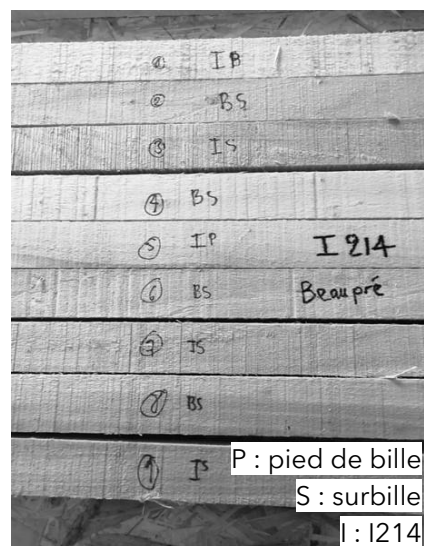


Figure 54: Photo des planches de la dalle 4

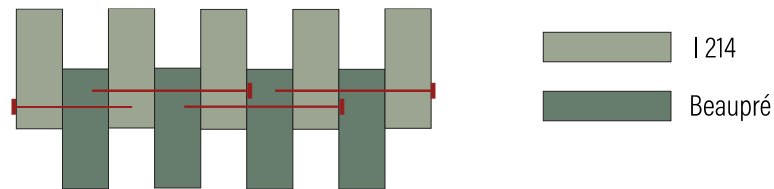


Figure 55: Schéma de la dalle peuplier avec différents cultivars

III.4.3. Installation des dalles

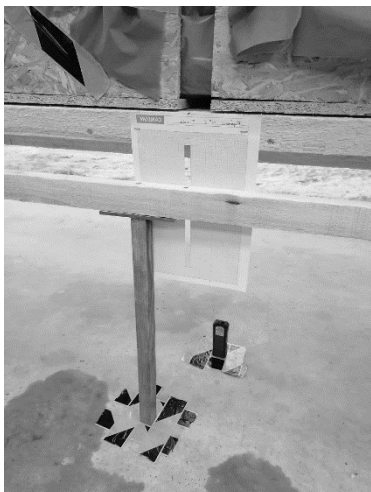
Nous avons commencé par préparer l'environnement des expériences où les dalles seront chargées. Voici les différentes étapes :

- Empiler les 3 parpaings support des futures dalles de manière identique de chaque côté à une même hauteur
- Positionner la dalle pour respecter la portée entre les appuis de 3 m
- Tracer une ligne à mi-portée de la dalle pour avoir un point de référence identique pour tous les mesures de flèches
- Placer et caler l'appui de référence des mesures au pied à coulisse (planche à mi-hauteur plus cale au sol)
- Tracer au sol la position répétitive pour les mesures au laser mètre
- Placer la feuille millimétrée pour relever les marques de flèche instantanée associées aux différentes charges

Pour relever de la flèche instantanée, nous avons donc utilisé les 3 moyens de mesure suivants : le pied à coulisse numérique, le laser mètre et le papier millimétré.

Appareil de mesure (laser mètre)	DEXTER 30m +/-2mm réf. 82205583
Appareil de mesure (pied à coulisse numérique)	DEXTER 15 cm 1/100mm réf. 70114751
Papier millimétré	/

Tableau 16: Référence des différents appareils de mesure utilisés pour mesurer la flèche



Feuille millimétrée
(voir figure 59)



Pied à coulisse
(voir figure 58)



Laser mètre
(voir figure 57)

Figure 56: Photos illustrant le positionnement des appareils de mesure

La répétabilité des mesures avec les différents instruments nécessite une grande rigueur de mise en œuvre. C'est pourquoi les mesures ont été systématiquement prises au moins 3 fois pour en déduire une moyenne.

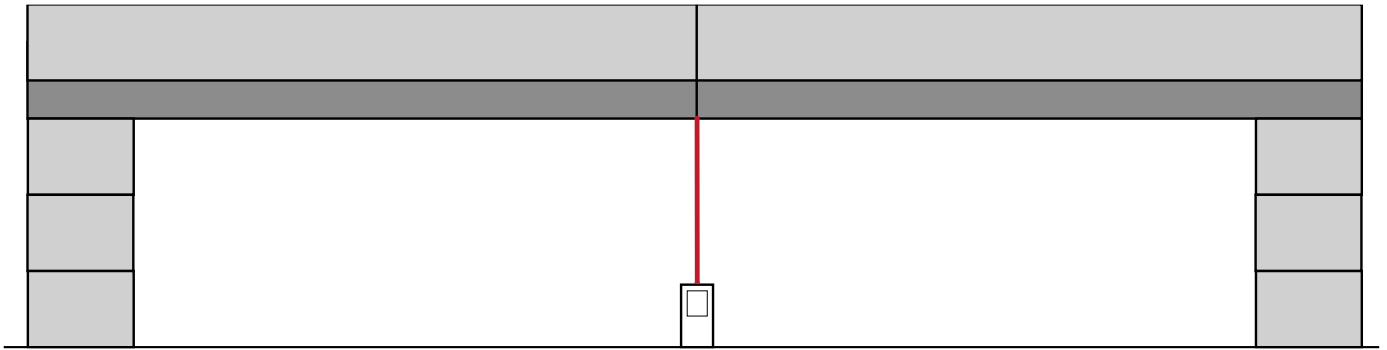


Figure 57: Mesure avec le laser mètre (trait rouge) de la distance mesurée

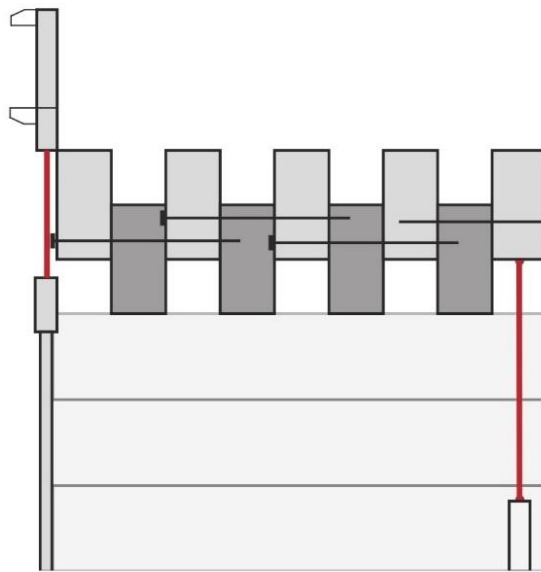


Figure 58: Mesure avec le pied à coulisse et le laser mètre (traits rouges) et la distance mesurée

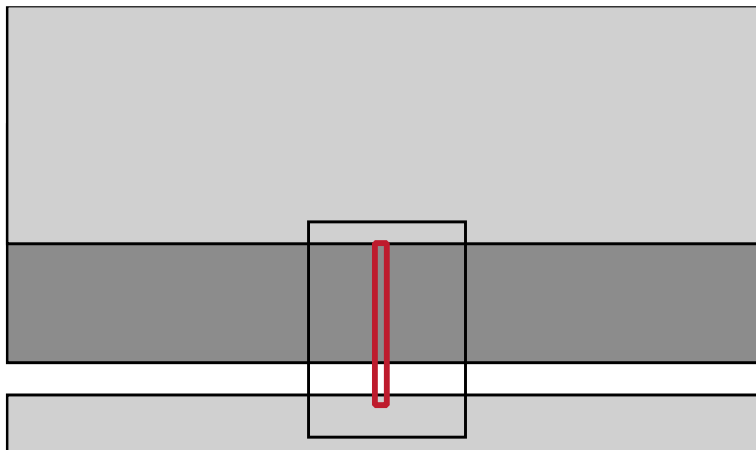


Figure 59: Mesure avec la feuille millimétrée avec un trou en rouge dans la feuille pour permettre de prendre la mesure par transparence de la planche de référence.

III.4.4. Chargement des dalles

Pour la première expérience, nous avons rempli des bacs avec du sable mouillé. Nous nous sommes vite rendu compte que qu'une fois remplis, ces bacs ne permettaient pas d'atteindre une charge suffisante pour atteindre les points de rupture des dalles.



Figure 60: Chargement du sable dans les caissons

Nous avons donc décidé pour les expériences suivantes (2 à 4) de charger avec des parpaings que l'on a posé progressivement sur la dalle : une charge plus lourde, plus facile de manutentionner et mettre en œuvre. Pour ce mode de chargement, nous avons pesé et noté le poids de chaque parpaing. Les poids variaient entre 17 et 20 kilogrammes.

Afin d'avoir une charge la plus possible répartie, nous avons chargé les parpaings de manière symétrique par rapport au centre de la dalle. Nous avons commencé par charger le centre de la dalle en laissant un espace suffisant pour permettre une flexion "non contrainte". Puis nous avons positionné les parpaings en les décalant vers l'extérieur (voir figure 62 ci-dessous). Nous avons ensuite complété au besoin la charge avec des fers disponibles dans l'atelier.

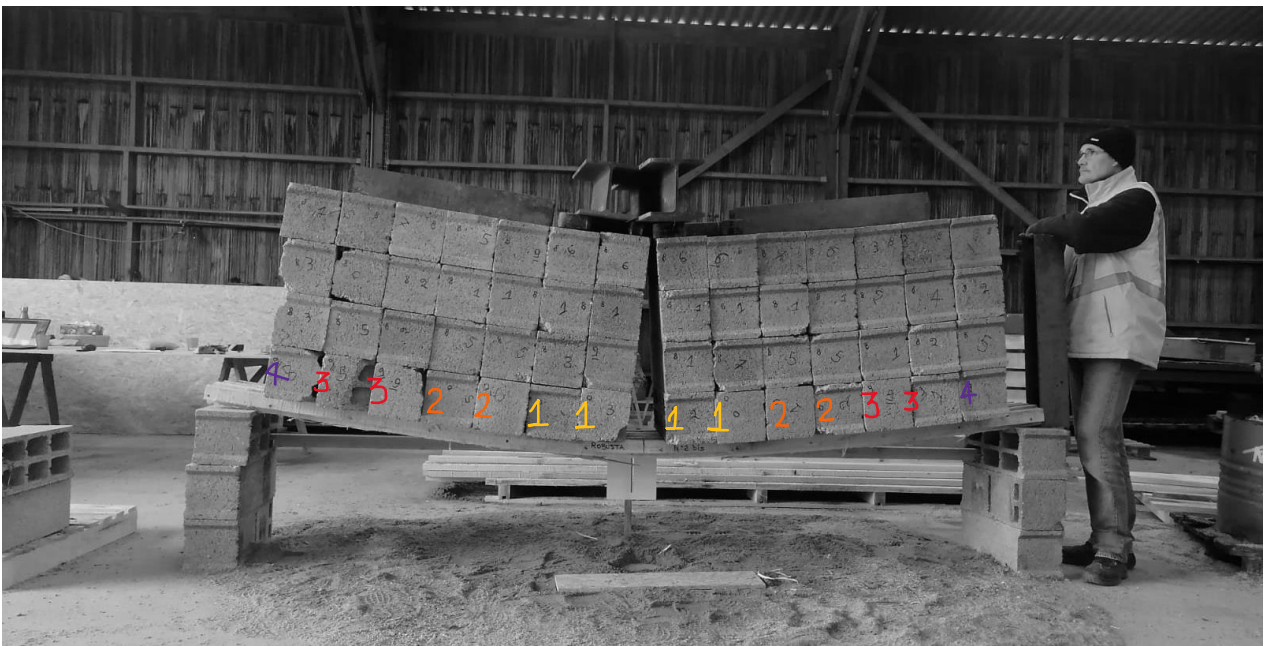


Figure 61: Pose progressive des parpaings rang par rang en suivant la numérotation mentionnée.

La flèche instantanée était relevée tous les 4 parpaings à l'aide du pied à coulisse. A chaque rangée finie, la flèche instantanée était mesurée avec le pied à coulisse, le laser mètre et une marque était tracée sur la feuille millimétrée.

La charge maximale que nous avons pu poser sur une dalle était de 1,5 tonnes (nombre maximum de parpaings disponible et hauteur de dépose des masses). Au-delà de ce poids, le chargement devenait instable et il était dangereux de continuer. A ce moment, la charge menaçait de tomber et nous n'avons pas pris le risque de mesurer la flèche instantanée. Nous avons donc continué à charger au mieux, pris en note des poids ajoutés et extrapolé les points de flèche jusqu'à rupture de la dalle et/ou chute du chargement.

Pour chaque expérience, nous avons rempli le même tableau de mesures (voir tableau 17 extrait d'une ligne de relevé ci-dessous). Nous avons alors noté :

- la flèche de référence avant qu'aucune charge soit mise en place
- la charge ajoutée et la flèche correspondante à chaque ajout
- la flèche finale, une fois la dalle déchargée, afin de noter la déformation finale de la dalle (domaine plastique)
- une observation spécifique si besoin (ex. craquement,)

Poids charge (kg)	Mesure 1 sol dalle laserètre	Mesure 2 sol dalle laserètre	Moyenne mesures laserètre	Lecture dalle papier millimétré	Mesure 1 sol dalle pied à coulisse	Mesure 2 sol dalle pied à coulisse	Mesure 3 sol dalle pied à coulisse	Moyenne mesures pied à coulisse	Flèche instantanée	Poids charge (kg)	Observations	Courbe de tendance	
												Flèche instantanée	Poids charge (kg)
0 (référé)	627	627	627	MARQUE 1	117.64	117.72	117.79	117.72	0.00	0	charge répartie sur la dalle	0.00	0.00

Tableau 17: Feuille de relevé de mesures des expériences

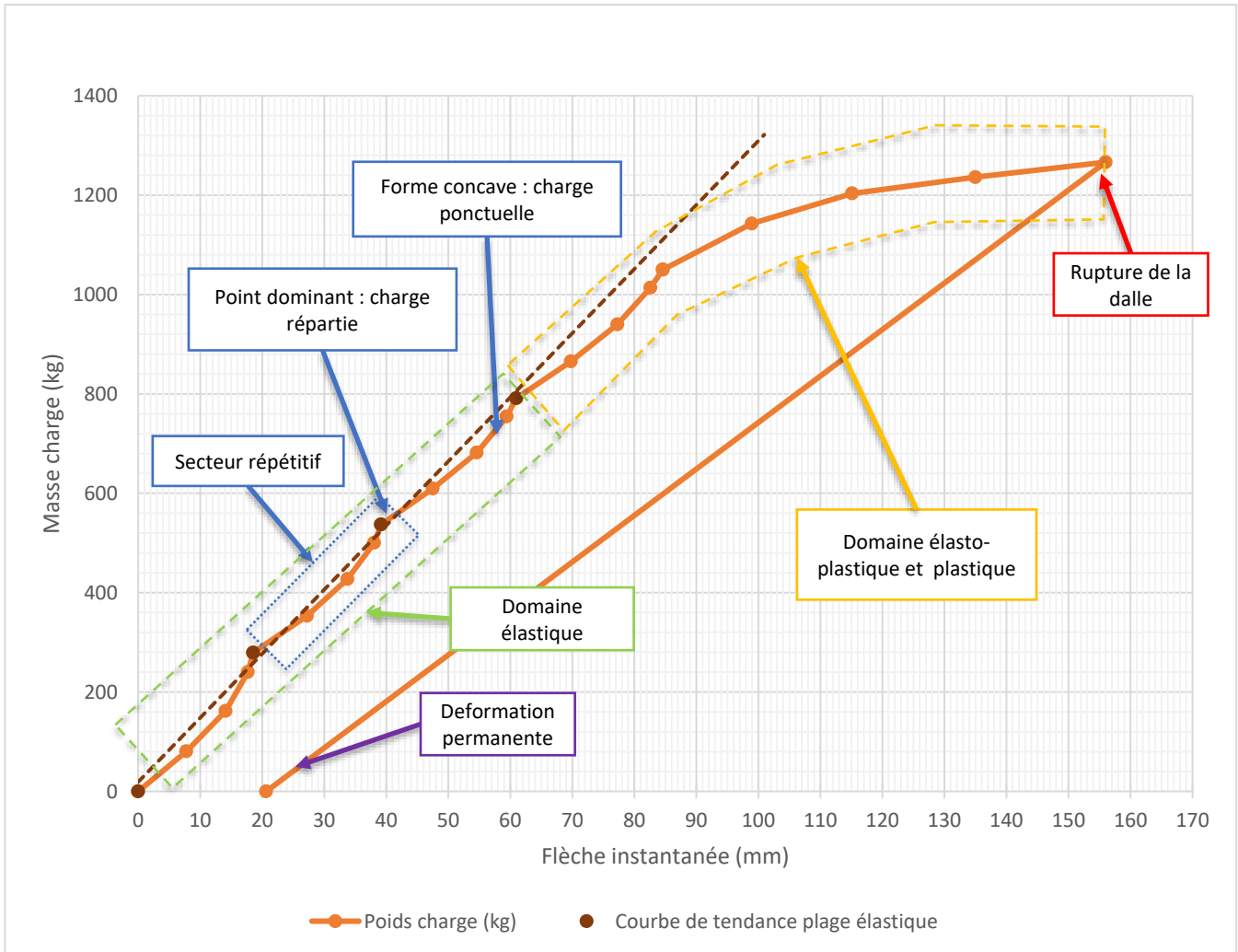
A posteriori et après analyse des résultats, la solution trouvée (chargement avec des parpaings tel que défini sur la figure 59) a modifié les courbes attendues : passage de charges ponctuelles à une charge répartie à chaque rangée de parpaings (voir paragraphe IV).

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. Résultat de chaque expérience

Les différentes expériences permettent de mesurer la résistance de chaque dalle à la charge. Suite aux différents relevés, nous avons tracé un graphique de résistance des dalles par expérience.

Les différents graphiques ont une forme similaire. Nous pouvons constater différents secteurs de la courbe.



Graphique 5: Graphique type montrant le diagramme des charge-déplacement

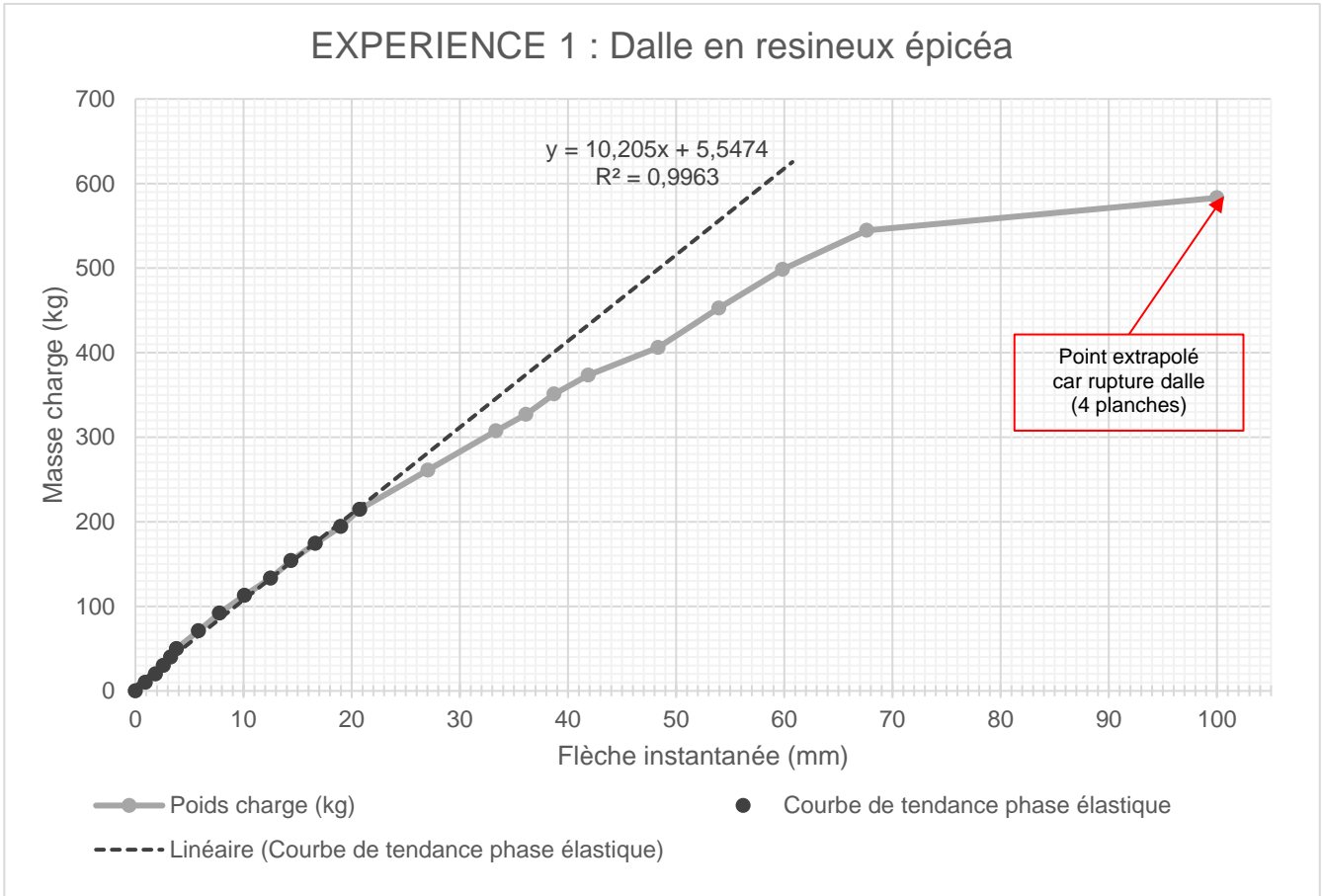
Les secteurs sont séparés par des points "dominants" reliés par des courbes en forme concave. Les points "dominants" représentent la charge répartie lorsqu'il y a une rangée entière de parpaings chargée sur la dalle. Les formes concaves représentent la charge ponctuelle avec une rangée incomplète de parpaings.

De plus, nous avons constaté que les premiers points "dominants" sont alignés, et représentent le domaine élastique de la dalle. Nous avons donc tracé les droites de tendance linéaire. Lorsque la courbe s'écarte de la droite de tendance, avec une forme polynomiale, il s'agit du domaine élastoplastique. Finalement, nous avons relevé le point de retour à l'axe des abscisses qui représente la déformation rémanente de la dalle à vide après chargement ce qui prouve qu'on est bien dans le domaine élastoplastique de la dalle.

Voici ci-après les résultats de chaque expérience.

IV.1.1. Expérimentation I : Dalle de référence

- Essence : Epicéa (résineux)
- Classification homogène des planches supérieures et inférieures en C24



Graphique 6: Diagramme des charge-déplacement de la dalle 1 en résineux

La dalle a cassé à 613kg (soit 583 kg de charge + 29.6kg le poids des caissons). La planche latérale s'est rompue et s'est dévissée, ce qui a provoqué la chute de la charge. Nous avons constaté plusieurs planches également fissurées (voir photo ci-dessous).

A noter sur la courbe ci-dessus une forme plus linéaire dans le domaine élastique (contrairement à ce qui a été préalablement énoncé) du fait d'un chargement du sable réparti dans les bacs posés sur la dalle.



Figure 62: Photo des différentes fissures suite à rupture de la dalle 1

Analyse de l'expérience 1 : dalle de référence en épicea

L'expérience 1 a été la 1ère expérience réalisée et donc un "terrain d'entrainement et d'ajustement" du protocole expérimentale. Nous avons ajusté :

- la méthode de mesure de la flèche :
 - o la précision de la mesure au laser mètre n'est pas suffisante pour évaluer une progression de la flèche à chaque chargement et nécessite une répétabilité parfaite du positionnement du laser mètre sous la dalle malgré un marquage au sol très précis
 - o la retranscription sur la feuille millimétrée à chaque chargement est inutile
 - o seule la mesure au pied à coulisse reste fiable car précise au 1/10e de mm (affichage au 1/100e)
- la méthode de chargement du sable "mouillé" permet une bonne répartition de la charge sur la surface de la dalle. Par contre, elle a ses limites car très rapidement avant la rupture de la dalle nous avons rempli complètement les bacs. L'équilibre du chargement était d'autant plus instable. C'est pourquoi, il a été décidé d'abandonner le chargement par l'intermédiaire des bacs chargés en sable et de le remplacer par un chargement progressif en parpaing.
- suite à l'arrachement de la planche latérale lors de sa rupture, nous avons remis en question la conception de la dalle et notamment le vissage de la 1ère planche de dalle par des vis de 50 mm (voir schéma ci-dessous). Nous avons décidé pour les autres dalles de changer ces 1ères vis de 50 mm par des vis de 100mm, afin de rigidifier l'ensemble de façon certaine.

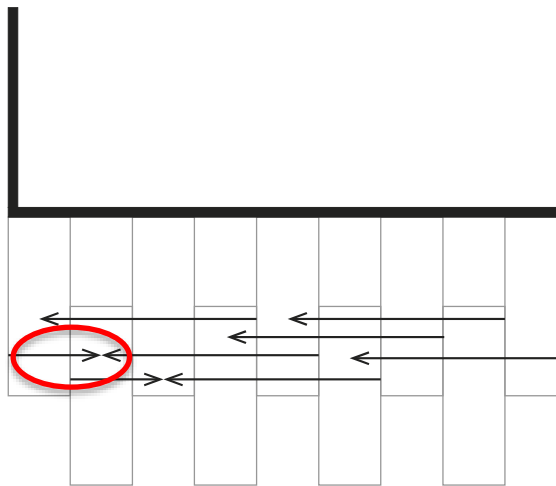


Figure 63: Schéma illustrant les vis qui se sont arrachées

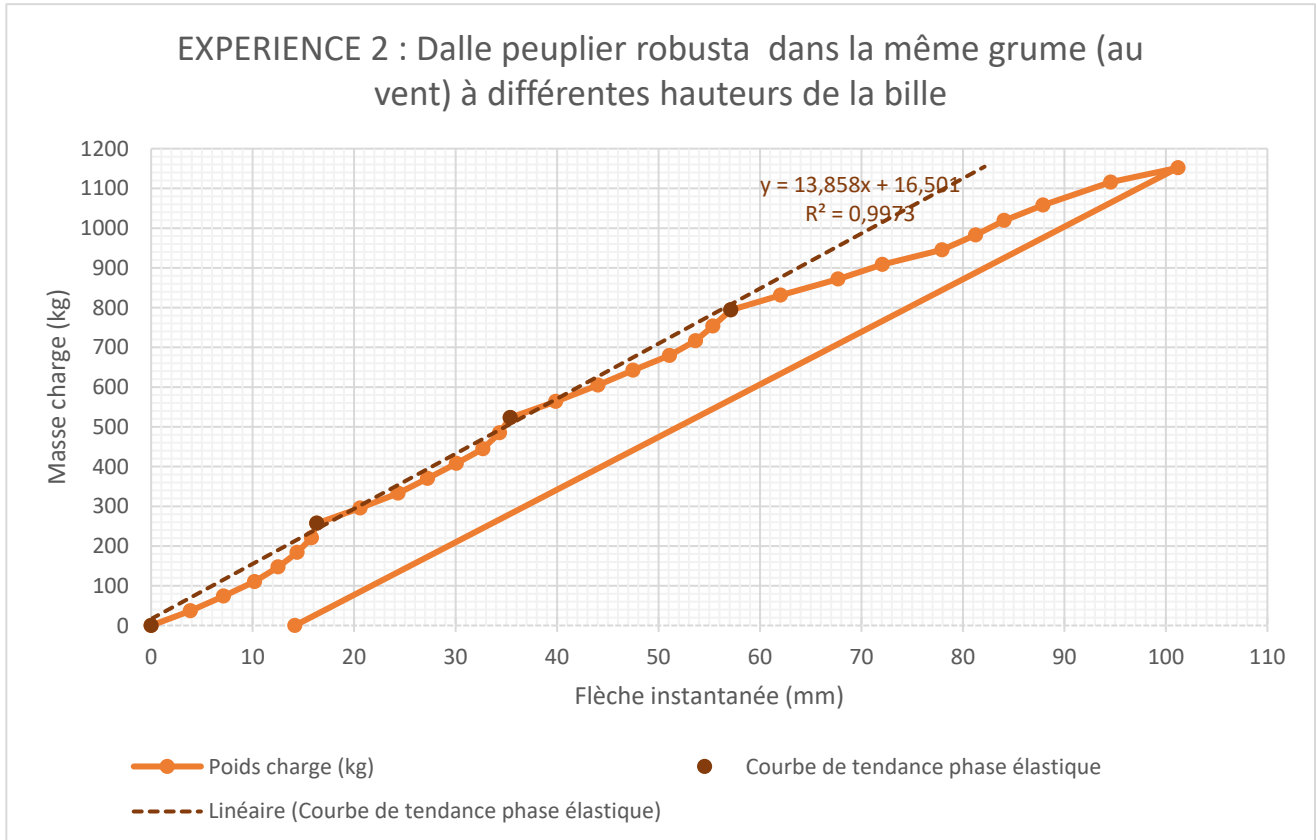
- il a fallu charger jusqu'à plus de 500kg pour atteindre la rupture de cette dalle. De ce fait il a été décidé d'augmenter l'incrément de charge de 10kg à 40kg dans les expériences suivantes.

Les résultats de l'expérience pour la dalle 1 sont les suivants :

- **flèche instantanée mesurée à l'ELS = 7,4mm**. Cette flèche correspond à une charge de sable de 81,5kg (correspondant à 150kg/m² soit 121,5kg pour la surface de la dalle de 0,81m² auquel est retiré le poids des caissons de 29,6 kg) déduit à partir de l'équation de la courbe de tendance du domaine élastique ($y = 10,205x + 5,5474$)
- **charge à la rupture > 613kg**. Il est délicat de donner une valeur exacte au-delà la dalle a rompu et la charge est tombée
- **limite entre domaine élastique et domaine élastoplastique = 249.6 kg (=220kg + 29.6kg)** pour une flèche de 21 mm
- **flèche "rémanente" = non mesurée suite à la casse de la dalle** (mesurée une fois la dalle déchargée)

IV.1.2. Expérimentation 2 : Dalle de peuplier Robusta orienté au vent dominant

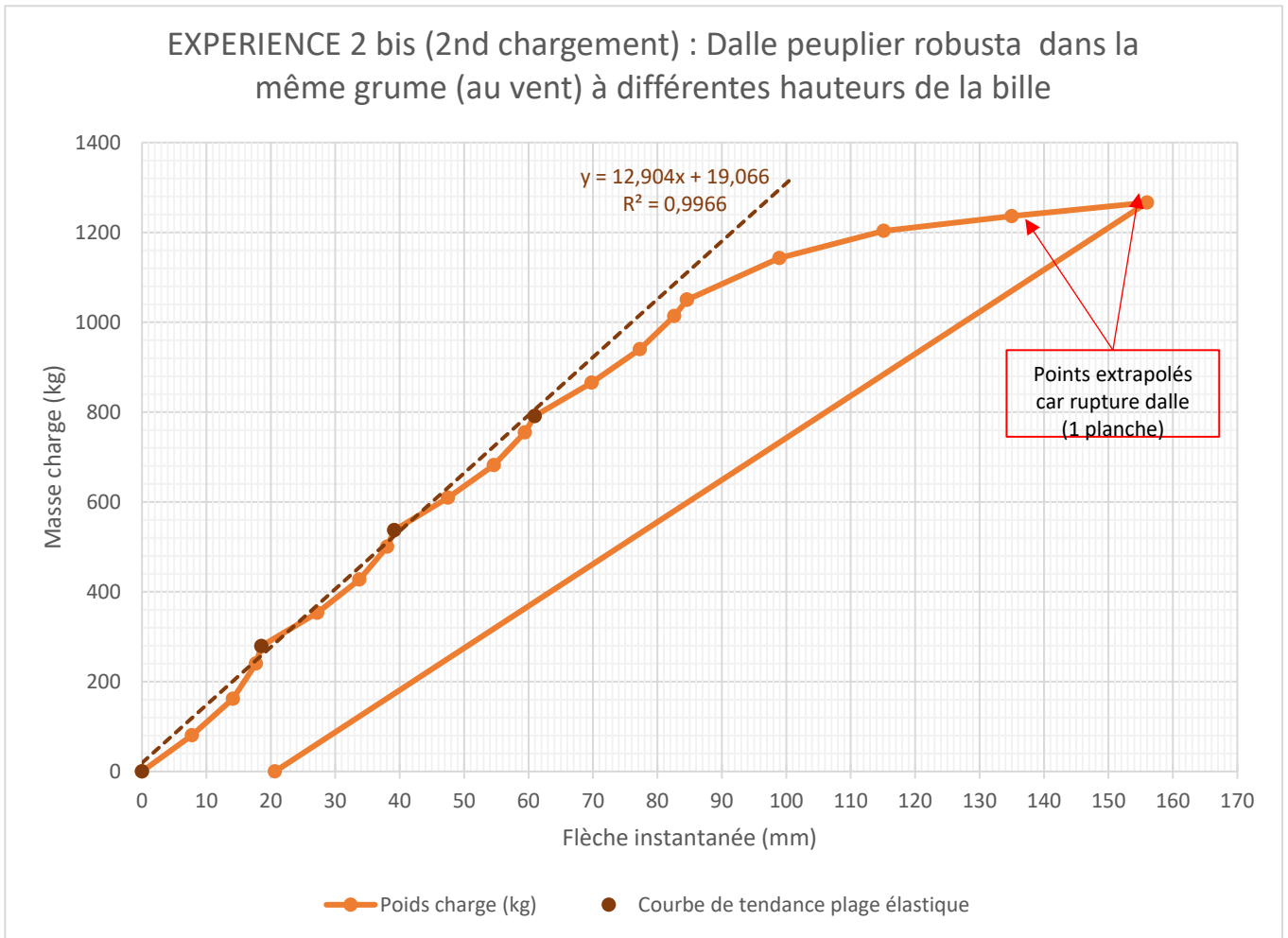
- Objectif : Comparaison d'une dalle en peuplier à une dalle en résineux
- Essence : Peuplier
- Cultivar : Robusta
- Classification non certifiée par le scieur (estimée par expérience à C30)
- Bille de pied et surbille de la grume de l'arbre
- Partie de l'arbre orientée au vent dominant



Graphique 7: Diagramme des charge-déplacement de la dalle 2 en peuplier cultivar Robusta dans la même grume au vent (charge tombée avant rupture)

Nous avons chargé la dalle jusqu'à 1152 kg (graphique 2), l'instabilité de la charge a causé sa chute sans que la dalle se casse.

Dans un deuxième temps, nous avons rechargé la dalle (graphique 2bis), la dalle a finalement cassé à 1266 kg.



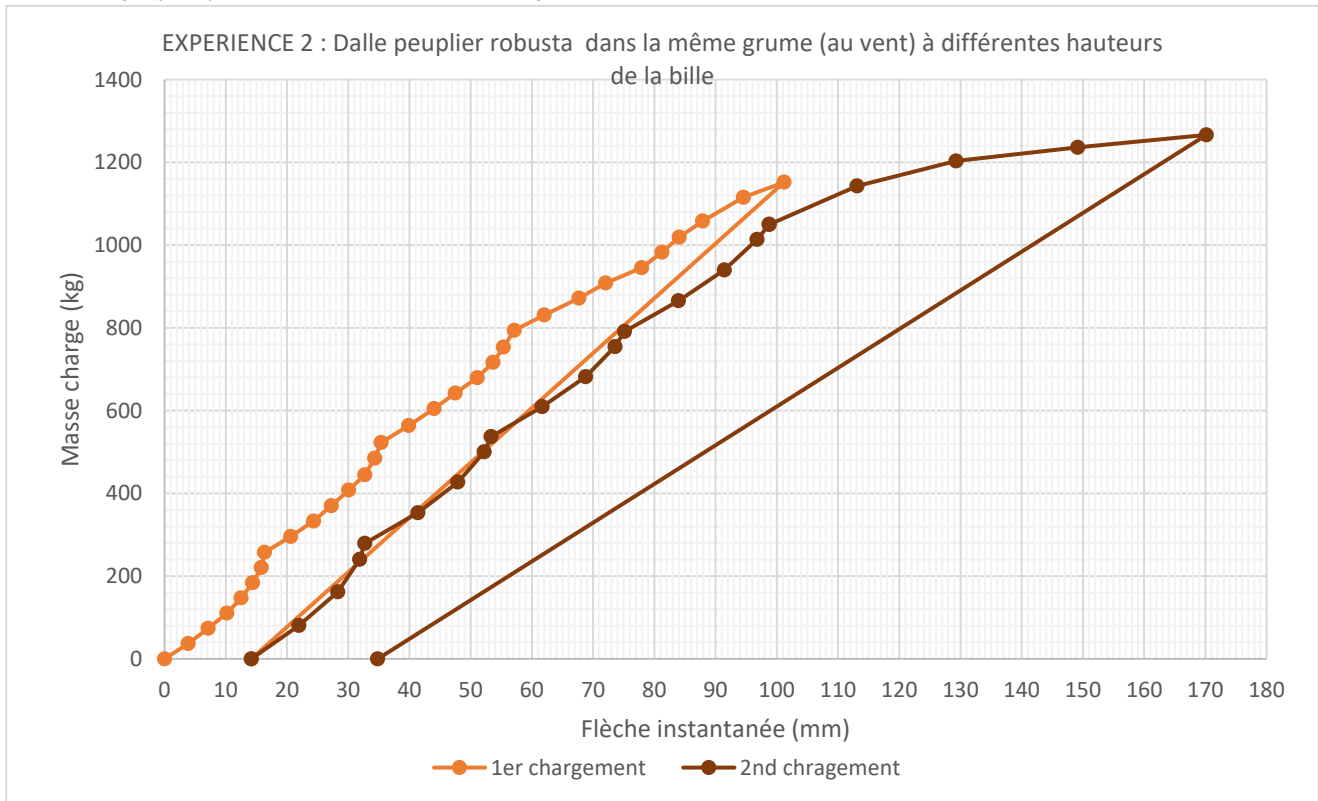
Graphique 8: Diagramme des charge-déplacement de la dalle 2 bis en peuplier cultivar Robusta dans la même grume au vent (avec une rupture)

A 1236 kg, nous avons entendu un gros craquement, puis à 1266kg la charge est tombée. La dalle a eu qu'une planche fissurée (voir photo).



Figure 64: Photo des différentes fissures suite à rupture de la dalle 2 bis

Voici un graphique cumulant les deux chargements successifs de la même dalle.



Graphique 9: Diagramme des charge-déplacement prenant en compte la dalle 2 et la dalle 2 bis

Analyse de l'expérience 2 : dalle de peuplier Robusta orienté au vent dominant

L'expérience 2 a été réalisée en 2 étapes suite à l'effondrement de la charge avant rupture de la 1ère étape. Les constats de cette expérience sont les suivants :

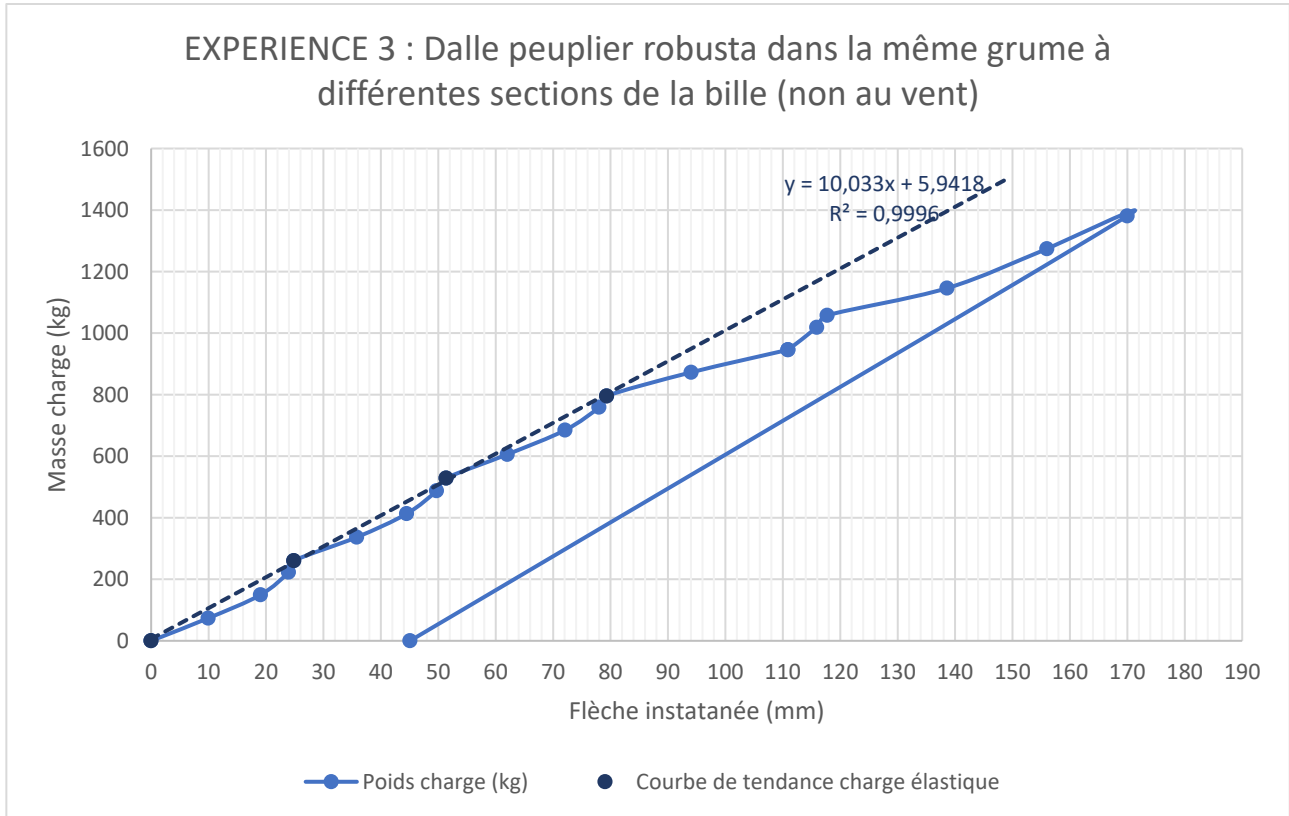
- les courbes obtenues ont une forme différente de celle de l'expérience n°1. Le changement de méthode de chargement (4 parpaings par 4 parpaings) fait que la charge sur la dalle n'est pas répartie tant qu'une rangée de parpaing n'est pas complète. C'est pourquoi nous avons extrapolé la droite de tendance du domaine élastique à partir des points correspondant à un rang complet de parpaings.
- Suite au 1er chargement, nous avons remis en place la dalle. La mesure de la flèche à vide "rémanente" (14mm) a démontré que nous avons dépassé le domaine élastique de la dalle puisque la flèche à vide après chargement n'est pas nulle.
- Que ce soit pour le 1er chargement ou le second chargement, la limite entre domaine élastique et domaine élastoplastique reste identique à 800kg pour une flèche d'environ de 60mm. Par contre les droites de tendance du domaine élastique sont différentes entre les 2 chargements. Cela s'explique par le fait que l'on a dépassé le domaine élastique lors du 1er chargement.
- la flèche à vide "rémanente" après 2 chargements est de 34mm.

Les résultats de l'expérience pour la dalle 2 sont les suivants :

- **flèche instantanée mesurée à l'ELS = 7,6mm.** Cette flèche correspond à une charge de sable de 121,5kg (correspondant à 150kg/m² soit 121,5kg pour la surface de la dalle de 0,81m²) déduit à partir de l'équation de la courbe de tendance du domaine élastique ($y = 13,858x + 16,501$)
- **charge à la rupture > 1266kg.** Il est délicat de donner une valeur exacte au-delà car la dalle a rompu et la charge est tombée (déduit de la courbe du 2nd chargement)
- **limite entre domaine élastique et domaine élastoplastique = 800kg** pour une flèche de 56 mm (déduit de la courbe du 1er chargement)
- **flèche "rémanente" = 20 mm** (mesurée une fois la dalle déchargée)

IV.1.3. Expérimentation 3 : Dalle de peuplier Robusta non orienté au vent dominant

- Objectif : Etudier l'impact de l'hétérogénéité au niveau de la section au sein d'une même grume de l'arbre
- Essence : peuplier
- Cultivar : Robusta
- Classification non certifiée par le scieur (estimée par expérience à C24)
- Surbille de la grume de l'arbre
- Partie de la bille orientée non au vent



Graphique 10: Diagramme des charge-déplacement de la dalle 3 bis en peuplier cultivar Robusta dans la même grume non au vent

Un gros bruit de craquement s'est produit à 1146 kg. A 1380kg, la charge était trop instable, nous avons donc été obligé d'arrêter le chargement. La dalle a une fissure qu'à un endroit.



Figure 65: Photo des différentes fissures suite à rupture de la dalle 3

Analyse de l'expérience 3 : Dalle de peuplier Robusta non orienté au vent dominant

L'expérience 3 s'est déroulée en une seule étape jusqu'à rupture de la dalle. Les constats de cette expérience sont les suivants :

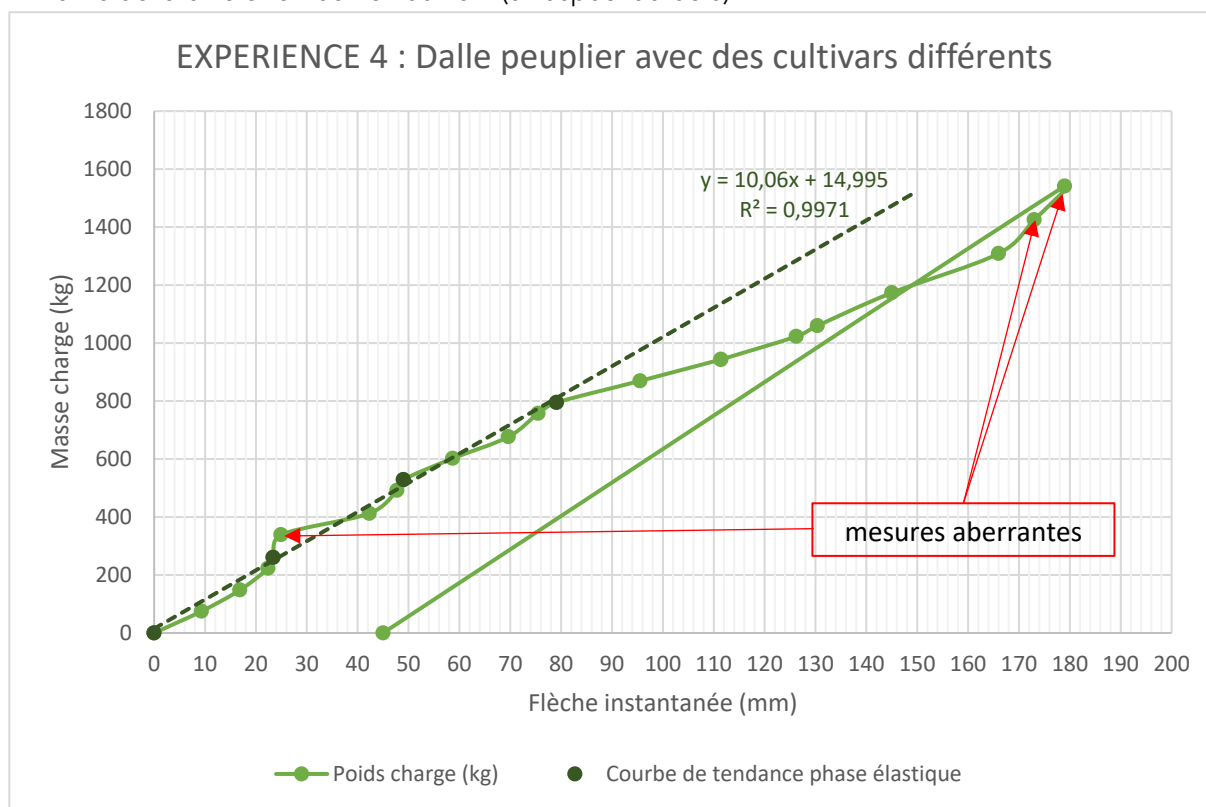
- Même constat sur la forme des courbes obtenues différente de celle de l'expérience n°1.
- Malgré un 1er craquement entendu à une charge de 1146kg, la dalle n'a pas rompu. Le chargement de la dalle a été réalisé jusqu'à 1380kg sans rupture franche de la dalle. Les conditions de chargement était trop délicate, alors il a été décidé d'interrompre l'expérience. Nous avons constaté également un affaissement lent de la dalle lié à un glissement entre les parpaings.
- la flèche à vide "rémanente" après chargement est de 45mm.

Les résultats de l'expérience pour la dalle 2 sont les suivants :

- **flèche instantanée mesurée à l'ELS = 11,5 mm.** Cette flèche correspond à une charge de sable de 121,5kg (correspondant à 150kg/m² soit 121,5kg pour la surface de la dalle de 0,81m²) déduit à partir de l'équation de la courbe de tendance du domaine élastique ($y = 10,033x + 5,9418$)
- **charge à la rupture > 1380 kg.** Il est délicat de donner une valeur exacte au-delà car la dalle n'a pas rompu et l'expérience a été interrompue.
- **limite entre domaine élastique et domaine élastoplastique = 800 kg** pour une flèche de 80 mm (déduit de la courbe)
- **flèche "rémanente" = 45 mm** (mesurée une fois la dalle déchargée)

IV.1.4. Expérimentation 4 : dalle de peuplier avec plusieurs cultivars

- Objectif : Etudier l'impact de l'hétérogénéité des cultivars de peuplier
- Essence : peuplier
- Cultivars : Beaupré et I214
- Classification non certifiée par le scieur (estimée par expérience inférieure à C18)
- Bille de pied et surbille de la grume des arbres
- Partie de la bille orientée non au vent (à l'aspect du bois)



Graphique 11 : Diagramme des charge-déplacement de la dalle 4 en peuplier avec différents types de cultivar

Seule dalle où nous n'avons pas entendu de gros craquement. L'instabilité de la charge nous a empêché de continuer à charger la dalle. Nous avons laissé la charge toute la nuit et le lendemain matin la charge est tombé à 1542kg. La dalle était fissurée à plusieurs endroits.

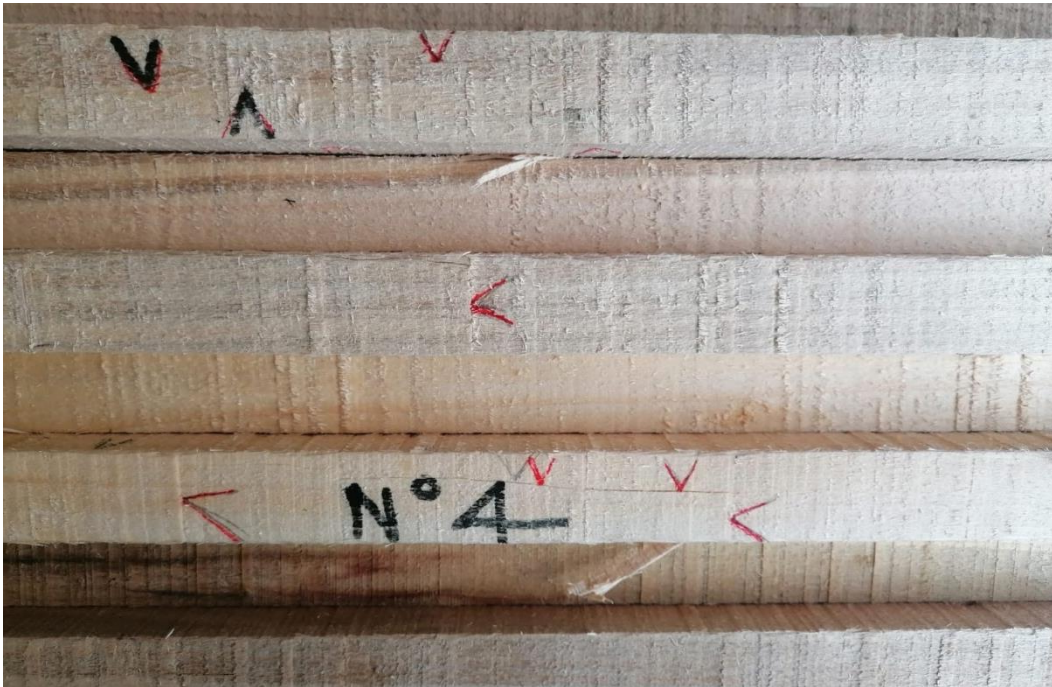


Figure 66: Photo des différentes fissures suite à rupture de la dalle 4

Analyse de l'expérience 4 : dalle de peuplier avec plusieurs cultivars

L'expérience 4 s'est déroulée en une seule étape jusqu'à rupture de la dalle. Les constats de cette expérience sont les suivants :

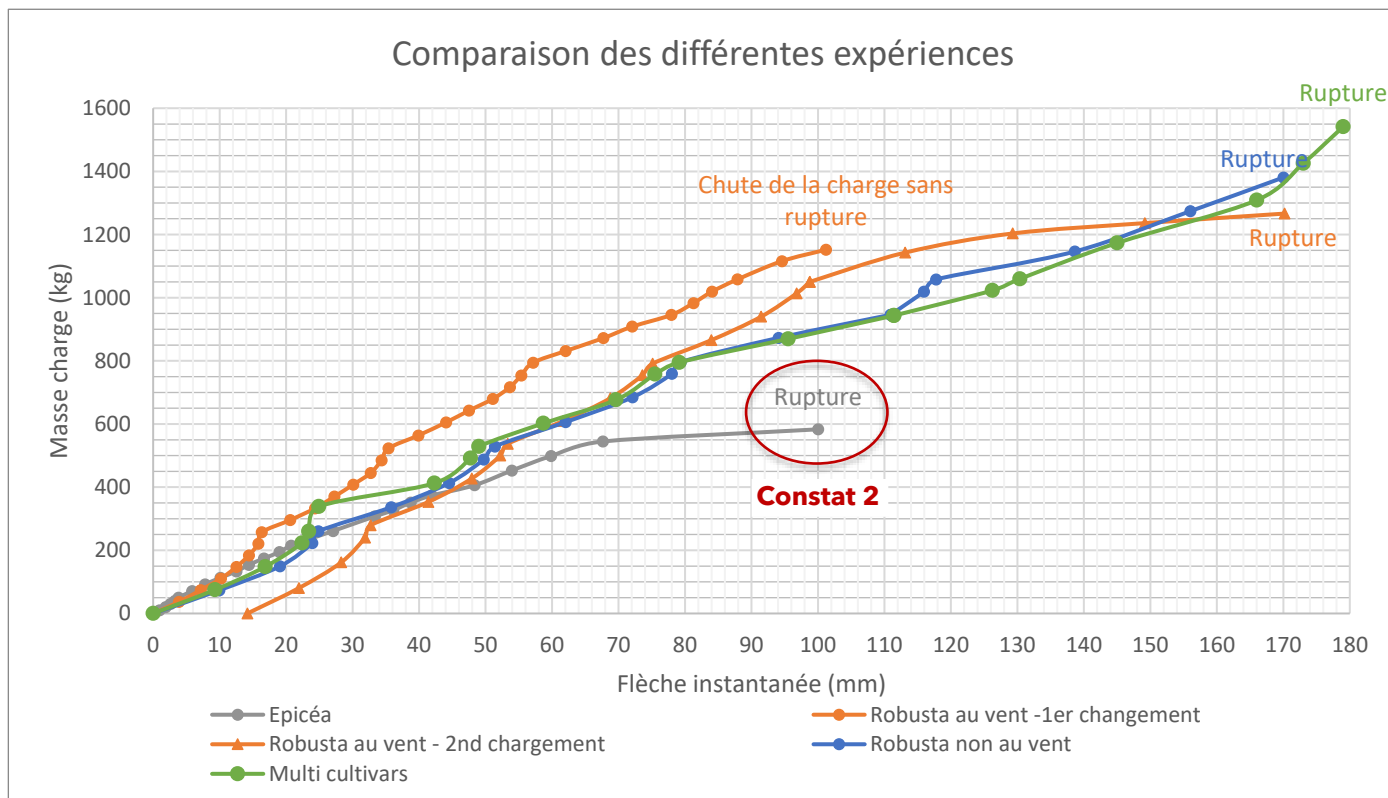
- Même constat sur la forme des courbes obtenues différente de celle de l'expérience n°1.
- Le chargement de la dalle a été réalisé jusqu'à 1542kg sans rupture franche de la dalle (et sans craquement entendu). Les conditions de chargement était également trop délicate, alors il a été décidé d'interrompre l'expérience et de laisser la dalle chargée pendant toute une nuit. Le même constat correspondant à un affaissement lent de la dalle lié à un glissement relatif entre les parpaings a été remarqué.
- Les 2 dernières mesures s'avèrent aberrantes : elle confirme le point ci-dessus et la difficulté de glissement entre parpaing lorsque la flèche s'accroît
- la flèche à vide "rémanente" après chargement est de 45mm.

Les résultats de l'expérience pour la dalle 4 sont les suivants :

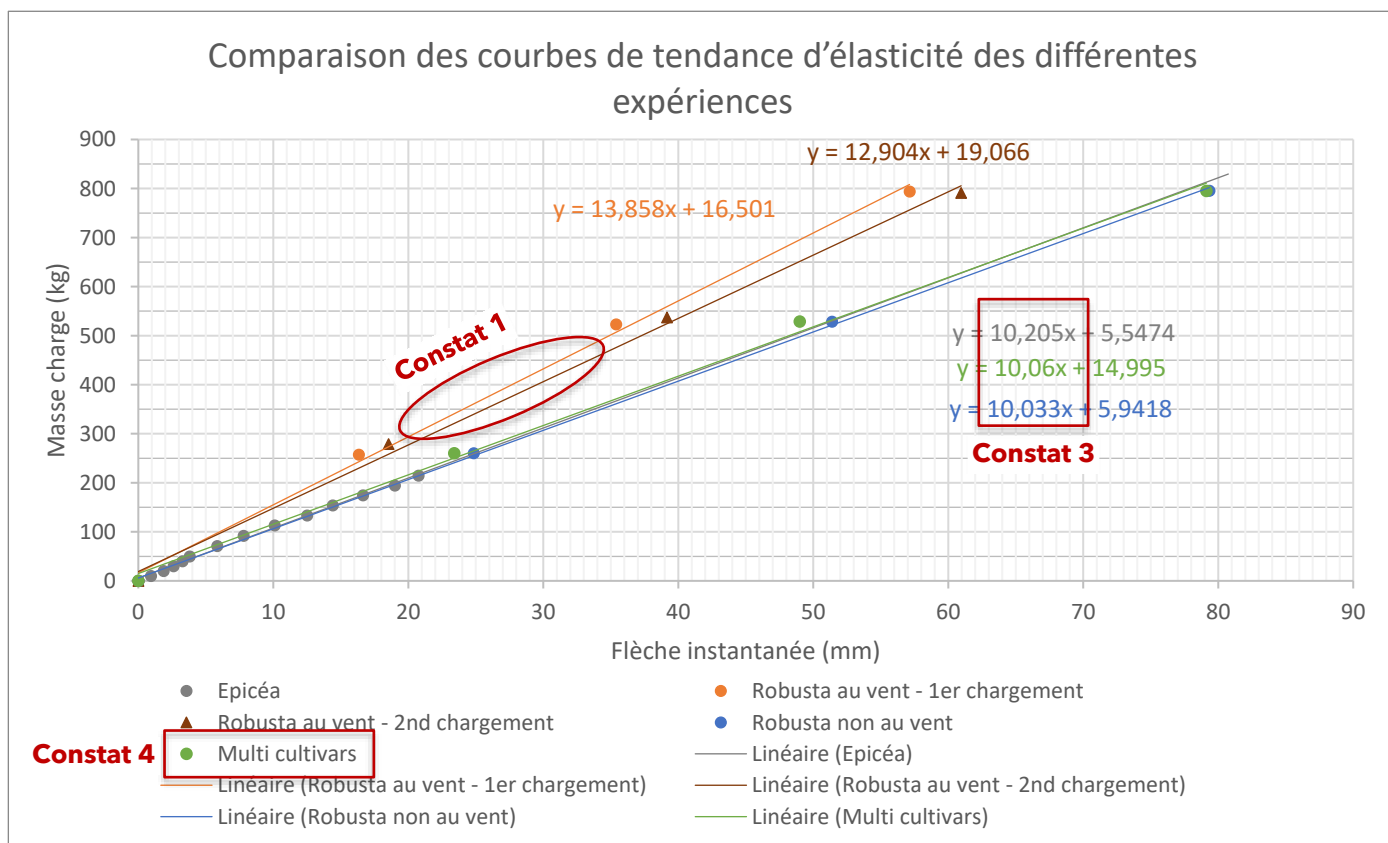
- **flèche instantanée mesurée à l'ELS = 10,6 mm.** Cette flèche correspond à une charge de sable de 121,5kg (correspondant à 150kg/m² soit 121,5kg pour la surface de la dalle de 0,81m²) déduit à partir de l'équation de la courbe de tendance du domaine élastique ($y = 10,06x + 14,995$)
- **charge à la rupture > 1542 kg.** Il est délicat de donner une valeur exacte au-delà car la dalle n'a pas immédiatement rompu et l'expérience a été interrompue.
- **limite entre domaine élastique et domaine élastoplastique = 800 kg** pour une flèche de 80 mm (déduit de la courbe)
- **flèche "rémanente" = 45 mm** (mesurée une fois la dalle déchargée)

IV.2. Comparaison et analyse des différentes expériences

Nous avons établi à des fins de comparaisons une superposition des courbes et des droites de tendance (voir graphiques ci-dessous).



Graphique 12: Diagramme des charge-déplacement pour la comparaison de toutes les courbes de chaque dalle



Graphique 13: Diagramme des charge-déplacement pour la comparaison de toutes les courbes de tendance de chaque dalle

La superposition des courbes nous amène aux constats suivants :

1. Sur le domaine élastique (voir graphique 13), la droite de tendance de l'expérience 2 (Robusta au vent 1er chargement) se distingue des droites de tendance des 3 autres expériences. A charge égale, plus ces droites sont verticales, plus la déformation est faible, donc plus ton plancher est raide. Les bois exposés au vent sont donc plus raides qu'ailleurs dans la grume. Ce point confirme le classement à priori C30 que nous a donné par retour d'expérience Hugues Nobécourt au regard des classements C24 des planches des autres dalles.
2. Sur le graphique 12, le point de rupture de la dalle 1 en épicéa à 583kg reste surprenant car largement inférieur aux points de rupture des dalles en peuplier (> 1280kg). Malgré un classement en C24 de l'épicéa, la dalle 1 a rompu sous une charge moindre. Il est donc difficile de considérer la dalle 1 comme dalle de référence et de la comparer aux autres dalles en peuplier.
3. Les droites de tendance des expériences 1, 3 et 4 ont toutes les 3 une pente très similaire (entre 10,0 à 10,2). Ce résultat paraît logique au regard du classement C24 annoncé par le scieur pour l'épicéa et du robusta non au vent.
4. La tenue de la dalle 4 (dalle multi cultivars) est également surprenant et au-delà de toute attente. En effet, elle est comparable à celle des dalles 2 et 3 en robusta (superposition des droites de tendance de domaine élastique) alors que le scieur nous avait donné un classement à priori à C18 au mieux pour les 2 cultivars I214 et Beaupré.

Si on reprend l'étude de "Qualité du bois des nouveaux cultivars de peuplier" [45] et [46], voici les données sur les cultivars I214 et Beaupré en comparaison avec le robusta (voir tableau 17 ci-dessous). Ce constat confirme-t-il que le schéma constructif de la dalle assemble décalée clouée "gomme" les différentes hétérogénéités entre cultivars ?

CARACTERISTIQUES MECANQUES DES SCIAGES				Classement structure (norme EN 338)			
Arrachement au clouage (norme EN ISO 12 777-3)				%	Robusta	Réf. I 214	Réf. Robusta
	Robusta	Réf. I 214	Réf. Robusta	C24	100	0	100
Fmax (N)	3 462	1 800	3 462	C18	0	0	0
				Hors-classe	0	100	0
Moyennes des caractéristiques mécaniques des sciages							
Hauteur grume	Largeur de cernes (mm)	Proportion de planches sans nœud		MOE	MOR	Masse volumique à 12 % (kg/m³)	N : Newton. MOE : Module d'élasticité statique. MOR : Contrainte de rupture en flexion.
		sur la face	sur la rive				
bas grume	12	80 %	100 %	11 500	64,9	430	
mi-grume	12	14 %	61 %	11 200	46,3	451	
haut grume	12	30 %	67 %	12 400	53,9	468	
moyenne	12	50 %	81 %	11 600	57,1	445	

CARACTERISTIQUES MECANQUES DES SCIAGES				Potentiel structure (norme EN 338)			
Arrachement au clouage (norme EN ISO 12 777-3)				%	Beaupré	Réf. I 214	Réf. Robusta
	Beaupré	Réf. I 214	Réf. Robusta	C24	14	0	100
Fmax (N)	1 827	1 800	3 462	C18	59	0	0
				Hors-classe	27	100	0
Moyennes des caractéristiques mécaniques des sciages							
Hauteur grume	Largeur de cernes (mm)	Proportion de planches sans nœud		MOE (MPa)	MOR (MPa)	Masse volumique à 12 % (kg/m³)	N : Newton. MOE : Module d'élasticité statique. MOR : Contrainte de rupture en flexion.
		sur la face	sur la rive				
bas grume	17	61 %	88 %	8 200	52,0	374	
mi-grume	16	32 %	70 %	9 400	46,8	408	
haut grume	16	25 %	50 %	9 600	44,4	430	
moyenne	16	44 %	73 %	8 900	48,6	398	

CARACTERISTIQUES MECANQUES DES SCIAGES				Potentiel structure (norme EN 338)			
Arrachement au clouage (norme EN ISO 12 777-3)				%	I 214	Réf. I 214	Réf. Robusta
	I 214	Réf. I 214	Réf. Robusta	C24	0	0	100
Fmax (N)	1 800	1 800	3 462	C18	0	0	0
				Hors-classe	100	100	0
Moyennes des caractéristiques mécaniques des sciages							
Hauteur grume	Largeur de cernes (mm)	Proportion de planches sans nœud		MOE (MPa)	MOR (MPa)	Masse volumique à 12 % (kg/m³)	N : Newton. MOE : Module d'élasticité statique. MOR : Contrainte de rupture en flexion.
		sur la face	sur la rive				
bas grume	17	68 %	89 %	6 600	46,5	334	
mi-grume	16	26 %	63 %	7 000	37,7	351	
haut grume	16	43 %	74 %	7 200	40,8	360	
moyenne	16	46 %	76 %	6 900	41,9	347	

Tableau 18 : Données des caractéristiques mécaniques du peuplier en fonction des différents cultivars [45] et [46]

Le tableau suivant donne la comparaison des résultats des différentes expériences.

	Flèche instantanée mesurée à l'ELS (mm)	Taux de travail en % (cf. nota)	Flèche rémanente mesurée (mm)	Charge à la rupture (kg)	Limite entre domaine élastique et domaine élastoplastique	Classement à priori
Dalle 1	7,4	74%	Non mesurée	613	220kg --> 21mm	C24
Dalle 2	7,6	76%	20	1266	800 kg --> 56mm	C30
Dalle 3	11,5	115%	45	1380	800 kg --> 80mm	C24
Dalle 4	10,6	106%	45	1542	800 kg --> 80mm	< C18

Tableau 19: Données issues des expériences réalisées

Nota: comparaison de la flèche instantanée à la valeur limite de $L/300$ suivant l'Eurocode 5 [50] (où L est la portée)

Ce tableau met en avant les points suivants :

- à l'ELS, les flèches instantanées des dalles 1 et 2 sont presque identiques. On en peut en déduire que :
 - o les modules d'Young de ces 2 bois (épicéa et robusta au vent) sont similaires, puisque la charge répartie, la portée et l'inertie des 2 dalles sont les mêmes.
 - o les modules d'Young des autres cultivars (robusta non au vent, I214 et Beaupré) sont inférieurs
- pour les expériences 2, 3 et 4 on a une même limite de 800kg entre domaine élastique et domaine élastoplastique. Ce résultat est cohérent pour le robusta (dalle 2 et dalle 3) prise dans le même arbre. Par contre, il est surprenant pour la dalle 4 multi-cultivars.
- La flèche rémanente de la dalle 2 est plus faible que celles des dalles 3 et 4. Ce résultat est cohérent. Ce point confirme le meilleur classement à priori C30 des planches de la dalle 2 que nous a donné par retour d'expérience Hugues Nobécourt au regard des classements C24 des planches des autres dalles.

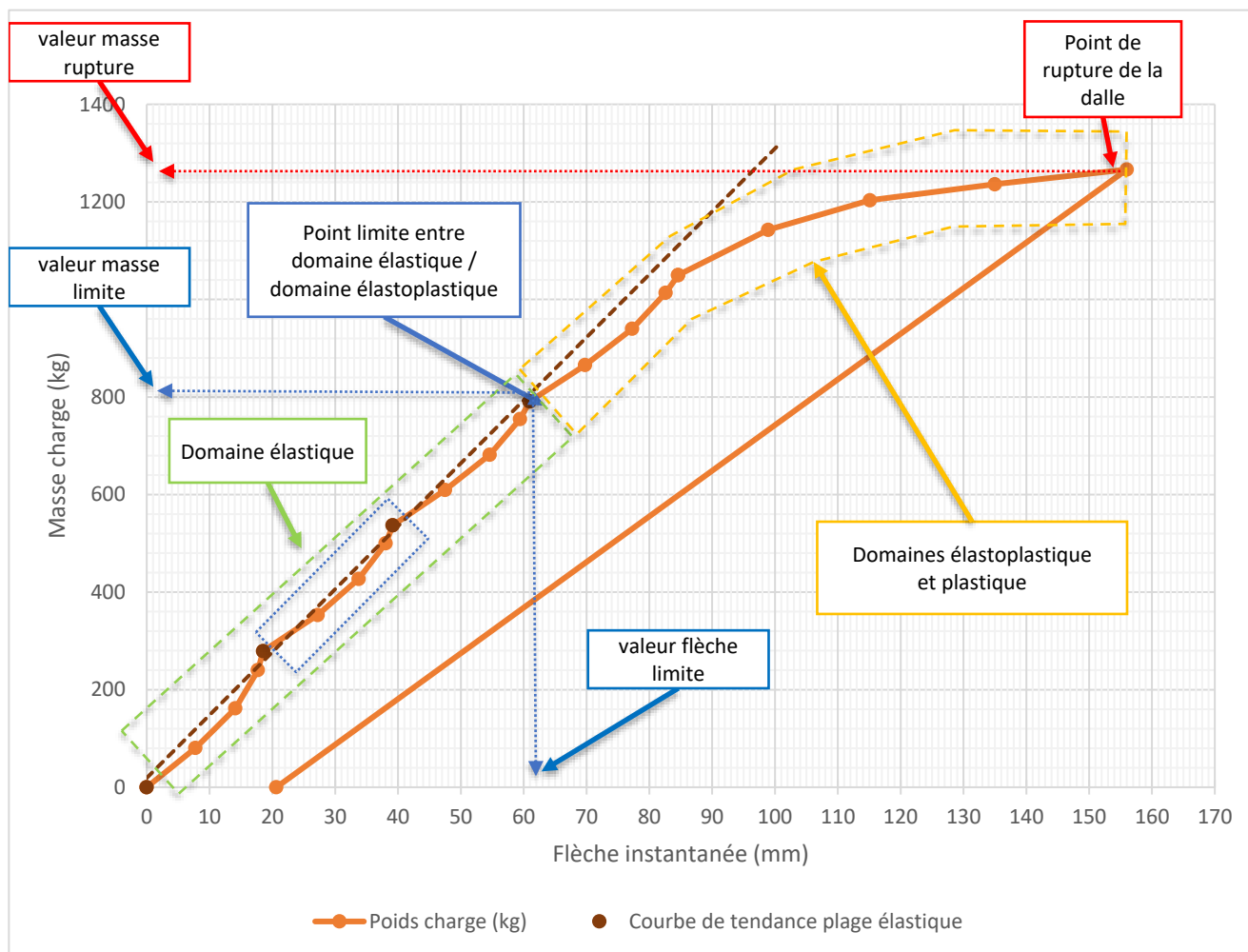
IV.3. Analyse des résultats d'expérimentations et déduction par calcul des caractéristiques mécaniques de chaque dalle

Les différentes expériences et mesures réalisées permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques de chaque dalle et d'en déduire par calcul les principales données suivantes :

- Rigidité en flexion de la dalle (EI)
- Module d'Young moyen des bois constituant la dalle (E)
- Contrainte de rupture $\sigma_{rupture}$
- Contrainte élastique $\sigma_{élastique}$

Ces données sont calculées à partir des 2 points caractéristiques sur les graphiques de chaque dalle (voir exemple de graphique 14 ci-après) :

- Limite entre domaine élastique et domaine élastoplastique
- Rupture de la dalle



Graphique 14: Points caractéristiques sur le diagramme des charge-déplacement

IV.3.1. Calcul de la rigidité en flexion et du module d'Young de la dalle (voir feuille de calculs en annexe II.4.1)

En reprenant la formule de la flèche instantanée à l'ELS, on déduit la rigidité en flexion de la dalle (EI)_{dalle} et le module d'Young (E_{dalle}) en considérant le point limite entre le domaine élastique et le domaine élastoplastique :

$$\text{Rigidité en flexion dalle} = (EI)_{\text{dalle}} = 5 \times \text{Prep limite} \times L_{\text{portée}}^4 / 384 \times f_i \text{ limite}$$

$$\text{Module Young} = E_{\text{dalle}} = (EI)_{\text{dalle}} / I_{\text{dalle}}$$

Prep limite = masse relevée à la limite élastique/plastique * pesanteur / Lportée

Lportée = portée entre appuis

f_i limite = flèche instantanée relevée à la limite élastique/plastique

I_{dalle} = Inertie dalle

Le tableau ci-dessous reprend pour chaque dalle, les relevés sur les graphiques et les résultats de calculs de la rigidité et du module d'Young.

Calculs pratiques de la rigidité en flexion et du module d'Young dalle	Unité	Dalle 1 épicéa	Dalle 2 robusta au vent	Dalle 3 robusta non au vent	Dalle 4 multi cultivars
Fi limite	mm	21	56,5	78	79
Masse relevée à la limite élastique/plastique	Kg	249,6	800	800	800
Charge Répartie = Prep limite	kN/m ²	832,0	2666,7	2666,7	2666,7
Rigidité en flexion dalle = (EI)dalle	N.mm²	41786	49779	36058	35601
Module Young dalle = Edalle	MPa	8490	10114	7326	7233

Tableau 20: Résultats des calculs pratiques de la raideur et du module d'Young dalle

Ce tableau nous amène aux constats suivants :

1. La rigidité en flexion des dalles 1 et 2 est bien plus importante que celles des dalles 3 et 4. Ce constat est cohérent avec l'analyse des flèches instantanées mesurées à l'ELS (cf. tableau 15 paragraphe IV.2)
2. Le module d'Young de la dalle 2 est supérieur à celui des autres dalles. Le module d'Young est bien l'image de la pente des droites de tendance dans le domaine élastique pour chaque dalle (cf. graphique 13 paragraphe IV.2) Ce constat confirme le classement à priori C30 de l'essence Robusta au vent que nous a donné par retour d'expérience Hugues Nobécourt au regard des classements C24 des planches des autres dalles.
3. le module d'Young de la dalle 1 est bien inférieur à celui de la dalle 2 alors les classements donnés à priori par le scieur sont similaires (respectivement C24 et supérieur à 24). Ce constat est surprenant. La qualité du bois épicéa et son sciage dans la grume sont moins maîtrisés puisque ce bois a été scié dans un autre établissement (en attente de confirmation du scieur).
4. Le module d'Young calculé de la dalle correspond au module Young moyen des planches utilisées pour chaque dalle. Ce module d'Young peut être comparé avec le module d'Young trouvé dans la littérature [45], [46] et [48].

CARACTERISTIQUES MECANQUES DES SCIAGES					Classement structure (norme EN 338)			
Arrachement au clouage (norme EN ISO 12 777-3)					%	Robusta	Ref. I 214	Ref. Robusta
	Robusta	Ref. I 214	Ref. Robusta		C24	100	0	100
Fmax (N)	3 462	1 800	3 462		C18	0	0	0
					Hors-classe	0	100	0
Moyennes des caractéristiques mécaniques des sciages								
Hauteur grume	Largeur de cernes (mm)	Proportion de planches sans nœud		MOE	MOR	Masse volumique à 12 % (kg/m ³)		
		sur la face	sur la rive					
bas grume	12	80 %	100 %	11 500	64,9	430		
mi-grume	12	14 %	61 %	11 200	46,3	451		
haut grume	12	30 %	67 %	12 400	53,9	468		
moyenne	12	50 %	81 %	11 600	57,1	445		
N : Newton. MOE : Module d'élasticité statique. MOR : Contrainte de rupture en flexion.								
CARACTERISTIQUES MECANQUES DES SCIAGES					Potentiel structure (norme EN 338)			
Arrachement au clouage (norme EN ISO 12 777-3)					%	Beaupré	Ref. I 214	Ref. Robusta
	Beaupré	Ref. I 214	Ref. Robusta		C24	14	0	100
Fmax (N)	1 827	1 800	3 462		C18	59	0	0
					Hors-classe	27	100	0
Moyennes des caractéristiques mécaniques des sciages								
Hauteur grume	Largeur de cernes (mm)	Proportion de planches sans nœud		MOE (MPa)	MOR (MPa)	Masse volumique à 12 % (kg/m ³)		
		sur la face	sur la rive					
bas grume	17	61 %	88 %	8 200	52,0	374		
mi-grume	16	32 %	70 %	9 400	46,8	408		
haut grume	16	25 %	50 %	9 600	44,4	430		
moyenne	16	44 %	73 %	8 900	48,6	398		
N : Newton. MOE : Module d'élasticité statique. MOR : Contrainte de rupture en flexion.								

CARACTERISTIQUES MECANQUES DES SCIAGES				Potentiel structure (norme EN 338)			
Arrachement au clouage (norme EN ISO 12 777-3)				%	I 214	Ref. I 214	Ref. Robusta
	I 214	Ref. I 214	Ref. Robusta	C24	0	0	100
Fmax (N)	1 800	1 800	3 462	C18	0	0	0
				Hors-classe	100	100	0
Moyennes des caractéristiques mécaniques des sciages							
Hauteur grume	Largeur de cerne (mm)	Proportion de planches sans nœud		MOE (MPa)	MOR (MPa)	Masse volumique à 12 % (kg/m³)	
		sur la face	sur la rive				
bas grume	17	68 %	89 %	6 600	46,5	334	
mi-grume	16	26 %	63 %	7 000	37,7	351	
haut grume	16	43 %	74 %	7 200	40,8	360	
moyenne	16	46 %	76 %	6 900	41,9	347	

N : Newton.
MOE : Module d'élasticité statique.
MOR : Contrainte de rupture en flexion.

Tableau 21 : Données des caractéristiques mécaniques du peuplier en fonction des différents cultivars [45], [46] et [48]

Voici ci-dessous le tableau de comparaison des modules d'Young :

Comparaison module d'Young dalle	Unité	Dalle 1 épicea	Dalle 2 robusta au vent	Dalle 3 robusta non au vent	Dalle 4 multi cultivars
Module d'Young calculé	MPa	8490	10114	7326	7233
Module d'Young d'après littérature [45], [46] et [48]	MPa	11900	11600	11600	7900

Tableau 22: Comparaison des modules d'Young calculé et module d'Young de la littérature

La comparaison reste délicate. Seuls les modules d'Young de la dalle 2 et de la dalle 4 sont du même ordre de grandeur. Par contre pour les 2 autres dalles (1 et 3), les modules d'Young calculés sont bien inférieurs aux valeurs données par la littérature. Ces calculs nécessiteraient d'être donc confortés par une série d'essais complémentaires pour en tirer des conclusions fiables.

Les planches utilisées n'étaient pas forcément sèches. Ce paramètre a-t-il une forte influence sur le module d'Young ? Mes connaissances dans le bois restent limitées pour appréhender ce point.

IV.3.2. Calcul de la contrainte de rupture : $\sigma_{rupture}$ (voir feuille de calculs en annexe II.4.2)

En reprenant la formule de la contrainte à l'ELU, on peut calculer la contrainte de rupture $\sigma_{rupture}$ en considérant le point de rupture de la dalle :

$$\text{Contrainte rupture dalle} = \sigma_{rupture} = M_{rupture} \times \text{distance à l'axe neutre} / Idalle$$

$$\text{Moment rupture} = M_{rupture} = \text{Prep rupture} \times L_{portée}^2 / 8$$

$$\text{Prep rupture} = \text{masse relevée à la rupture} \times \text{pesanteur} / L_{portée}$$

$$L_{portée} = \text{portée entre appuis}$$

$$Idalle = \text{Inertie dalle}$$

Le tableau ci-dessous reprend pour chaque dalle, les relevés sur les graphiques et les résultats de calculs de la contrainte de rupture : $\sigma_{rupture}$.

Calculs pratiques de la contrainte de rupture : $\sigma_{rupture}$	Unité	Dalle 1 épicéa	Dalle 2 robusta au vent	Dalle 3 robusta non au vent	Dalle 4 multi cultivars
Masse relevée à la rupture	Kg	612,6	1266	1380	1542
Charge Répartie = Prep rupture	kN/ml	2,04	4,22	4,60	5,14
Moment rupture = M _{rupture}	kN.m	2,30	4,75	5,18	5,78
Contrainte rupture = $\sigma_{rupture}$	MPa	17,50	36,17	39,43	44,06

Tableau 23: Résultats calculs pratiques de la contrainte de rupture des dalles

Ce tableau nous amène aux constats suivants :

1. la contrainte de rupture de la dalle 1 en épicéa est inférieure à celles des autres dalles en peuplier. Ce constat confirme que la dalle 1 a rompu sous une charge nettement inférieure aux autres dalles (cf. graphique 12 paragraphe IV.2).
2. La contrainte de rupture de la dalle 1 est plus faible que celles des autres dalles. Il est délicat de conclure que l'épicéa est un bois plus "cassant" compte tenu du contexte de l'expérience 1 (limites de la méthode de chargement avec les bacs chargés en sable, instabilité de la charge). La qualité du bois et son sciage dans la grume sont moins maîtrisés puisque ce bois a été scié dans un autre établissement (en attente de confirmation du scieur).
3. La contrainte de rupture de la dalle 4 est anormalement élevée au regard des classements à priori des cultivars I214 et Beaupré et de retour d'expérience du scieur qui pensait que cette dalle aurait rompu prématurément par rapport aux autres. La valeur de la charge à la rupture a été extrapolé de manière excessive, puisque pour cette dalle 4 nous n'avons pas entendu de craquement et la dalle restée chargée toute la nuit avant qu'elle cède finalement. Il serait indispensable de mener une série d'essais complémentaires pour en tirer des conclusions fiables sur la contrainte de rupture de cette dalle multi-cultivars.
4. La contrainte de rupture calculée peut être comparée avec la contrainte de rupture en flexion trouvée dans la littérature [45], [46] et [48].

CARACTERISTIQUES MECANQUES DES SCIAGES					Classement structure (norme EN 338)			
Arrachement au clouage (norme EN ISO 12 777-3)					%	Robusta	Ref. I 214	Ref. Robusta
	Robusta	Ref. I 214	Ref. Robusta		C24	100	0	100
Fmax (N)	3 462	1 800	3 462		C18	0	0	0
					Hors-classe	0	100	0
Moyennes des caractéristiques mécaniques des sciages								
Hauteur grume	Largeur de cernes (mm)	Proportion de planches sans nœud		MOE	MOR	Masse volumique à 12 % (kg/m³)		
		sur la face	sur la rive					
bas grume	12	80 %	100 %	11 500	64,9	430		
mi-grume	12	14 %	61 %	11 200	46,3	451		
haut grume	12	30 %	67 %	12 400	53,9	468		
moyenne	12	50 %	81 %	11 600	57,1	445		
N : Newton. MOE : Module d'élasticité statique. MOR : Contrainte de rupture en flexion.								

CARACTERISTIQUES MECANQUES DES SCIAGES					Potentiel structure (norme EN 338)			
Arrachement au clouage (norme EN ISO 12 777-3)					%	Beaupré	Ref. I 214	Ref. Robusta
	Beaupré	Ref. I 214	Ref. Robusta		C24	14	0	100
Fmax (N)	1 827	1 800	3 462		C18	59	0	0
					Hors-classe	27	100	0
Moyennes des caractéristiques mécaniques des sciages								
Hauteur grume	Largeur de cernes (mm)	Proportion de planches sans nœud		MOE (MPa)	MOR (MPa)	Masse volumique à 12 % (kg/m³)		
		sur la face	sur la rive					
bas grume	17	61 %	88 %	8 200	52,0	374		
mi-grume	16	32 %	70 %	9 400	46,3	408		
haut grume	16	25 %	50 %	9 600	44,4	430		
moyenne	16	44 %	73 %	8 900	43,6	398		
N : Newton. MOE : Module d'élasticité statique. MOR : Contrainte de rupture en flexion.								

CARACTERISTIQUES MECANQUES DES SCIAGES				Potentiel structure (norme EN 333)			
Arrachement au clouage (norme EN ISO 12 777-3)				%	I 214	Réf. I 214	Réf. Robusta
	I 214	Réf. I 214	Réf. Robusta	C24	0	0	100
Fmax (N)	1 800	1 800	3 462	C18	0	0	0
				Hors-classe	100	100	0
Moyennes des caractéristiques mécaniques des sciages							
Hauteur grume	Largeur de cerne (mm)	Proportion de planches sans nœud		MOE (MPa)	MOR (MPa)	Masse volumique à 12 % (kg/m³)	
		sur la face	sur la rive				
bas grume	17	68 %	89 %	6 600	46,5	334	
mi-grume	16	26 %	63 %	7 000	37,7	351	
haut grume	16	43 %	74 %	7 200	40,8	360	
moyenne	16	46 %	76 %	6 900	41,9	347	

N : Newton.
MOE : Module d'élasticité statique.
MOR : Contrainte de rupture en flexion.

Tableau 24 : Données des caractéristiques mécaniques du peuplier en fonction des différents cultivars [45], [46] et [48]

Voici ci-dessous le tableau de comparaison :

Comparaison contrainte de rupture $\sigma_{rupture}$	Unité	Dalle 1 épicéa	Dalle 2 robusta au vent	Dalle 3 robusta non au vent	Dalle 4 multi cultivars
Contrainte de rupture calculée	MPa	17,50	36,17	39,43	44,06
Contrainte de rupture en flexion d'après littérature [45] et [46]	MPa	78	57,1	57,1	45,3

Tableau 25: Comparaison des contraintes de rupture calculé et contraintes de rupture de la littérature

La comparaison est encore plus délicate. Les valeurs calculées sont nettement inférieures à celles de la littérature. Il faudrait connaître les conditions d'expérimentation qui ont conduit aux valeurs données dans la littérature (planche seule, dimensions différentes et sûrement normées, ...).

On pourrait s'attendre à avoir des valeurs de contrainte de rupture calculée supérieure à celles de la littérature, puisque le principe constructif de la dalle assemblée décalée clouée devrait renforcer les caractéristiques mécaniques de l'ensemble.

IV.3.3. Calcul de la contrainte élastique : $\sigma_{élastique}$ (voir feuille de calculs en annexe II.4.3)

En reprenant la formule de la contrainte à l'ELU, on peut calculer la contrainte élastique $\sigma_{élastique}$ en considérant le point limite entre le domaine élastique et le domaine élasto-plastique de la dalle :

$$\text{Contrainte élastique dalle} = \sigma_{élastique} = M \text{ élastique} \times \text{distance à l'axe neutre} / Idalle$$

$$\text{Moment élastique} = M \text{ élastique} = \text{Prep limite élastique} \times L_{portée}^2 / 8$$

$$\text{Prep limite élastique} = \text{masse relevée à la limite élast./plast.} \times \text{pesanteur} / L_{portée}$$

$$L_{portée} = \text{portée entre appuis}$$

$$Idalle = \text{Inertie dalle}$$

Le tableau ci-dessous reprend pour chaque dalle, les relevés sur les graphiques et les résultats de calculs de la contrainte élastique : $\sigma_{\text{élastique}}$.

Calculs pratiques de la contrainte élastique : $\sigma_{\text{élastique}}$	Unité	Dalle 1 épicéa	Dalle 2 robusta au vent	Dalle 3 robusta non au vent	Dalle 4 multi cultivars
Masse relevée à la limite entre le domaine élastique et le domaine élastoplastique	Kg	249,6	800	800	800
Charge Répartie = Prep limite élastique	kN/ml	0,83	2,67	2,67	2,67
Moment élastique = Mélastique	kN.m	0,94	3,00	3,00	3,00
Contrainte élastique = $\sigma_{\text{élastique}}$	MPa	7,13	22,86	22,86	22,86

Tableau 26: Résultats des calculs pratiques de la contrainte élastique des dalles

Ce calcul de contrainte élastique est à comparer à la contrainte de flexion $f_{m,k}$ partielle définie par le classement du bois utilisé suivant la norme NF EN 338 [49] corrigée par la méthode des coefficients partiels définie dans l'Eurocode 5 [50].

Cette contrainte élastique doit rester inférieure à la contrainte de flexion $f_{m,k}$ partielle suivant l'Eurocode 5 [50]: voir feuille de calculs en annexe II.4.3

Le tableau ci-dessous présente la comparaison de la contrainte élastique calculée et la contrainte de flexion $f_{m,k}$ partielle.

Comparaison contrainte élastique calculée et contrainte flexion $f_{m,k}$ partielle	Unité	Dalle 1 épicéa	Dalle 2 robusta au vent	Dalle 3 robusta non au vent	Dalle 4 multi cultivars
Classement à priori des dalles	/	C24	C30	C24	< C18
Contrainte de flexion suivant NF EN 338 ($f_{m,k}$)	MPa	24	30	24	18
Coefficient partiel		0,85	0,85	0,85	0,85
Contrainte de flexion partiel ($f_{m,k}$ partiel)	MPa	20,31	25,38	20,31	15,23
Contrainte élastique = $\sigma_{\text{élastique}}$ (rappel Tableau 26)	MPa	7,13	22,86	22,86	22,86

Tableau 27: Comparaison des contraintes élastiques des dalles

Ce tableau nous amène aux constats suivants :

1. Cette comparaison est délicate, puisque les classifications des planches des différentes dalles ont été données par le scieur par retour d'expérience.
2. Si on considère ces classements, seules les dalles 1 et 2 ont un taux de travail inférieur à 100% et sont correctement dimensionnées au regard de l'Eurocode [50] (contrainte élastique calculée < contrainte de flexion $f_{m,k}$ partielle).

IV.4. Analyse des résultats d'expérimentations en fonction des caractéristiques du peuplier

Les expérimentations ont aussi pour objet de vérifier si le principe constructif de la dalle assemblée décalée clouée est réalisable en peuplier et permet de pallier au manque d'hétérogénéité de cette essence. L'idée est de pouvoir utiliser ce bois à plus grande échelle en construction et d'éviter un contrôle systématique de chaque planche.

Les principales hétérogénéités du peuplier sont les suivantes :

- multitude de cultivars avec des propriétés différentes
- hétérogénéité des planches d'une même grume (pied de bille et surbille)
- hétérogénéité au niveau de la section

Le scieur a donc fourni de manière aléatoire (sans les tester au préalable) des planches de différents cultivars et des planches d'un même arbre à différents endroits de la grume.

1er niveau d'hétérogénéité du peuplier : multitude de cultivars avec des propriétés différentes.

L'expérience 4 met en jeu des planches du cultivar Beaupré et du cultivar I214 découpées dans la surbille des arbres. D'après le tableau 14, ces 2 variétés ont respectivement un classement moyen de C18 et hors classe. Ce point a été confirmé par le scieur lorsqu'il a fourni ces planches.

Le résultat de l'expérience 4 démontre que le principe constructif de la dalle assemblée décalée permet d'atteindre des résistances équivalentes au cultivar Robusta (classement C24 en moyenne). En effet la flèche à l'ELS de la dalle 4 (10,6 mm) est similaire à celle de la dalle 3 (11,5 mm). La flèche rémanente, la limite du domaine élastique/ domaine élastoplastique (voir tableau 15) sont identiques.

En 1er approche, le classement théorique inférieure des planches I214 (hors classe) est "effacé" par l'assemblage réalisable. Le classement des planches de la dalle équivalente se rapproche donc du classement du cultivar Beaupré (C18)

2nd niveau d'hétérogénéité du peuplier : planches d'une même grume

L'idée est de mélanger des planches d'un même cultivar découpées en pied de bille ou en surbille. La surbille comporte beaucoup plus de nœuds liés aux racines des branches de l'arbre. Le pied de bille est plus résistant que la surbille.

La dalle 2 de robusta mélange alternativement des planches de pied de bille et surbille. La dalle 4 comporte 2 planches de pied de bille. Il est délicat d'apporter des conclusions sur uniquement 2 expériences, mais les 2 dalles restent toutefois résistantes aux vues de la charge à la rupture qui est supérieur à celle de la dalle 1 en épicéa.... Il faudrait donc mener plus d'essais en composant et testant des dalles uniquement en pied de bille avec des dalles uniquement en surbille pour établir des potentielles comparaisons fiables.

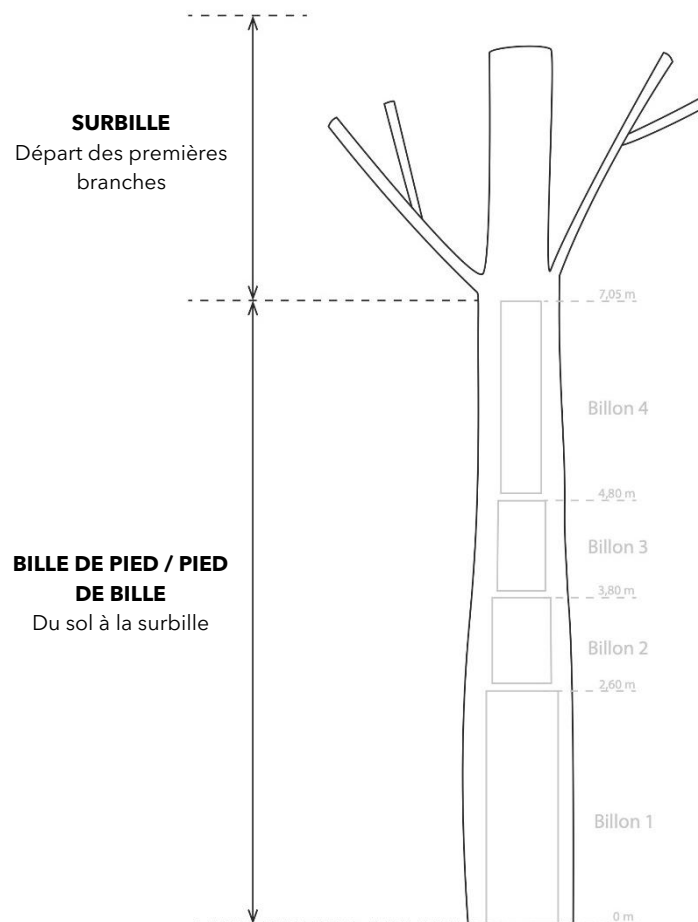


Figure 67: Schéma de distribution de la grume [46]

3ième niveau d'hétérogénéité du peuplier : planches sur la section d'une même grume

Le peuplier est hétérogène sur la section de la grume : les parties centrales du noyau du peuplier sont de moins bonne qualité que les parties latérales. Le scieur nous a donc fourni des planches uniquement sur les parties latérales. Il a cependant débité dans une même grume de robusta des planches exposées au vent dominant et des planches non exposées au vent.

La comparaison des expériences des dalles 2 (au vent dominant) et 3 (non au vent) confirme que la dalle exposée au vent est plus résistante que celle non exposée au vent :

$$\text{flèche instantanée dalle 2 (7,6mm)} < \text{flèche instantanée dalle 3 (11,5 mm)}.$$

En effet la partie exposée au vent dominant d'un arbre travaille en traction alors que celle non au vent travaille en compression. Visuellement pour la planche au vent, l'arbre a généré plus de "fibres" que les planches non au vent.

Si on compare les charges à la rupture des 2 dalles, elles sont équivalentes à 100kg près. On pourrait s'attendre à ce que la dalle 2 rompe à une charge supérieure (1266mm) de celle de la dalle 3 (1380mm), mais le constat est différent.

Ce point s'explique peut-être de la manière suivante : du fait du double chargement effectué pour la dalle 2 et pour lequel la limite élastique de la dalle a été dépassée (présence d'une flèche rémanente après 1er chargement). Les fibres des planches inférieures ont donc été sollicitées lors du 1er chargement et ont pu être fragilisées.

En conclusion, la partie au vent dominant a un classement supérieur à celle non au vent. Ce point est confirmé par le scieur qui précise que pour un cultivar comme le robusta, le classement peut atteindre C30 voire plus. Il faut être vigilant pour l'utilisation du peuplier en structure de l'orientation de l'arbre au vent dominant compte tenu de cette hétérogénéité au niveau de la section.

Un essai d'une dalle mélangé entre planches au vent et non au vent permettra de voir si on peut s'affranchir de cette hétérogénéité.

V. CONCLUSION

En conclusion au terme de ces 3 semestres, ce séminaire m'a permis de réaliser un véritable travail de recherche dans le domaine "Construire et concevoir l'architecture". En effet, j'ai poursuivi mon travail de licence autour de cette essence particulière, noble (bois blanc sans nœud), aux caractéristiques atypiques et aux multiples usages industriels qu'est le peuplier. J'ai axé mon étude sur la possibilité d'utiliser ce bois en tant que bois d'œuvre.

Mes recherches m'ont permis de découvrir l'état de l'art, les références de constructions réalisées en peuplier et la mise en œuvre de cette essence. Les nombreux interviews auprès des architectes, des bureaux d'étude, du chargé de mission du Comité National du Peuplier, des industriels du bois, des scieurs, le soutien de mes professeurs m'ont apporté un regard critique, m'ont enrichie des techniques spécifiques, des schémas constructifs utilisés, des savoir-faire dans la construction en peuplier. J'ai rencontré des personnes engagées et passionnés. Ils m'ont donné l'envie et l'opportunité de trouver ma problématique et pousser la réflexion autour du principe constructif de la dalle assemblée décalée clouée et réaliser son expérimentation en peuplier.

Comme évoqué depuis le début du séminaire, j'ai pu appréhender la complexité de travailler avec le bois de peuplier. La mise en œuvre de cette essence reste difficile pour une utilisation en construction du fait de son hétérogénéité à différents niveaux : en fonction des différents types de cultivars, dans la section de la grume, et intrinsèquement à la grume. Tous ces points complexifient une utilisation simple du peuplier dans le domaine de la construction comme peut l'être les essences de résineux (douglas, épicéa, pin, sapin, ...). A ce jour, il reste indispensable de mesurer chaque planche d'un lot pour garantir un classement adapté. L'objet de ce mémoire est de trouver une solution pour une utilisation plus simple du peuplier en tant que bois d'œuvre et d'éviter un classement systématique avant usage.

Le principe constructif imaginé de la dalle assemblée décalée clouée est inspiré de la réalisation de la toiture des tribunes du stade de football d'Étaples-sur-mer (62) et la dalle O'portune® de la société CBS-CBT. L'expérimentation réalisée reprend le cas d'application d'un plancher d'un logement entre 2 points d'appui composé de plusieurs modules de dalles. Les différents essais réalisés ont pour objet de comparer le peuplier à un résineux et de mettre en jeu les propriétés hétérogènes du peuplier. Des calculs préalables ont permis un prédimensionnement de la dalle.

Les essais réalisés nous permettent de tirer les premières conclusions :

- le principe constructif de la dalle assemblée décalée clouée rend cet assemblage de planches plus résistant qu'une utilisation de planches individuelles dans le cadre d'un plancher classique à solivage et permet d'augmenter considérablement la distance entre appuis
- le cultivar "Robusta" est tout aussi, voire plus résistant que l'épicéa utilisé dans les mêmes conditions.
- les calculs restent relativement cohérents avec les résultats d'expériences (flèche instantanées à l'ELS, charge de rupture). Cependant des conclusions définitives ne peuvent être tirées (voir ci-après)
- le principe constructif imaginé peut permettre de s'affranchir de l'hétérogénéité du peuplier sous certaines conditions.

Les résultats des expériences réalisées permettent de donner des premières orientations, mais il serait indispensable de poursuivre les expérimentations sur plusieurs lots de cultivars de peuplier pour en tirer des conclusions fiables. Il serait nécessaire d'établir une stratégie complète d'essais pour pouvoir comparer les résultats en fonction des aspects hétérogènes du peuplier. Une étude statistique sur les lots de dalles similaires testées de façon répétitive (au moins 10 fois) permettrait de donner des extrapolations abouties et démontrer comment exploiter le peuplier dans le système constructif proposé : la dalle assemblée décalée clouée.

Ce travail permettrait de clairement définir et conclure si ce principe constructif permet une homogénéisation des caractéristiques des planches entre elles et à terme d'éviter un classement systématique de chaque planche.

Il serait aussi important de sécuriser et d'industrialiser le banc de test. Cette industrialisation avec des équipements de mesure adaptés et calibrés permettrait d'avoir des résultats plus précis et plus exact. Des essais à l'échelle 1 éviteraient les extrapolations réalisées avec des essais à une échelle 1/2. Par contre, ils devraient être réalisés avec des bois aboutés par rapport à la section de bois choisie.

On peut donc conclure au regard des analyses des résultats des expériences au paragraphe IV.4, que **les particularités du bois peuplier sont compatibles avec le système constructif de la dalle assemblée décalée clouée**. Ce système permet de pallier au manque d'hétérogénéité de cette essence, ces premiers résultats sont encourageants mais doivent être confortés par des essais complémentaires.

Si on veut utiliser ce bois à plus grande échelle en construction et éviter un contrôle systématique de chaque planche, il faut imaginer et concevoir des principes constructifs (comme celui de la dalle assemblée décalée clouée) qui assure une harmonisation des propriétés hétérogènes du peuplier. Il faudrait aussi peut-être se limiter à un certain de cultivars "suffisamment robustes" pour garantir une telle utilisation.

Le peuplier est actuellement développé sur tout le territoire français dans de nombreux bassins, mais son usage en tant que bois d'œuvre reste limité à certaines régions comme les Hauts de France. Une étude plus poussée, des recherches sur les différents cultivars de peuplier français, des essais complémentaires sont indispensables si on veut étendre son utilisation unilatéralement en construction. L'idée principale reste de construire en bois local et va dans le sens de la préservation de la biodiversité, et peut être une réponse au changement climatique.

L'homogénéisation des caractéristiques des planches de différents cultivars à travers un principe constructif adapté permettrait d'utiliser les bois locaux en filière courte de manière sereine sans avoir à tester systématiquement les planches et sélectionner les cultivars utilisés.

Ce séminaire et les expériences réalisées m'ont vraiment enrichie personnellement. Voici mon retour d'expérience en quelques points :

- travail de recherche de longue haleine soutenu et guidé par les enseignants de l'école malgré la difficulté à aboutir à une problématique trouvée tardivement, et à trouver un local pour mes expériences, un fournisseur de bois de peuplier et les financements associés,
- renforcement de mes connaissances en calculs de structure sur un cas concret,
- découverte des métiers et acteurs dans la filière de la construction bois,
- opportunité de discussions et rencontres avec des professionnels ouverts, disponibles, passionnés et compétents,
- réalisation des expériences chez un industriel (scierie NOBECOURT spécialisé en peuplier) qui a mis à ma disposition son atelier et les moyens techniques et humains pour aboutir à mes fins
- préparation indispensable des expériences (mode opératoire de la construction des dalles, pré calculs pour s'assurer de faisabilité des mesures, définition préalable de la stratégie des essais et des résultats attendus, développement des solutions de mise en œuvre pour fiabiliser les mesures, ...)
- nécessité d'une grande rigueur pendant la réalisation des essais pour fiabiliser les mesures, garantir la répétabilité des essais et remise en cause des modes opératoires pour travailler en sécurité et aller au bout de mes expérimentations,
- frustration de ne pouvoir aboutir à des conclusions plus certaines, de ne pouvoir pousser les calculs et expérimentations faute de temps, de moyens et de connaissances adaptées.

Les potentielles perspectives de mon travail pourraient être à terme de :

- développer l'utilisation d'autres cultivars (autres que Robusta) pour des expérimentations complémentaires,
- lancer de réelles expérimentations auprès d'industriels pour avoir un vrai retour d'expérience reconnu par les professionnels,
- réaliser une analyse comparative entre le principe constructif de la dalle assemblée clouée avec celui du plancher à solivage traditionnel en utilisant les mêmes cultivars de peupliers, mais aussi en référant à un plancher en résineux,
- étendre les recherches à d'autres systèmes constructifs pour étendre l'utilisation du peuplier en tant que d'œuvre.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] France Inter, 2021, Téléphone sonne du 22/12/2021 "Est-ce qu'on en demande pas trop à la forêt ?". Disponible sur : <https://www.franceinter.fr/emissions/le-telephone-sonne/le-telephone-sonne-du-mercredi-22-decembre-2021>(consulté le 26/12/2021)
- [2] Peuplier de France, 2016, Techno guide du peuplier, 43 p. Disponible sur : <http://franceboisforet.com/wp-content/uploads/2014/06/technoguide-peuplier.pdf> (consulté le 2/11/2021)
- [3] France Bois Forêt, 2020, Un jour, cet arbre se transformera. Disponible sur: <https://franceboisforet.fr/2021/01/14/> (consulté le 3/12/2021)
- [4] Syndicat des Industriels Français de l'Emballage Léger en bois, 2003, Peupliers et Populiculture. Disponible sur : <https://www.emballage-leger-bois.fr/node/12> (consulté le 12/11/2021)
- [5] Institut national de l'information géographique et forestière, 2016, Le mémento - Inventaire forestier - La forêt en chiffres et en cartes, p17. Disponible sur : https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/161122_memento2016.pdf (consulté le 8/12/2021)
- [6] Naudin, E. , 2021, Colloque Peuplier - Le peuplier une précieuse ressource menacée, Centre national de la propriété forestière. Disponible sur : https://www.youtube.com/watch?v=l46D7ReleSM&list=PLluS62exqjS7dn2Y7QtdUNS3XeP2_3nAy&index=1 (consulté le 8/10/2021)
- [7] Naudin, E., 2021, Webinaire "Peuplier : des enjeux croisés pour les territoires" - Pourquoi utiliser le peuplier ?, Conseil National du Peuplier. Disponible sur : https://www.youtube.com/watch?v=MkKYGj_elvU&t=86s (consulté le 8/10/2021)
- [8] Meiresonne, L., Nadezhdin, N., Cermak, J., Van Slycken, J. & Ceulemans, R. ,1999, Measured sap flow and simulated transpiration from a poplar stand in Flanders, *Agricultural and Forest meteorology*, 96, pp. 165-179 (consulté le 15/11/2021)
- [9] Russi, D., ten Brink, P., Farmer, A., Badura, T., Coates, D., Förster, J., Davidson, N., 2013, *The economics of ecosystems and biodiversity for water and wetlands*, IEEP, 78p.
- [10] Migeon, A., 2009, Étude de la variabilité naturelle dans la réponse du peuplier aux métaux: bases physiologiques et exploitation en phytoremédiation, Université Henri Poincaré, 345p.
- [11] Zapater, M., Chapelet, B., Coquelet, L., 2012. *Peupleraie et environnement - un regard partagé sur la place de la peupleraie sur nos territoires*, CRPF, 36p.
- [12] Hamon, X., Dupraz, C., Liagre, F., 2009, *L'agroforesterie, outil de séquestration du carbone en agriculture*, INRA Agrooof, 18p.
- [13] Nair, P. R., 1993, *An introduction to agroforestry*, Springer Science & Business Media, 449p.
- [14] Fédération nationale du bois, 2016, *Peuplier, Préférez les bois de France*. Disponible sur : <http://preferezlesboisdefrance.fr/essence/peuplier/> (consulté le 29/11/2021)
- [15] CMBS Développement, 2016, *Valorisation du bois des essences régionales - Utilisation des feuillus en structure mise au point d'une méthode simple de classement mécanique du peuplier*, 12p. Disponible sur : <https://www.bois-et-vous.fr/images/neopublications/p/54/1535706312343.pdf> (consulté le 16/01/2022)
- [16] Conseil National du Peuplier, 2021, *Le Peuplier : des usages spécifiques et performants*. Disponible sur : <https://www.peupliersdefrance.org/page/20-le-peuplier-des-usages-specifiques-et-performants> (consulté le 4/12/2021)
- [17] Comité européen de normalisation, 2016, *Norme Européenne NF EN 338 Bois de structure – Classes de résistance*, 13p.
- [18] Fédération nationale du bois, 2018, *Fiche comprendre les différents classements du bois*, 4p. Disponible sur : https://www.francebois2024.com/wp-content/uploads/FichesC6-LDCDB_4pages.pdf (consulté le 16/01/2022)
- [19] Comité européen de normalisation, 2004, *Norme Européenne NF EN 975-2 Bois sciés - Classement d'aspect des bois feuillus - Partie 2 : Peuplier*, 10p.

- [20] Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, 2006, Bois massif structuraux, 5p. Disponible sur : http://www.cilc.fr/uploads/files/1_Descriptif_bois_massifs_structuraux_22.pdf (consulté le 4/01/2022)
- [21] Fédération nationale du bois, 2021, Classement structurel des sciages, Préférer les bois de France. Disponible sur : <http://preferezlesboisdefrance.fr/sapprovisionner-en-sciages-et-bois-ronds/classement-structurel-des-sciages/> (consulté le 3/12/2021)
- [22] Fédération nationale du bois, 2018, Fiche Comprendre: Le classement structure des résineux, Préférer les bois de France. Disponible sur : https://www.preferezlesboisdefrance.fr/wp-content/uploads/2019/03/FichesC9-LCSDR_6pages.pdf (consulté le 23/11/2021)
- [23] Ordre des architectes, 2015, Médiathèque municipale. Disponible sur : <https://www.architectes-pour-tous.fr/studio-ap-elsa-liverani-architecte-dplg/mediatheque-municipale> (consulté le 15/12/2021)
- [24] Delabougliis, F., 2015, Centre multi-accueil de la petite enfance à Courcelles-les-Lens, Bois et vous, 12p. Disponible sur : <https://www.bois-et-vous.fr/images/neopublications/p/87/1586525530800.pdf> (consulté le 15/12/2021)
- [25] Delécluse, R., 2021, Construction des tribunes du stade de football d'Étables-sur-Mer - Utilisation massive de peuplier régional en bois de structures, CNDB, 12p. Disponible sur : <https://www.bois-et-vous.fr/ressources/publication/download/40> (consulté le 15/12/2021)
- [26] « La médiathèque municipale de Givenchy-en-Gohelle au service de la filière bois locale » Document fournie par A&P Studio, écrit par non défini
- [27] « Mémoire Technique de la construction d'une médiathèque municipale en filière bois régionale », Document fournie par A&P Studio, écrit par non défini
- [28] L'Observatoire CAUE, 2012, Salle polyvalente Gréaux, Lezennes (59). Disponible sur : <https://www.caue-observatoire.fr/ouvrage/salle-polyvalente-gremaux-lezennes-59/> (consulté le 06/01/2022)
- [29] Préférer les bois de France, 2022, Réhabilitation, salle polyvalente de Lézenes. Disponible sur : <https://preferezlesboisdefrance.fr/realisation/rehabilitation-salle-polyvalente-de-lezennes/> (consulté le 15/03/2022)
- [30] Lamouroux, M., 2014, Des poutres treillis en bois de peuplier régional, Sequences bois n°101. Disponible sur : <https://ingebois.com/content/3-projets/10-filiere-bois-locale/01-salle-polyvalente-gremaux-lezennes-59/article-sequences-bois-n-101-o> (consulté le 22/04/2022)
- [31] Le contre plaqué, 2016, Architecture - La Maison de l'Énergie Solaire. Disponible sur : <http://www.lecontreplaque.com/architecture-la-maison-de-lenergie-solaire/> (consulté le 12/05/2022)
- [32] Concept bois stucture - concept bois technologie, 2017, La dalle O'portune en planché bois - Descriptif technique. Disponible sur : <https://cbs-cbt.com/multimedia/documents/5320%20-%20Oportune%20-%20Descriptif%20technique%202017.pdf> (consulté le 28/04/2022)
- [33] Concept bois stucture - concept bois technologie, 2022, Systemes structurels. Disponible sur : <https://cbs-cbt.com/fr/structure/systemes-structurels-4-9-0> (consulté le 24/04/2022)
- [34] Collectif dotonta.com, 2020, Peuplier noir (Populus nigra): propriétés et utilisation. Disponible sur : <https://doctonat.com/peuplier-noir/> (consulté le 04/05/2022)
- [35] Interview de Mr Laurent BAILLET (annexe)
- [36] Interview de Studio A&P Mme Elsa LIVERANI (annexe)
- [37] Interview de Mr Emmanuel NAUDIN (annexe)
- [38] Interview de l'entreprise CBS-CBT Mme Prescillia RANSAY (annexe)
- [39] Interview l'entreprise Nobécourt Mr Hugues NOBECOURT (annexe)
- [40] Denios, 2022, REI 120- EN 13501 : les bases de la protection incendie. Disponible sur : <https://www.denios.fr/notre-entreprise/notre-expertise/les-bases-de-la-protection-coupe-feu> (consulté le 01/06/2022)
- [41] FIBOIS Hauts-de-France, 2016, Centre multi-accueil de la petite enfance à Courcelles-les-Lens (62), 12p. Disponible sur : <https://www.bois-et-vous.fr/images/neopublications/p/87/1586525530800.pdf> (consulté le 18/02/2022)
- [42] Baillet, L., 2022, Dernières réalisations. Disponible sur : <http://baillet-archi.fr/#> (consulté le 26/05/2022)

- [43] CNDB, 2016, Utilisation massive de peuplier régional en bois de structure- Lezennes - Restructuration de la salle Gremaux, 12p. Disponible sur : http://anthyarbredelannee.weebly.com/uploads/4/9/4/6/49467363/59_19dbbf04-16ea-49b8-9eae-9f5926352bbb_1.pdf (consulté le 04/04/2022)
- [44] Delécluse, R., 2017, Construction des tribunes du stade de football d'Étaples-sur-Mer : Utilisation massive de peuplier régional en bois de structure, CNDB, 12p. Disponible sur : CONSTRUCTION DES TRIBUNES DU STADE DE FOOTBALL ...<https://www.bois-et-vous.fr/ressources/download> (consulté le 13/05/2022)
- [45] Berthelot, A., Reuling, D., Aleon, D., El Haouzali, H., Marchal, R., Paillassa, E., 2009, Référentiel qualités du bois des cultivars de peuplier, 36p. Disponible sur : <https://www.peupliersdefrance.org/uploads/uploads-FR/Documents/QBP-I.pdf> (consulté le 07/06/2022)
- [46] Berthelot, A., Reuling, D., Robert, G., Bouvet, A., Lanvin, J-D., Legrand, G., Moreau, J., Denaud L., Paillassa, E., 2013, Qualités du bois des nouveaux cultivars de peuplier, 56p. Disponible sur : <https://www.peupliersdefrance.org/uploads/uploads-FR/Documents/QBP-II.pdf> (consulté le 24/05/2022)
- [47] Biomasse Normandie, 2022. Encyclopédie du bois-énergie - Volume sur pied et production biologique. Disponible sur : <https://www.biomasse-normandie.fr/encyclopedie/volume-sur-pied-et-production-biologique/> (consulté le 24/05/2022)
- [48] CIRAD, 2012. Fiche de l'essence épicéa CIRAD, TROPIX 7, 4p.
- [49] Comité européen de normalisation, 2009. NF EN 338 (décembre 2009) - Caractéristiques des bois massifs résineux
- [50] Comité européen de normalisation, 2005. Eurocode 5 - NF EN1995-1-1 (novembre 2005) - Conception et calcul des structures en bois (Partie 1-1 : Généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments)
- [51] Comité européen de normalisation, 2005. Eurocode 5 - NF EN1995-1-2 (septembre 2005) - Conception et calcul des structures en bois (Partie 1-2 : Généralités – Calcul des structures au feu)
- [52] Studio A&P, 2014. Labellisation Euralens - dossier d'intention - fiche projet - Médiathèque de Givenchy en Gohelle, 12p.
- [53] Studio A&P, 2014. Labellisation Euralens - dossier d'intention - complément d'informations - Médiathèque de Givenchy en Gohelle, 9p.