

Blocage mécanique des hygrovariations du bois

Vincent Bianchetti, Ugo Gerard

▶ **To cite this version:**

Vincent Bianchetti, Ugo Gerard. Blocage mécanique des hygrovariations du bois. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2012. hal-01873236

HAL Id: hal-01873236
https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01873236

Submitted on 13 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

ensti b

Rapport de Projet de Fin d'Etudes
- Promotion 2012 -

Blocage Mécanique des Hygrovariations du Bois

SFS intec

BIANCHETTI Vincent
GERARD Ugo
2011 / 2012

Responsable en entreprise : François Varacca
Enseignant responsable : Romain Rémond

AVANT PROPOS

Nous tenons tout d'abord à remercier Mr François Varacca pour cette opportunité de travailler avec une entreprise de référence dans le monde du bois. Ce type de projet ne peut en être que plus intéressant et plus motivant.

Nous voulions aussi remercier tout particulièrement Mr Romain Rémond pour sa présence, sa bonne humeur communicative et la qualité des conseils qu'il nous a prodigués tout au long de ce semestre.

Travailler sur un sujet tel que celui-là demande un investissement personnel important, mais cela fut pour nous particulièrement motivant de tenter de trouver les causes et solutions à un problème réel, et d'entrer ainsi dans une réelle démarche d'ingénierie.

SOMMAIRE

PRINCIPALES NOTATIONS **2**

INTRODUCTION **3**

- PARTIE 1 - ORIGINE DU PROBLEME ET REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES. **4**

1. EMERGENCE D'UNE PROBLEMATIQUE ACTUELLE. 4
   1.1. Présentation de la société SFS Intec. *4*
   1.2. Analyse du problème *5*
2. ETUDE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES EXISTANTES. 6
   2.1. Présentation générale *6*
   2.2. Rappels sur la diffusion de l'eau dans le bois *7*
   2.3. Travaux de Perkitny, Kingston & Rybarczyk *7*
   2.4. Travaux de Bengt Persson *10*

- PARTIE 2 - PRESENTATION GENERALE DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL **14**

1. CHOIX DES EXPERIENCES. 14
   1.1. Détermination des efforts mis en jeu lors du gonflement *14*
   1.2. Comparaison de différentes solutions techniques *14*
      1.2.1. Présentation des trois types d'assemblage 14
      1.2.2. Etapes de fabrication 17
2. CONCEPTION DU MONTAGE D'ESSAI. 19
   2.1. Présentation du montage d'essai : *19*
   2.2. Etape de fabrication. *20*
      2.2.1. Fabrication de la structure 20
      2.2.2. Fabrication des rotules 21
      2.2.3. Matériel de mesure (cf §3) 21
   2.3. Présentation du montage réel. *22*
3. ESSAIS DE CALIBRAGE DU MONTAGE EXPERIMENTAL 23
   3.1. Etalonnage des capteurs de force *24*
   3.2. Etalonnage du potentiomètre *25*
   3.3. Calibrage thermique. *25*
   3.4. Calibrage mécanique. *27*
4. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX. 28
   4.1. Choix des conditions d'expérience et du matériel adéquat. *28*
   4.2. Protocole expérience n°1. ..... *29*
   4.3. Protocole expérience n°2. ..... *30*
   4.4. Dispositif expérimental *31*

- PARTIE 3 - ANALYSE DES RESULTATS. **32**

1. EXPERIENCE N°1. 32
   1.1. Présentation des résultats : *32*
2. EXPERIENCE N°2. 35
   2.1. Etude de la prise d'humidité *35*
   2.2. Comparaisons géométriques *36*
   2.3. Comparaisons microscopiques *41*
3. DISCUSSION SUR LE MONTAGE ET LA VALIDITE DES RESULTATS 43
   3.1. Etudes des paramètres d'erreur *43*
      3.1.1. Eléments du montage d'essai 43
      3.1.2. Structure de base 43
   3.2. Propositions d'amélioration *45*
   ..... *46*

CONCLUSION **47**

BIBLIOGRAPHIE **48**

ANNEXES **49**

RESUMÉ **52**

ABSTRACT **54**

PRINCIPALES NOTATIONS

Notations générales, par ordre d'apparition :

Δ, δ : Variation

h : hauteur de joint (mm)

H, ω : humidité du bois (%)

ρ : masse volumique (kg/m3)

λ : conductivité thermique (W/m^2)

τ : temps de diffusion (s)

e : épaisseur de la pièce (mm)

σ : contrainte (MPa)

ε : déformation (mm)

L : direction longitudinale

R : direction radiale

T : direction tangentielle

F : force (N)

T : température (°C)

L : longueur (m)

I : moment d'inertie (cm^4)

E : module d'Young (MPa)

M_h : Masse humide

M_0 : Masse anhydre

INTRODUCTION

L'utilisation du matériau bois devient de plus en plus importante, mais certaines de ses propriétés intrinsèques rendent l'utilisation de ce matériau difficile dans certains domaines et notamment dans le celui du génie civil. L'une des principales propriétés du bois est son caractère hygroscopique, il est donc capable de se charger ou de se décharger en humidité en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant. Ce caractère va directement entrainer des variations dimensionnelles dans les directions longitudinales, tangentielles et radiales.

Concevoir des ouvrages de génie civil en bois, en portant l'accent de manière attentive sur l'économie, la durabilité et la qualité, suscite aujourd'hui de nombreuses questions. Parmi celles-ci le dimensionnement et l'optimisation des assemblages demeurent l'un des soucis majeurs. Nous allons nous intéresser dans cette étude à la possibilité de bloquer par des systèmes d'assemblage par quincaillerie les variations dimensionnelles du bois lors de sa reprise d'humidité après une installation en extérieur.

Au cours d'une première partie, nous exposerons clairement quelle est l'origine de la problématique à laquelle nous faisons face, puis nous ferons une brève synthèse des travaux déjà effectués sur ce sujet et disponible en références bibliographiques.

Dans un second temps, nous présenterons la méthode de travail retenue, et nous détaillerons ainsi quels furent les moyens choisis et mis en œuvre au cours de nos expériences.

La dernière partie sera consacrée à l'exposition et à l'analyse de nos résultats, en tentant de garder un œil critique sur ceux-ci. Nous conclurons alors sur notre étude, en gardant toujours à l'esprit les objectifs de départ, qui sont de répondre à une demande d'industriel.

- PARTIE 1 - ORIGINE DU PROBLEME ET REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

1. EMERGENCE D'UNE PROBLEMATIQUE ACTUELLE.

Dans le domaine de la construction bois, le terme général d'assemblage par tiges métalliques désigne les liaisons par broches, boulons, pointes et vis. Chacun de ces organes présente des particularités techniques spécifiques qui conditionnent leur usage dans les assemblages de structures. Le problème sur lequel nous avons travaillé a été amené par Mr François Varacca, Chef de Marché Assemblage Bois chez SFS Intec.

1.1. Présentation de la société SFS Intec.

La société SFS Intec, référence en matière de fabrication de système d'assemblages bois et autres matériaux, a été créée en 1976 sous le nom de SFS Stadler. Elle fait partie d'un groupe industriel international d'origine suisse implanté majoritairement en Europe et en Amérique du Nord.

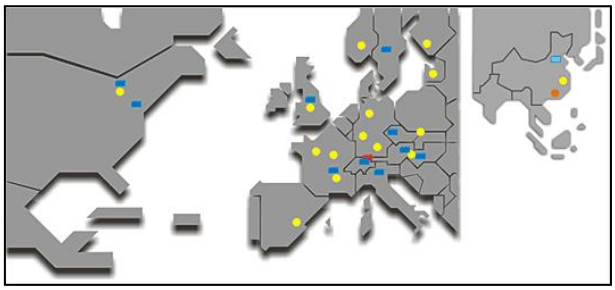


Image 1 : Implantations dans le monde du groupe SFS. [1]

Installée depuis ses origines dans la ville de Valence (Drôme), elle maîtrise toute la fabrication de ses produits, de la frappe à froid au roulage jusqu'aux traitements thermiques de finition, et possède en France un effectif important de plusieurs centaines de salariés (542 exactement).

Ses secteurs d'activité sont très variés : bâtiment, automobile, électrotechnique de précision (téléphonie,…), transports, mais son cœur de métier reste toujours la fabrication de systèmes d'assemblages performants et adaptés aux conditions réelles d'utilisation des produits.



Image 2 : Exemples de pièces réalisées par le procédé de frappe à froid. [2]

1.2. Analyse du problème

L'un des ouvrages d'art les plus anciens et pourtant toujours l'un des plus actuels reste sans nul doute le pont en bois. Utilisé depuis la nuit des temps, il a toujours permis un développement des sociétés en favorisant les échanges. Cependant, les problématiques liées à la conception de ceux-ci ont grandement évoluées au fil des siècles, et cette évolution est à l'origine de notre projet.

Sur les ouvrages bois en général, et a fortiori les ponts composés d'éléments en lamellé-collé de grande section, on observe un gonflement du bois lors de la prise d'humidité de celui-ci. C'est cette variation dimensionnelle qui pose actuellement un problème au niveau de la fabrication des ponts.

En effet, au fil du temps et après quelques années en extérieur, on observe au niveau des joints de chaussée des décalages qui s'avèrent problématiques, tant pour les couches de roulement à base d'enrobés bitumés que pour les systèmes de suspension et le confort des véhicules empruntant ces accès. On trouve ces défauts principalement au niveau des jonctions entre les différents tabliers ou au niveau de la jonction sol/tablier, tout ceci étant représenté sur et la figure 1 et l'image 2 ci-dessous.



Image 3 : Zones à risque de déjointement [3]

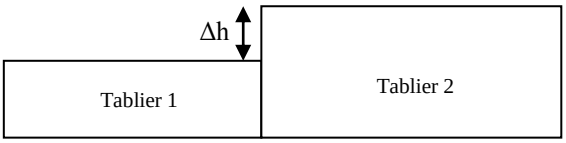


Figure 1 : Type de défaut constaté dans le cas d'un gonflement non identique au niveau du joint de chaussée entre deux tabliers

Le but pour l'industriel serait de parvenir à une solution technique permettant de ramener la variation de hauteur Δh à 0mm, pour limiter les effets sur les véhicules circulants. La première question que nous avons donc été amenés à nous poser concernait donc la quantification des efforts mis en jeu au cours du gonflement du bois, afin de pouvoir nous orienter vers des solutions techniques et des matériels d'essai adaptés à ce type d'expérience.

2. ETUDE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES EXISTANTES.

2.1. Présentation générale.

Le gonflement du bois en tant que tel a fait l'objet d'un nombre assez conséquent d'études depuis les années 60. Nous avons pour notre projet utilisé plusieurs sources bibliographiques différentes, mais très peu de ces sources sont francophones.

Les propriétés de gonflement du bois sont connues depuis l'Antiquité, et certains historiens assurent même que les anciens Egyptiens utilisaient ce matériau pour extraire les pierres des carrières de montagne. Ils perçaient les falaises, introduisaient des madriers préalablement étuvés (avec les moyens de l'époque mais considérés comme secs) puis humidifiaient ceux-ci jusqu'à briser la roche adjacente [4]. On sait donc depuis longtemps que les efforts mis en jeu lors de ce processus sont très importants. On notera aussi que plus on contraint un bois plus les forces mises en jeu vont être élevées, et de même, plus un bois va être sec avant l'humidification, plus les force de pression seront élevées [5].

Ce qui nous intéressait particulièrement pour notre étude était l'ordre de grandeur des efforts libérés lors du gonflement du bois et le temps à prendre en compte pour amener nos échantillons à l'humidité d'équilibre. Nous nous sommes donc concentrés sur des travaux anciens et récents, menés par Perkitny, Kingston et Rybarczyk dans les années 60/70 et Bengt Personn en 2007. Nous allons donc rappeler dans les pages suivantes les résultats qui nous ont été utiles et présenter brièvement leurs travaux.

2.2. Rappels sur la diffusion de l'eau dans le bois

La diffusion de l'eau dans le bois est régie par la loi de Fick, qui permet d'obtenir la diffusion de l'eau dans la matière en fonction de la variation dans le temps d'une teneur en eau source.

Elle s'exprime sous la forme suivante [6] :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_w \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad \text{Avec} \quad D_w = \frac{\lambda_w}{\rho . c_w}$$

Le coefficient *Dw* s'exprime en m²/s et peut-être assimilé à un coefficient de diffusivité hydrique (voir notations en page 1).

La résolution de cette équation n'étant pas l'objectif premier de ce projet et demandant un temps trop important, nous avons donc utilisé la formule approchée suivante, qui provient de cette loi [7]:

$$\tau = \frac{e^2}{D_w}$$

Dans le cas d'une diffusion dans le sens longitudinal, nous utiliserons alors un facteur correctif de 20, pour prendre en compte la diffusion plus rapide que dans les autres directions.

Nous obtenons alors ici des temps de mise à l'humidité d'équilibre de

- 15 h pour un échantillon de 10mm d'épaisseur
- 5 jours 5 h pour un échantillon de 30mm d'épaisseur

On constate donc que le temps d'expérience augmente de manière très importante avec l'épaisseur des échantillons. Nous avons donc décidé de ne pas prendre d'échantillons ayant une épaisseur supérieure à 30 mm.

2.3. Travaux de Perkitny, Kingston & Rybarczyk

Basés sur différentes études menées par ces 3 éminents chercheurs dans les années 60 et 70, ces travaux ont permis de mieux caractériser le gonflement du bois. Ils se sont attelés à l'étude des forces mises en jeu lors du gonflement du bois et aux phénomènes de mécanosorption dans ce même matériau.

Leurs essais concernaient principalement des bois massifs résineux (pin maritime en particulier), et ont permis de quantifier une partie des phénomènes observables au cours du gonflement du bois. Les résultats obtenus à l'issue de leurs tests sont regroupés dans la figure 2 ci-dessous :

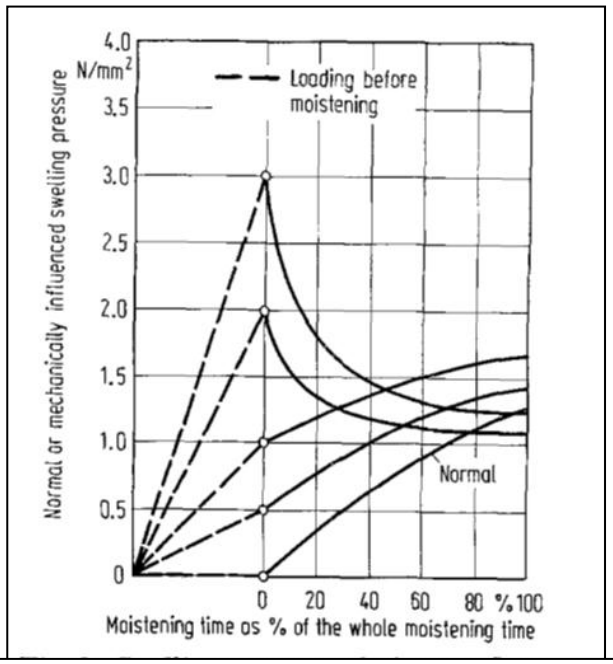


Figure 2 : Pression de gonflement du bois, d'après Perkitny & Kingston (1972)

Ils ont mesuré le gonflement du bois dans deux situations différentes : le cas du gonflement libre et le cas du gonflement avec une mise sous pression préalable des échantillons par un système mécanique de type presse.

Sur cette courbe, on peut voir que dans le cas d'une précontrainte des échantillons ou d'un gonflement libre, la pression exercée est proche de 1.5MPa. On remarque néanmoins que si l'échantillon est sous pression préalable, la pression de gonflement sera sensiblement plus élevée.

Cette valeur de 1.5 MPa correspondrait donc pour un échantillon de 20x20 mm à une charge à reprendre de 60 kg. Nous devrons donc à première vue apporter un soin tout particulier au choix des capteurs et à la rigidité du bâti de notre montage pour ce type d'expérience.

Il est aussi nécessaire de discuter ici de la mécanosorption, qui a fait l'objet de travaux de ces mêmes chercheurs, car dans le cas du problème posé qui est la déformation au cours du temps des pièces de bois lamellé-collé entrant dans la composition des ponts, ce phénomène est toujours présent.

La modélisation du comportement du bois en humidité variable a commencé à partir des années 1960. Ces modèles sont basés soient sur des considérations purement phénoménologiques (macroscopiques) soient sur des analyses et interprétations physiques de la déformation, en relation avec la structure du bois.

En effet, la mécanosorption peut être définie par le fait qu'une variation d'humidité relative sous contrainte constante amène une augmentation des déformations par rapport à une pièce de bois ayant les mêmes contraintes sans variation d'humidité relative. Cette variation étant indépendante du temps, elle ne dépend que des contraintes mécaniques et hydriques appliquées au matériau [8].

C'est donc le cas de nos éléments de pont, qui sont mis sous contrainte dès leur installation sur site et vont subir au fil des ans des alternances de cycles séchage/humidification, en plus d'une remontée progressive de leur taux d'humidité (de 12% en sortie d'usine à 17% en usage normal après quelques années).

Les effets observés lors des essais de Perkitny et Kingston donnent lieu à des réponses pour lesquelles plusieurs interprétations ont été proposées au fil du temps [9] :

- les mécanismes se situent principalement au niveau moléculaire et sont liés aux processus de rupture et de déformation de liaisons hydrogènes des régions amorphes des chaînes de celluloses
- les mécanismes se situent principalement au niveau de la microstructure du bois et sont liés à la configuration ou à l'orientation des microfibrilles dans la couche S2 de la paroi cellulaire

Après avoir mené un certain nombre d'expériences, ils sont parvenus aux courbes que l'on peut observer sur la figure 3 en page suivante.

Au vu de leurs résultats, on constate que plus le nombre de cycles séchage/humidité est grand, plus la pression résiduelle exercée lors du gonflement et la taille de l'échantillon anhydre vont diminuer.

Cela est dû à un effet communément appelé Hygro-Verrou, qui veut que le matériau possède un comportement se traduisant par des blocages des déformations durant des phases de séchage et une mémoire hydrique rappelée lors des phases de regonflement [10].

On pourrait donc penser, dans l'optique d'un assemblage adéquat pour notre usage, que s'il résistait au premier cycle de gonflement, il pourrait par la suite résister aux alternances hydriques sans aucun souci au niveau mécanique. Il resterait cependant à vérifier que le matériau constitutif de l'assemblage puisse résister à des cycles de variations d'humidité et à un contact permanent avec l'eau (utilisation d'acier inoxydable ou galvanisé,…).

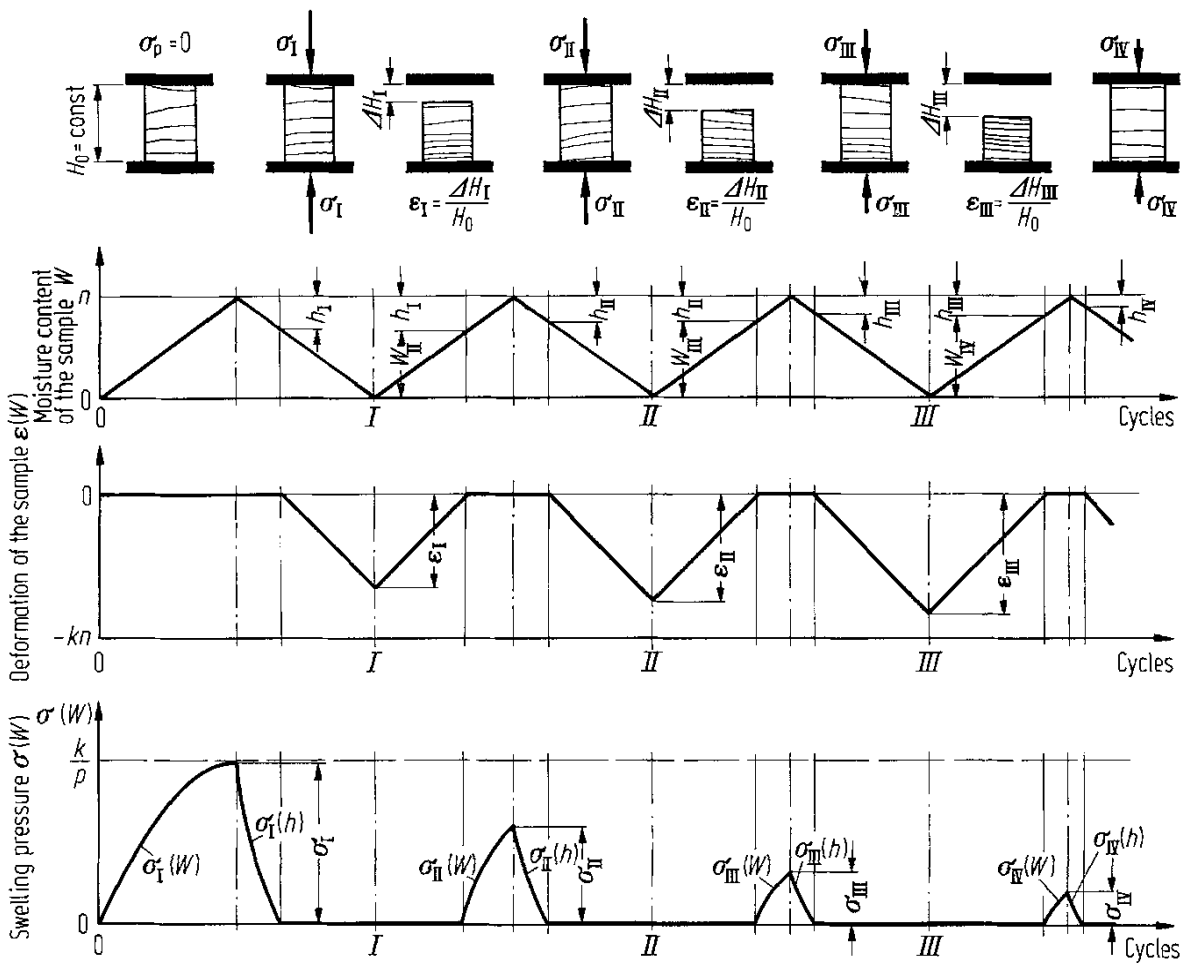


Figure 3 : Déroulement des expériences, d'après Perkitny (1960)

Nota Bene : Une synthèse de ces modèles phénoménologiques existants dans la littérature a été réalisée par Randriambolona en 2003, et fait figure de référence dans ce domaine [12].

2.4. Travaux de Bengt Persson

Dans cette étude une partie des essais a été réalisée sur du bois densifié. Le traitement de densification permet d'augmenter considérablement les propriétés mécaniques du matériau. Celle-ci consiste à comprimer un bois dans la direction transversale sous conditions de vapeur saturante à différentes températures.

Une étude menée en 1980 par Scharfetter [11] montre qu'un bois densifié aura des variations dimensionnelles plus importantes, les forces exercées lors du gonflement seront donc d'autant plus grandes. En effet à la fin de la densification on peut considérer que la moitié du volume vide est supprimée, et lors de l'humidification les cellules compressées vont avoir tendance à vouloir récupérer leur forme d'origine.

Les objectifs de cette étude étaient, d'une part d'expliquer comment la pression de gonflement dans les directions transversales diffère entre le bois densifié et le bois non traité. Et d'autre part de développer un modèle permettant de prédire la pression de gonflement des bois densifiés ou non. Etant donné que le gonflement et la densification varient fortement selon l'anatomie et la densité, deux essences ont été étudiées, le pin et le bouleau, soit un résineux et un feuillus à pores diffus (bonne homogénéité au niveau de la densité). Nous nous intéresserons uniquement ici aux résultats obtenus pour le pin.

Les échantillons utilisés ont une section de 20 x 20 mm, ils ont été débités sur l'extérieur de la bille, il n'y a donc pas présence de bois de cœur. La plaque de chargement couvre seulement une section de 10 x 10 mm soit un quart de la surface, et elle va être centrée sur la surface supérieure de l'échantillon. La pression exercée par l'échantillon lors de son gonflement va être mesurée uniaxialement. Lors de la mise en place de l'essai, une pression de 0.05Mpa est appliquée sur l'échantillon de manière à assurer la mise à zéro initiale. On a donc une force initiale de 5N (soit une charge de 500g).

Le montage utilisé est le suivant (figure 4), nous constaterons ici que la prise d'humidité ne va pas être gérée grâce à une enceinte climatique mais à l'aide d'une immersion dans l'eau.

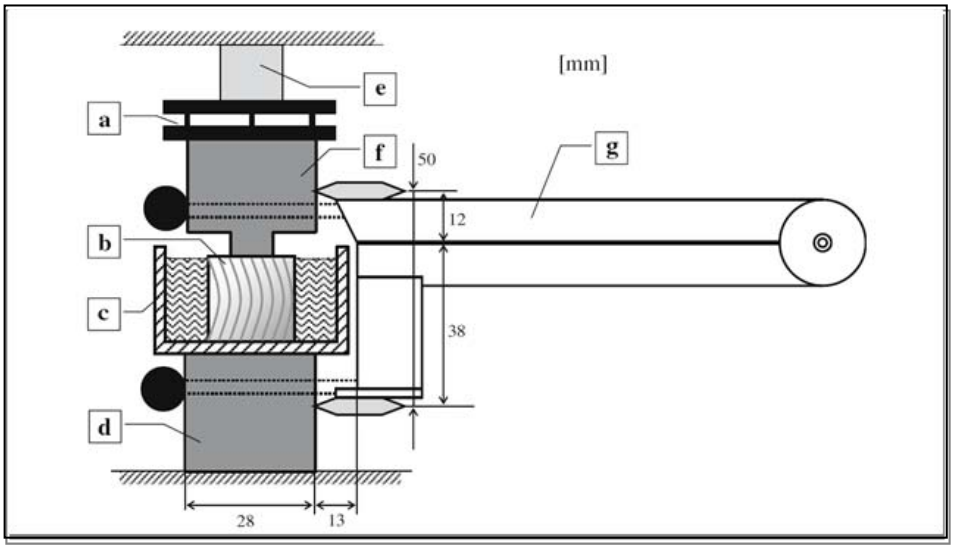


Figure 4 : Schéma du montage utilisé par Personn lors de ses expériences

Avec, par ordre alphabétique :

- **a** : Plateau flexible assurant le contact et une reprise de charge parfaite (rotulage)
- **b** : Echantillon de Pin
- **c** : Récipient permettant de contenir l'eau
- **d** : Plaque de charge inférieure
- **e** : Cellule de charge
- **f** : Plaque de charge supérieure
- **g**: Extensomètre

On notera que la densité du pin densifié est de 911 Kg/m^3 et que celle du pin non traité s'élève à 511 Kg/m^3. Cette expérience va distinguer l'effort radial de l'effort tangentiel, deux types de débit ont donc été utilisés, et nous tâcherons de faire de même pour nos expériences.

La valeur exacte des résultats n'est pas donnée aussi nous pouvons seulement nous rapprocher d'une valeur moyenne obtenue grâce au graphique. Nous avons choisi de calculer des valeurs moyennes afin de pouvoir dimensionner les capteurs de force utilisés dans notre montage d'essai. Les résultats de ces expériences sont représentés sur les figures 5 et 6 ci-dessous.

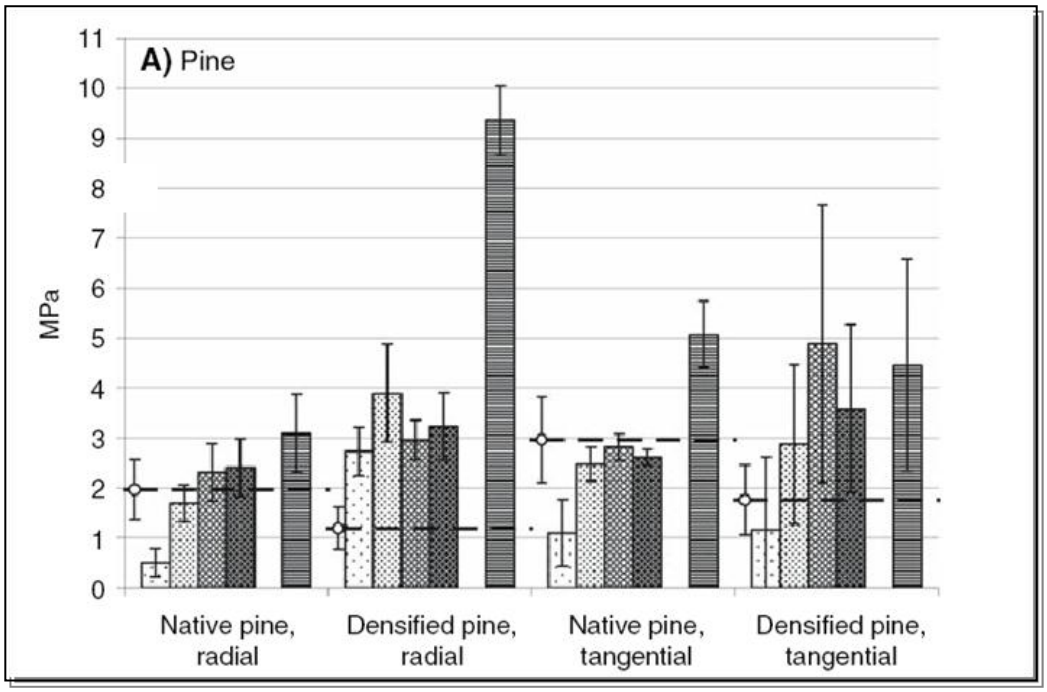


Figure 5 : Résultats des expériences de Bengt Personn pour les résineux

débit	Radial		*Tangentiel*		*Moyenne Résineux Natif*
	Native pine	Densified pine	Native pine	Densified pine	
Moyenne *(Mpa)*	1,9	4,4	2,8	3,4	
Ecart-type *(Mpa)*	0,9	2,7	1,4	1,4	
Force *(N)*	388	882	552	678	**470**

Figure 6 : Chiffrage des résultats des expériences de Bengt Personn pour les résineux

La force est calculée pour une section de 20 x 10 mm, section des échantillons utilisés pour nos expériences. Nous aurons donc besoin de capteurs pouvant reprendre une charge de plus de 50 kg. Nous détaillerons dans la partie suivante le choix des différents composant et matériels que nous avons décidé de retenir pour nos expériences.

Suite à cette étude bibliographique, plusieurs points importants ont donc été retenus :

- **L'épaisseur des échantillons doit être comprise entre 10 et 30 mm pour assurer un temps d'expérience acceptable et donc un certain nombre d'essais réels.**
- **Les cellules de charge à utiliser devront permettre de reprendre au moins théoriquement 60kg à la fin de la période d'humidification.**
- **Dans le cas d'expérience du même type que celles de Personn, il faudra penser à mettre en place un système de plateau souple ou de rotules pour assurer le parfait contact échantillon/capteurs et la bonne reprise des forces par ceux-ci.**
- **Il faudra apporter une vigilance toute particulière à la rigidité des montages expérimentaux, et s'assurer par un calibrage correct de la performance de ceux-ci.**

- PARTIE 2 - PRESENTATION GENERALE DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL.

1. CHOIX DES EXPERIENCES.

1.1. Détermination des efforts mis en jeu lors du gonflement.

Dans un premier temps nous avons décidé de concevoir un montage d'essai qui nous permettra de quantifier les efforts mis en jeu lors du gonflement du bois.

L'intérêt d'un tel montage est de pouvoir dimensionner correctement, les quincailleries qui pourraient être utilisées pour bloquer les variations dimensionnelles du bois.

Les données obtenues seront à comparer avec celle obtenues lors des expériences réalisées par Personn en 2007.

Ces valeurs devront être par la suite extrapolées, pour pouvoir être affectées à de grandes sections de lamellé-collé. Cette opération est délicate à mettre en place et contestable car le lamellé collé est constitué de plusieurs lames de bois assemblées entre elles par collage. Bien que ces différentes lames soient collées selon une même direction de fil, le comportement dynamique global de la poutre va différer de celui d'une poutre normal en massif. Cette erreur ne sera pas prise en compte dans nos analyses.



Image 4 : Echantillon utilisé pour l'expérience 1

La prise d'humidité va se faire dans la direction longitudinale, et le gonflement sera radial. Comme nous pouvons le voir sur l'image 4, les cernes de nos échantillons seront parallèles à la surface en pression

1.2. Comparaison de différentes solutions techniques.

1.2.1. Présentation des trois types d'assemblage.

Une première approche du blocage mécanique des hygrovariations du bois est faite grâce à l'utilisation de trois solutions techniques.

Deux d'entre elles utilisent la quincaillerie fournie par l'entreprise SFS, afin de voir si des composés standards peuvent être utilisés pour ce type d'attente. La troisième solution est un système par boulonnage simple.

Nous avons utilisé les types de quincaillerie suivant :

- Vis SFS SPT/33 -7.3- 4.8 x 38 – GS. (Voir plan de la vis en annexe)
- Boulons 6 x 80 mm
- Ecrous de 6 mm
- Fers plats de 4 x 20 x 200 mm.

Présentation des différents montages

➢ Montage avec vissage linéaire :

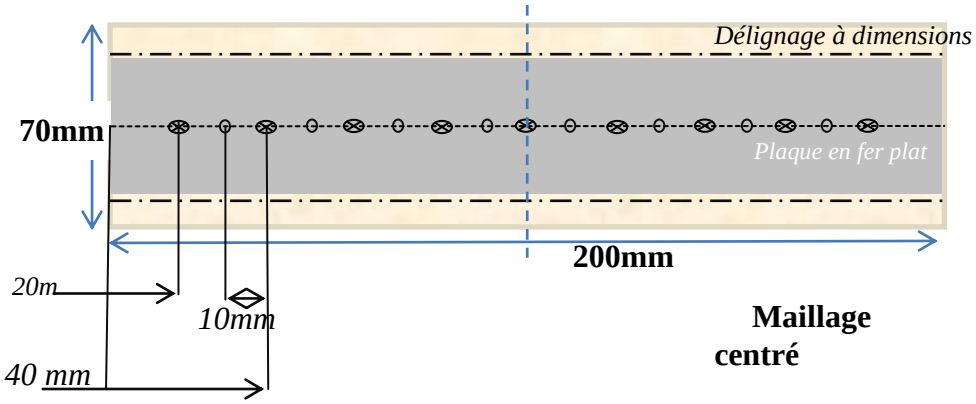


Figure 7 : Schéma de perçage de la solution en vissage linéaire

L'image 5 présente le rendu final de cette première solution technique. Deux échantillons ont été réalisés.
Les vis SFS sont placées en ligne tout au long de l'échantillon. La même plaque est vissée sur la face opposée de l'éprouvette (image 5).



Image 5 : Photo d'un échantillon avec vissage linéaire

- Montage vis en quinconce :

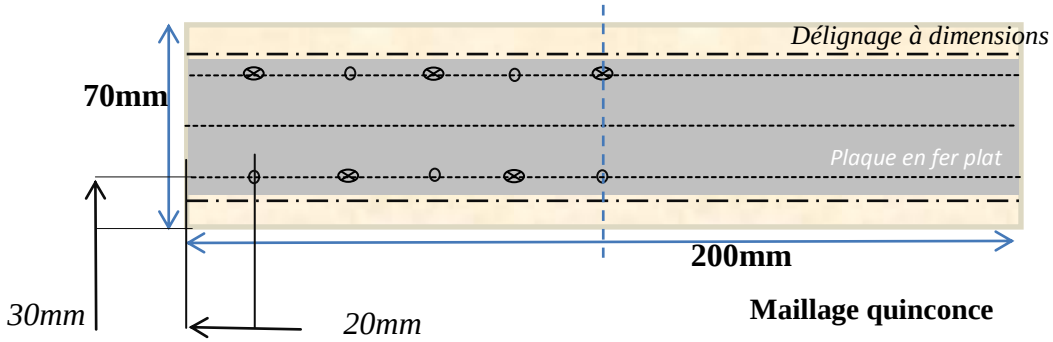


Figure 8 : Schéma de perçage de la solution avec vissage en quinconce



Image 6 : Photo d'un échantillon avec vissage en quinconce

Dans ce montage présenté par la figure 8 et l'image 6, nous utilisons toujours des vis SFS, deux échantillons ont été réalisés.

Pour les deux types d'assemblage présentés ci-dessus nous pouvons constater une différence entre les échantillons réalisés et les échantillons que nous avions prévu de fabriquer. Le délignage final n'a pas pu être réalisé car il comportait trop de risque vis-à-vis de la détérioration des machines. En effet, les plaques métalliques ne sont pas parfaitement parallèles aux surfaces extérieures et sont légèrement décalées les unes par rapport aux autres. Nos quatre éprouvettes ont donc une section de 50 x 200 mm.

- Montage avec boulons :

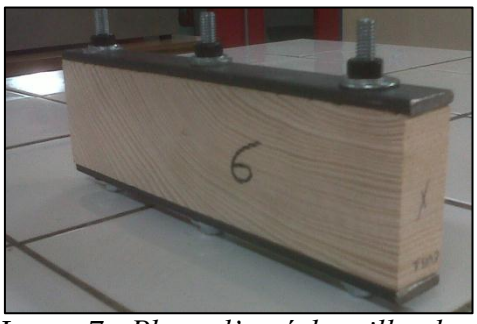


Image 7 : Photo d'un échantillon boulonné

Deux échantillons de ce type ont été réalisés. Comme nous pouvons le voir sur l'image 7, nous avons placé trois boulons par plaque, ici la plaque métallique arrive à fleur du bois. Les risques de fissure étaient plus faibles (non présence de vis), aussi nous avons débité l'échantillon directement à dimensions.

Nous avons donc réalisé 8 éprouvettes dont deux témoins où aucun dispositif de blocage n'a été mis en place. Ces témoins nous ont permis de vérifier les équilibres d'humidité et d'avoir les retraits non contraints. On notera que la section de ces échantillons est la même que celle des échantillons contraints avec les vis soit 50 x 200 mm. Tous les échantillons réalisés pour les différentes expériences sont en épicéa et proviennent de la même génératrice.

1.2.2. Etapes de fabrication

La fabrication s'est articulée selon deux niveaux, usinage des plaques de fer plat et débit des échantillons en épicéa.

- Fabrications des plaques :

Nous avons tout d'abord coupé 6 plaques de 4 x 20 x 200 mm à l'aide d'une scie à ruban pendulaire. Le perçage effectué après poinçonnage a été fait à la perceuse à colonne. La précision est relativement limitée aussi nous avons dû porter une attention particulière aux perçages effectués pour les échantillons en quinconce. En effet, un perçage de 5mm est réalisé à 5 mm du bord de la plaque, nous avions donc seulement 2,5 mm de fer restant.

- Débit des échantillons d'épicéa :

Nous avions dans un premier temps réalisé des échantillons ayant une épaisseur de 20mm pour que les plaques de fer soient à fleur avec le bois, mais malgré les pré-perçages, le bois se fissurait lors de la mise en position des vis (image 8).

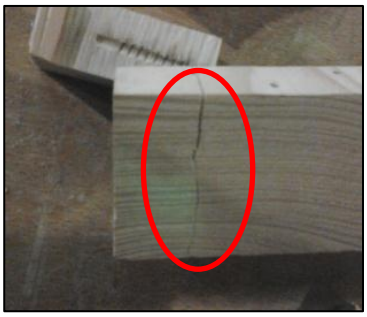


Image 8 : Photo des fissures apparues lors du premier essai de montage

L'épaisseur finalement débitée est donc de 30mm, nous pouvons constater que l'épaisseur de nos échantillons est dans le sens longitudinal et ce pour augmenter le coefficient de diffusion (et donc avoir des temps de stabilisation à une humidité donnée plus faibles). On notera que chaque échantillon va être soumis à un gonflement purement radial et à un gonflement couplé radial/tangentiel.

Nous avons distingué ces deux zones sur la photo ci-dessous :



Image 9 : Présentation des zones de gonflement

- Pré-perçage des échantillons :

Afin d'obtenir une bonne précision, nous effectué les différents perçages bois à la perceuse à colonne (Image 10). Nous avons pré-percé à un diamètre de 4mm pour la mise en place des vis ayant un diamètre de 4,8 mm. Pour la mise en place des boulons les perçages ont été réalisés à un diamètre de 10 mm.



Image 10 : Photo présentant le pré perçage des échantillons

Nota bene : Il aurait été intéressant de disposer d'une clef dynamométrique lors de l'assemblage afin de déterminer le couple de serrage et donc estimer à quel niveau nous avons précontraint nos échantillons boulonnés.

2. CONCEPTION DU MONTAGE D'ESSAI.

Dans cette partie nous allons nous intéresser au montage permettant de réaliser l'expérience n°1. Nous avons conçu ce montage en nous basant sur les essais déjà réalisés ainsi que sur le compte rendu de réunion effectué en début d'année avec M. Romain Rémond, M. Bocquet et M. Varacca.

2.1. Présentation du montage d'essai :

Dans un premier temps nous allons brièvement présenter le principe du montage d'essai à l'aide d'une modélisation 3D réalisée sur le logiciel Autodesk Inventor.

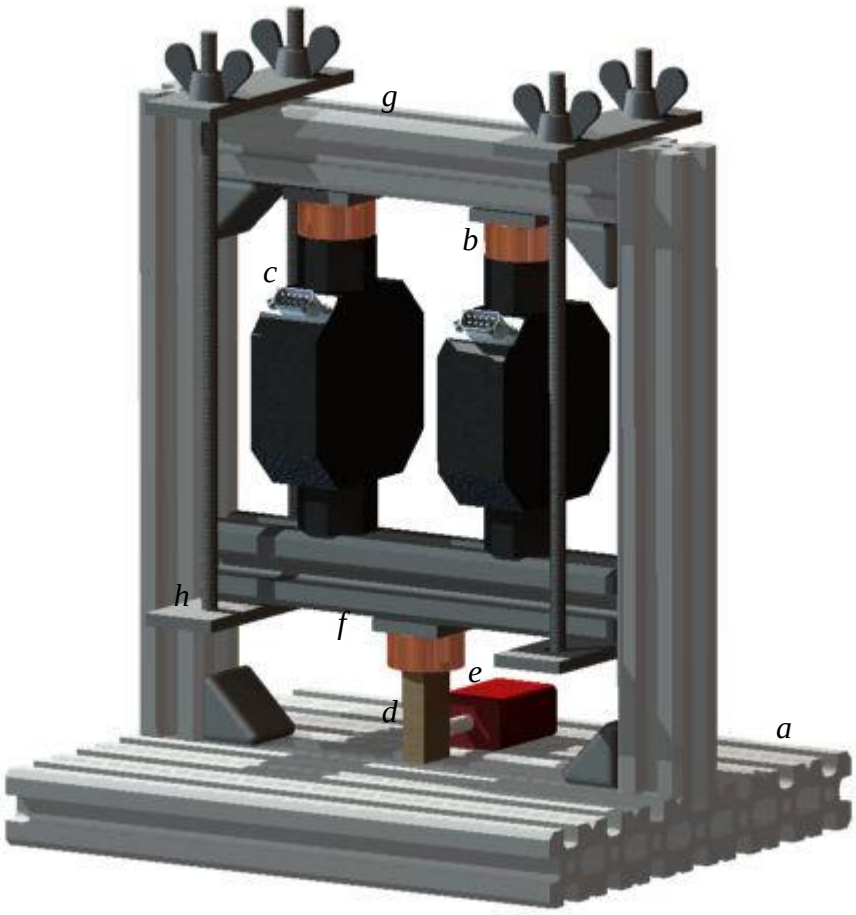


Figure 9 : Description 3D du montage d'essai

La figure 9 va mettre en évidence les différentes parties du montage, le socle du bâti **a** va permettre de venir encastrer les montants sur lesquels on viendra fixer la traverse **g**. La traverse **f** est mobile et est en contact direct avec les deux capteurs de force et une rotule. Les rotules (élément **b**) vont permettre de reprendre la totalité des efforts (3 rotules sont présentes sur notre montage). L'ensemble **h** comprenant deux plaques de fer plat et deux tiges filetées va permettre de maintenir le contact entre les traverses **f**,**g** et les deux capteurs de forces **c**. Ces deux ensembles vont aussi assurer la tenue du montage lors d'un éventuel retrait. Une fois les capteurs précontraints, le contact avec l'échantillon est assuré en descendant l'ensemble traverses/capteurs. L'échantillon **d** est directement posé sur le bâti, et le potentiomètre **e** va venir mesurer la déformation tangentielle.

Ce montage ne nous permet de mesurer que l'évolution des forces de gonflement, les efforts exercés lors du retrait de l'échantillon ne peuvent être quantifiés. Nous avons donc ici un retrait totalement libre.

2.2. Etape de fabrication.

2.2.1. Fabrication de la structure

La structure a été fabriquée à l'aide de profilés en aluminium ELCOM (figure 12), ces barres d'aluminium de section 30 x 30 mm, ont été coupées à la scie à métaux. L'assemblage est assuré par des équerres pouvant être glissées dans le rail des profilés.

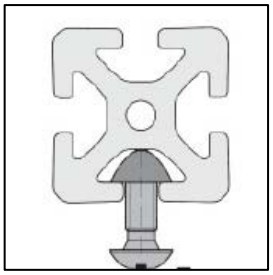


Figure 10 : Vue en coupe d'un profilé ELCOM et du système d'assemblage

Le socle du bâti est constitué lui aussi d'un profil ELCOM ayant une section de 90 x 30 mm.

Ces profilés ont une utilisation relativement aisée et permettent d'avoir une grande flexibilité lors de la conception du montage. En effet les mises à longueur sont rapides à effectuer et l'assemblage en angles droits se fait aisément par des connecteurs spécifiques de la marque.

2.2.2. Fabrication des rotules

Pour optimiser au maximum la récupération des charges mécaniques induites par le gonflement, nous avons dû réaliser 3 rotules, une pour chaque capteur de force et une pour venir en contact avec l'échantillon.



Image 11 : Rotules utilisées

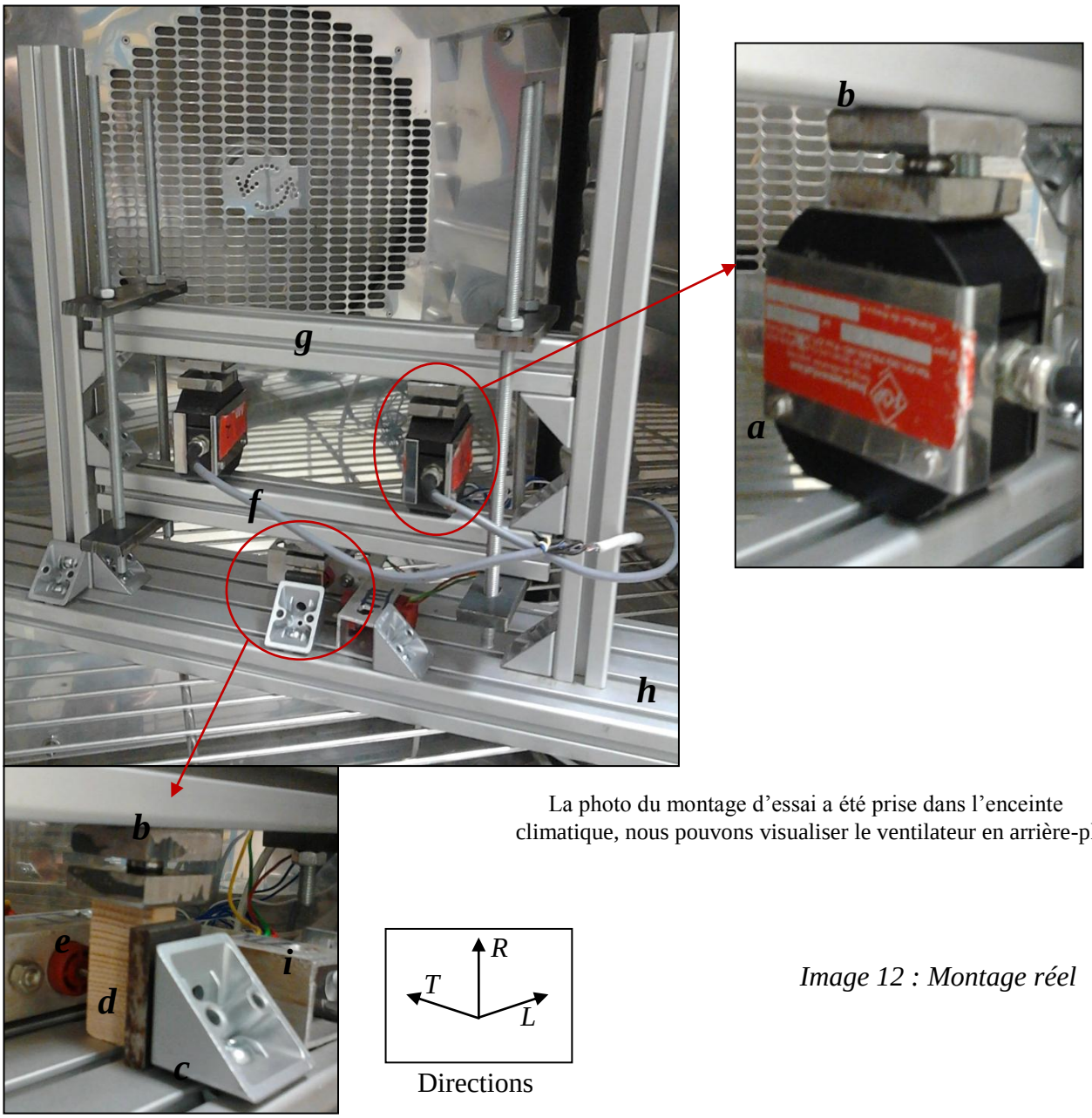
Nous avons fabriqué les rotules présentées dans l'image 11 à l'aide de plaques d'acier ayant une épaisseur de 5 mm et de billes de roulement. Six plaques de 30 x 30 mm ont été découpées au chalumeau oxycoupeur et ont été fraisées en leur centre pour assurer le logement de la bille dans deux cônes.

2.2.3. Matériel de mesure (cf §3)

Nous n'avons pas réellement choisi les différents capteurs utilisés. En effet, nous avions à notre disposition des capteurs de force de 50 daN et des potentiomètres (résistance variable).

Nous avons aussi mis en place deux potentiomètres pour évaluer la déformation de notre échantillon afin de suivre l'évolution de la surface sous pression. En effet, pour déterminer la pression exercée par l'échantillon lors de la prise d'humidité, nous devons connaître la valeur de la surface en contact avec la rotule. Cette valeur va évoluer au cours du temps car l'échantillon va se déformer tangentiellement et longitudinalement. On notera que la valeur du déplacement longitudinal est très faible voir négligeable si on la compare aux déplacements radial et tangentiel.

2.3. Présentation du montage réel.



La photo du montage d'essai a été prise dans l'enceinte climatique, nous pouvons visualiser le ventilateur en arrière-plan

Image 12 : Montage réel

Figure 14 : Montage réel

Légende

Matériel :

a : Capteur de force FGP instrumentation.

b : Rotule.

c : Equerre de fixation.

d : Echantillon d'épicéa.

e : Potentiomètre permettant de mesurer la déformation tangentielle.

f : Traverse basse mobile.

g : Traverse haute fixe.

h : Bâti.

i : Potentiomètre permettant de mesurer la déformation longitudinale.

Directions :

R : Direction Radiale

L : Direction tangentielle

T : Direction longitudinale

On notera que le potentiomètre mesurant les variations dimensionnelles dans le sens longitudinal assure juste le maintien en position de l'échantillon, aucune donnée ne sera enregistrée. On mesurera uniquement la déformation radiale, on considère que l'échantillon n'a qu'une seule mobilité possible.

3. ESSAIS DE CALIBRAGE DU MONTAGE EXPERIMENTAL.

Comme nous l'avons vu dans l'étude bibliographique, nous devons apporter un soin tout particulier à la rigidité de notre montage.

Les essais de calibrage se sont déroulés en deux phases : les essais d'étalonnage des différents capteurs et les essais de calibrage du montage en tant que tel.

L'étalonnage des capteurs a été nécessaire du fait que le signal renvoyé par ceux-ci est un signal analogique. Il était donc nécessaire de déterminer quelle variation de voltage (résistance) correspondait à une charge (un déplacement) donnée, afin de rentrer ces données dans le boîtier d'acquisition et de permettre une lecture directe de la force exercée par l'échantillon et de la variation dimensionnelle de celui-ci.

3.1. Etalonnage des capteurs de force

Les capteurs utilisés sont des cellules de charge de la marque FGP Instrumentation, mise à notre disposition par Mr Rémond (Image 13). Leur capacité est de 50 daN chacune, ce qui nous autorise en théorie une charge de gonflement maximale admissible de 100 kg.



Image 13 : Cellule de charge FGP 50 daN

Leur fonctionnement est très simple. Les cellules de charge à jauge de déformation convertissent la charge qui agit sur elles en signaux électriques. Les jauges (ici un Z métallique) sont scellées sur une partie de la structure qui se déforme quand un poids est appliqué. Lorsqu'un poids est exercé sur la jauge, la déformation change la résistance électrique des jauges en proportion à la charge.

Nous avons pour cet essai utilisé les machines de la dalle de mécanique, et plus particulièrement l'INSTRON 4467.

En appliquant successivement une charge de 5 kg et de 50 kg sur un ensemble traverse/capteurs (image 14), nous avons ainsi obtenu les valeurs qui nous étaient nécessaires. C'est à ce moment que nous avons commencé à avoir un souci, du fait que les deux cellules de charges ne renvoyaient pas les mêmes valeurs (l'un des deux possédait un offset d'environ 25% de sa capacité totale). La solution a été de brancher les deux cellules sur le même boîtier pour simplement sommer les deux tensions. Nous avons cependant perdu en charge maximale admissible (celle-ci étant descendue à environ 50 kg), mais cela devrait s'avérer suffisant d'après l'étude bibliographique.



Image 14 : Calibrage des cellules

3.2. Etalonnage du potentiomètre

L'autre type de capteur que nous avons utilisé durant ce projet est une jauge de déformation potentiométrique. Celle-ci va renvoyer une valeur de résistance, variable suivant la longueur de sortie de la tige par rapport au corps du capteur. Le fonctionnement de ce capteur est ici aussi linéaire, mais il était nécessaire d'obtenir la courbe d'étalonnage.

Nous avons procédé avec un trusquin et un ohmmètre, et nous avons obtenu la courbe suivante (en supprimant les valeurs extrêmes de début et fin de course, sujettes au bruit) :

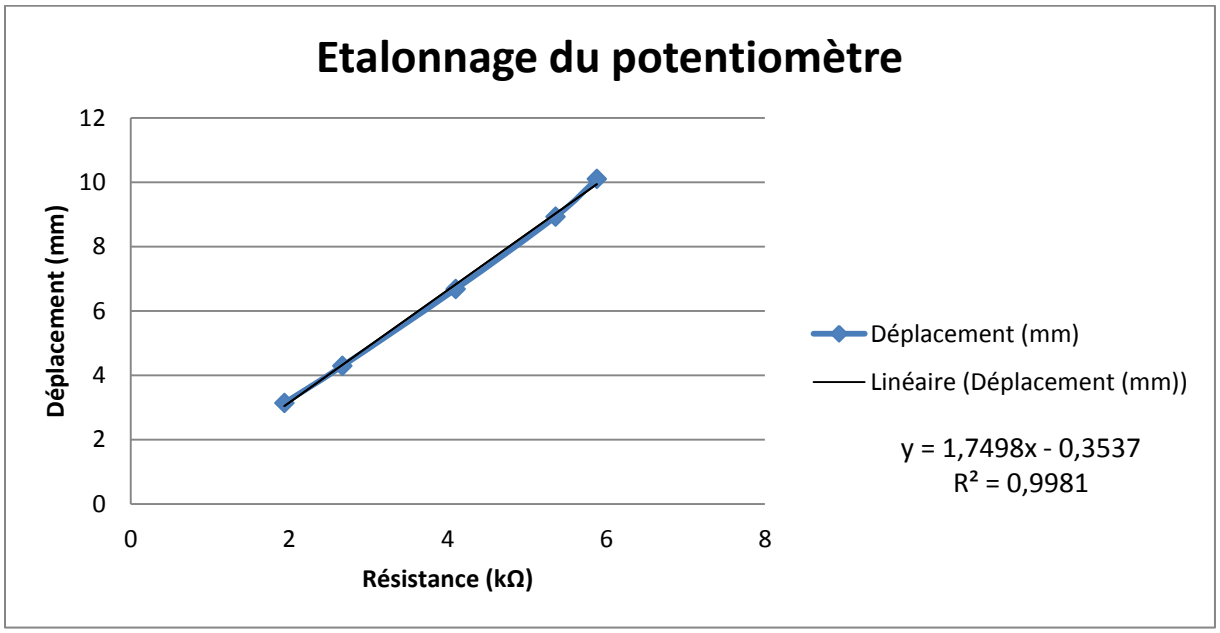
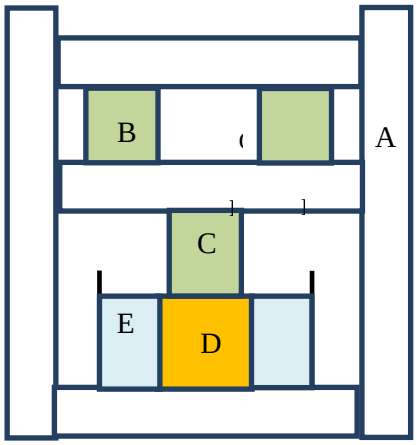


Figure 11 : Etalonnage du potentiomètre

Avec cette équation qui nous fournit le déplacement en fonction de la résistance renvoyée par le potentiomètre (que nous récupérerons sur la centrale d'acquisition).

3.3. Calibrage thermique.

Cette partie concerne maintenant la rigidité du bâti en lui-même. Dans les essais mécaniques de ce type, il est coutume de mesurer les efforts repris par les capteurs en les comparants à la valeur théorique obtenue par le calcul pour l'élévation de température d'un échantillon dont le coefficient de dilatation thermique α est connu (du cuivre par exemple). Pour ce faire, le montage est le suivant :



Avec :

- A : bâti
- B : rotule + capteur
- C : rotule
- D : échantillon
- E : bain thermostaté

Figure 12 : Calibrage thermique (principe)

Protocole :

- Mettre en place l'échantillon et le montage
- Introduire l'eau dans le bac
- Brancher les différents capteurs, mesurer Tini
- Mettre en place le chauffage
- Attendre T=80°C, attendre $\tau = e^2/(\frac{\lambda}{\rho * Cp})$ secondes
- Récupérer F_{exp} obtenu par acquisition
- Comparer F_{exp} et F_{th} (obtenue par calcul grâce à α, la section de l'échantillon et la loi de Hooke)

Résultats (2 cas) :

- Si Fexp et Fth sont très proches, le bâti ne se déforme pas, l'expérience valide l'hypothèse
- Si les valeurs sont différentes, rechercher les causes possibles (bruit, précision du capteur,…)

Or ici un problème est apparu, c'est que les dimensions d'échantillons utilisables dans notre montage permettent théoriquement de récupérer une force de l'ordre quelques centaines de grammes. Soit moins de 1% de la charge admissible par les capteurs, c'est-à-dire dans la zone de mesure où ceux-ci ne sont pas utilisables car les résultats sont trop approximatifs (bruits, hystérésis…).

Etant dans l'impossibilité de réaliser ce calibrage thermique, nous avons décidé de réaliser un calibrage mécanique de notre montage pour néanmoins être sûrs de la validité de nos résultats.

3.4. Calibrage mécanique.

Pour ce calibrage, nous sommes retournés sur l'INSTRON 4467. Nous avons amené notre montage et le boîtier d'acquisition à proximité (pour que les échantillons de chaque machine bénéficient des mêmes variations d'hygrométrie), et avons lancé les expériences avec des échantillons en sortie d'étuve (voir image 15). Ces vues montrent un échantillon sur la machine et les résultats obtenus après mise à 12% d'humidité d'équilibre (la valeur de déplacement est la valeur initiale après la mise en position, la réinitialisation au lancement de l'expérience n'ayant pas marché).

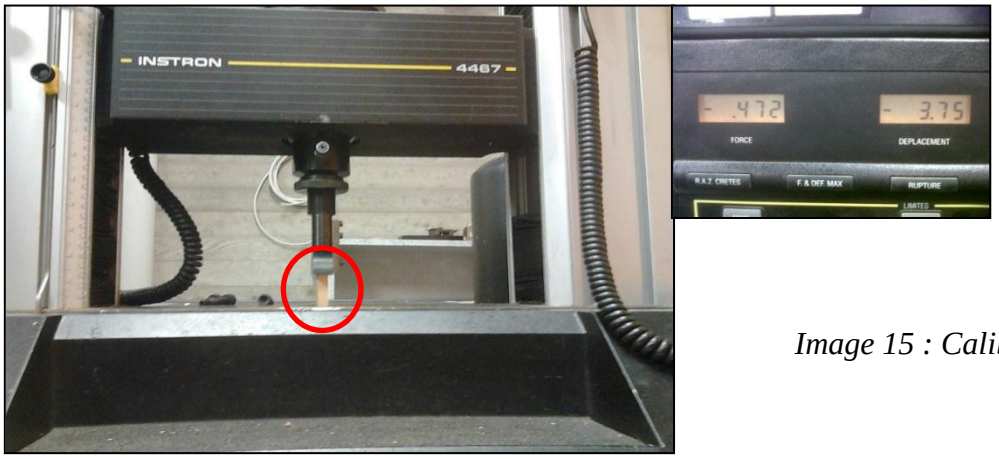


Image 15 : Calibrage des cellules

Les résultats sont les suivants :

Essai	$F_{Instron}$ (kN)	$F_{Montage}$ (kN)	Différence (kN)	H_{eqb} (%)
1	*0,286*	*0,124*	**0,162**	*9,37*
2	*0,275*	*0,112*	**0,163**	*9,34*

Figure 13 : Calibrage des cellules de charge

On peut remarquer que pour les 3 essais, on obtient un écart de force reprise d'environ 10kg. Cela viendrait à priori du fait que les cellules de charge, en se déformant (principe de base de leur fonctionnement), ou alors le bâti, vont permettre à l'échantillon de gonfler et ne vont donc pas reprendre la totalité de la charge. A contrario, les machines INSTRON sont conçues de telle façon que leur bâti et systèmes de mesure sont considérés comme indéformables, ce qui permet de reprendre la totalité des efforts.

Nous observons donc une erreur constante de près de 160 N sur nos essais. On peut donc en conclure que notre montage présente un défaut de rigidité flagrant, lié à la structure ou aux capteurs. Les résultats risquent donc d'être inférieurs à la réalité, et nous reviendrons sur les causes et solutions à ce problème ultérieurement dans ce rapport.

4. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX.

4.1. Choix des conditions d'expérience et du matériel adéquat.

Suite à l'entretien avec Mr Varacca, nous avons appris que l'humidité des bois constituant les ponts variait entre 12% et 17% au cours de la mise à l'équilibre. Pour notre expérience, l'idéal aurait donc été de faire subir à nos échantillons la même variation. Mais pour que les variations dimensionnelles de notre échantillon soient mesurables de manière précise (afin de corriger la section et donc la force exercée), nous avons choisi de faire subir à nos échantillons une variation de 10%, entre 8% et 18% et à une température de 20°C pour rester dans des conditions proches de la réalité.

Le choix des isothermes de sorption de Stamm [13] pour l'épicéa s'est donc imposé pour la détermination des conditions expérimentales (voir figure 15 ci-jointe, annexe 1 en taille réelle). Nous obtenons les résultats suivants :

Heqb bois (%)	Hr (%)	T (°C)
8	*42*	*20*
18	*86*	*20*

Figure 14 : Conditions expérimentales

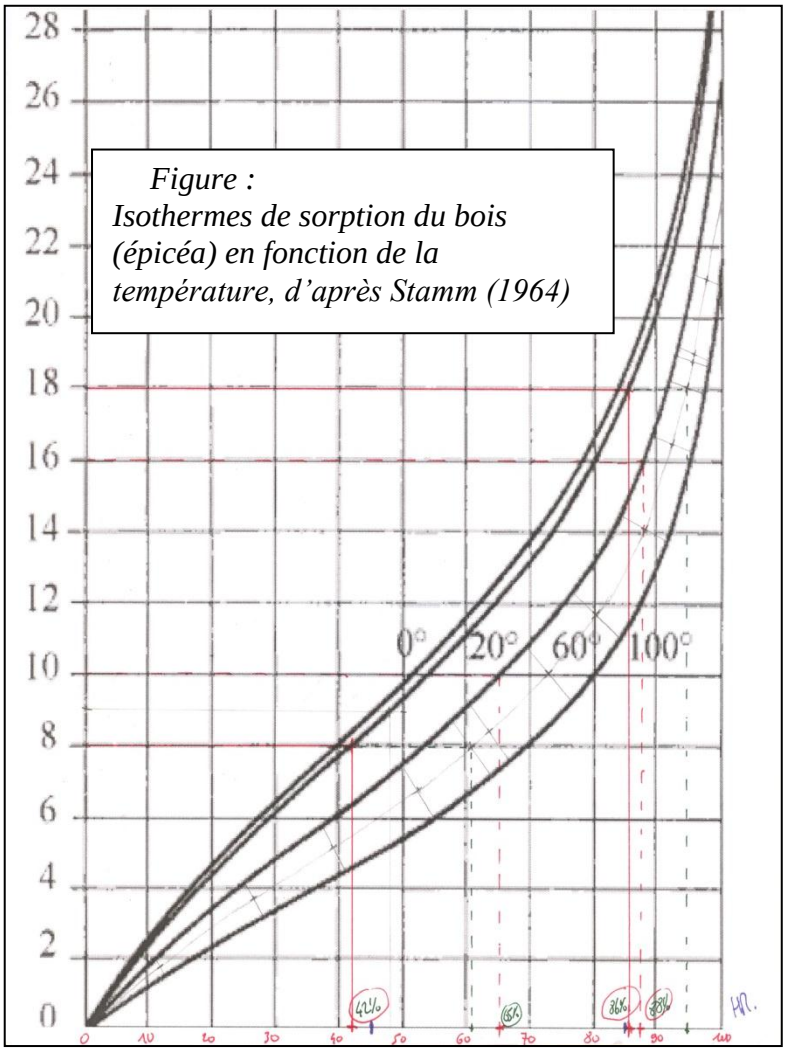


Figure :
Isothermes de sorption du bois (épicéa) en fonction de la température, d'après Stamm (1964)

Figure 15 : Conditions expérimentales

4.2. Protocole expérience n°1.

➢ Choix des échantillons

Pour cette expérience, les échantillons d'épicéa utilisés seront de la forme suivante :

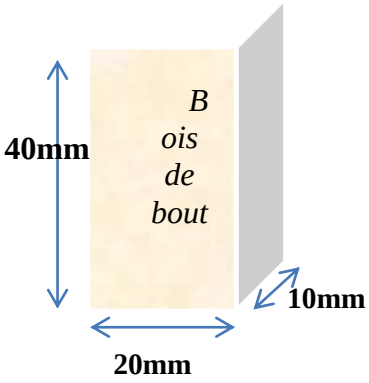


Figure 16 : Echantillons de type 1

Ce choix s'impose par le délai de mise à l'équilibre des échantillons, et permet de faire un compromis entre déformations observables et temps d'attente. Nous utiliserons un échantillon témoin pour chaque expérience, qui nous permettra de suivre par des pesées régulières (toutes les heures pour l'expérience 1 et toutes les 24 h pour l'expérience 2) la variation de l'humidité. Nous considérerons ici qu'une variation de moins de 1% entre deux pesées (répétée deux fois) montre que l'équilibre est atteint, et nous prendrons garde à utiliser un système de pesée qui dérange le moins possible l'atmosphère contrôlée de l'enceinte (ici une petite trappe permettant l'accès au témoin sans ouvrir réellement l'enceinte).

Les humidités seront calculées par la formule suivante [14] :

$$H = \frac{m_h - m_0}{m_0}$$

Pour étudier les variations dimensionnelles, nous prendrons comme approximation que les coefficients de gonflement de l'épicéa peuvent être assimilés aux coefficients de retraits.

➢ Manipulations

- *Débit des échantillons*
- *Mise en place du dispositif*
- *Introduction du dispositif dans l'enceinte et branchement des capteurs*
- *Mise en route des cycles de variations hygrométriques : stabilisation à 8% puis humidification jusqu'à un équilibre de 18%*
- *Enregistrement et analyse des résultats*

- Résultats et analyses à effectuer
    - *Etude de la pression et de la force de gonflement en fonction de l'humidité*
    - *Etude de la variation dimensionnelle de l'échantillon*
    - *Etude de la prise d'humidité en fonction du temps*
    - *Discussion sur les valeurs obtenues, critique éventuelles de celles-ci*

4.3. Protocole expérience n°2.

- Choix des échantillons
    - Cf §1.2.

- Manipulations
    - *Débit des échantillons*
    - *Mise en place du dispositif*
    - *Introduction du dispositif dans l'enceinte et branchement des capteurs*
    - *Mise en route des cycles de variations hygrométriques : stabilisation à 8% puis humidification jusqu'à un équilibre de 18%*
    - *Enregistrement et analyse des résultats*

- Résultats et analyses à effectuer
    - *Etude de la prise d'humidité des échantillons*
    - *Comparaisons géométriques : analyses dimensionnelles des déformations entre les différentes solutions et par rapport aux témoins*
    - *Comparaisons microscopiques : analyse des défauts et dégradations observables en surface et en profondeur dans le bois (cisaillement,...)*

- Discussion sur nos expériences, défauts des méthodes utilisées.

Les protocoles étant maintenant définis, nous allons pouvoir exposer les résultats obtenus au cours de ces deux expériences. Quelques soucis d'ordre matériels firent leur apparition durant les essais, mais le fonctionnement général et les résultats n'en furent pas affectés.

4.4. Dispositif expérimental



Image 16 : ensemble du dispositif

Nomenclature :

a : Enceinte climatique

b : Sortie du câblage par un orifice étanche spécialement conçu dans cette optique

c : Boîtier de pilotage de l'enceinte climatique, réglage de l'humidité relative et de la température

d : Boitier d'acquisition pour les capteurs de force (donnée en N)

e : Centrale d'acquisition, récupération des données du potentiomètre (kΩ) et des données du boitier d'acquisition des capteur de force (V).

- PARTIE 3 - ANALYSE DES RESULTATS.

1. EXPERIENCE N°1.

1.1. Présentation des résultats :

Au cours de cette expérience, les efforts de gonflement et la variation dimensionnelle dans la direction tangentielle auraient dû être enregistrés par la centrale d'acquisition durant les 15h d'essai. Mais en raison d'un souci lors de la définition de l'échelle sur la centrale, nous n'avons pu enregistrer la totalité des données concernant les efforts repris par les capteurs de force. Aussi, nous avons réalisé cette expérience sur une durée de 8h30, et la variation d'humidité subie par l'échantillon a été de 8% au lieu de 10. La variation dimensionnelle a elle été suivie pendant 15h, nous pouvons constater grâce à la courbe (figure 17) montrant l'évolution du déplacement en fonction du temps que l'échantillon s'est stabilisé dimensionnellement en environ 8h.

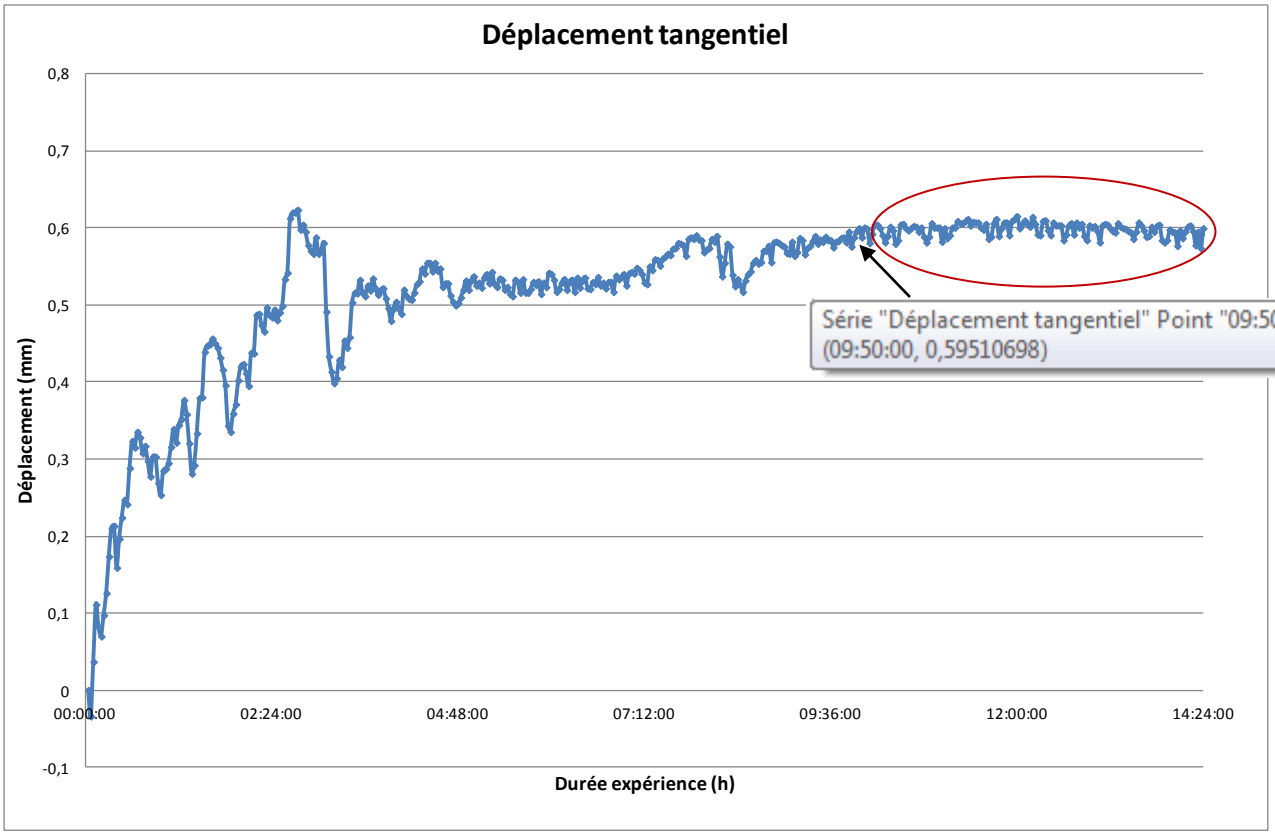


Figure 17 : Déplacement tangentiel

Le déplacement va se stabiliser autour d'une valeur moyenne de 0.6mm, la zone de stabilisation est encerclée en rouge sur la figure. Les pics observés lors des trois premières

heures témoignent d'une évolution rapide du déplacement. On constate alors que les marqueurs sont plus espacés en début d'expérience et que l'échantillon est plus réactif a la prise d'humidité.

Bien que nous n'ayons pas pu suivre en continu l'évolution de la prise de masse et donc de l'humidité d'équilibre nous avons relevé la masse d'un échantillon témoin régulièrement. Etant donné que nous n'avons pas beaucoup de valeurs de masse, il n'est pas très pertinent de tracer directement l'évolution du déplacement en fonction de l'humidité. On se propose donc de tracer l'évolution du déplacement et de l'humidité en fonction du temps (Figure 18).

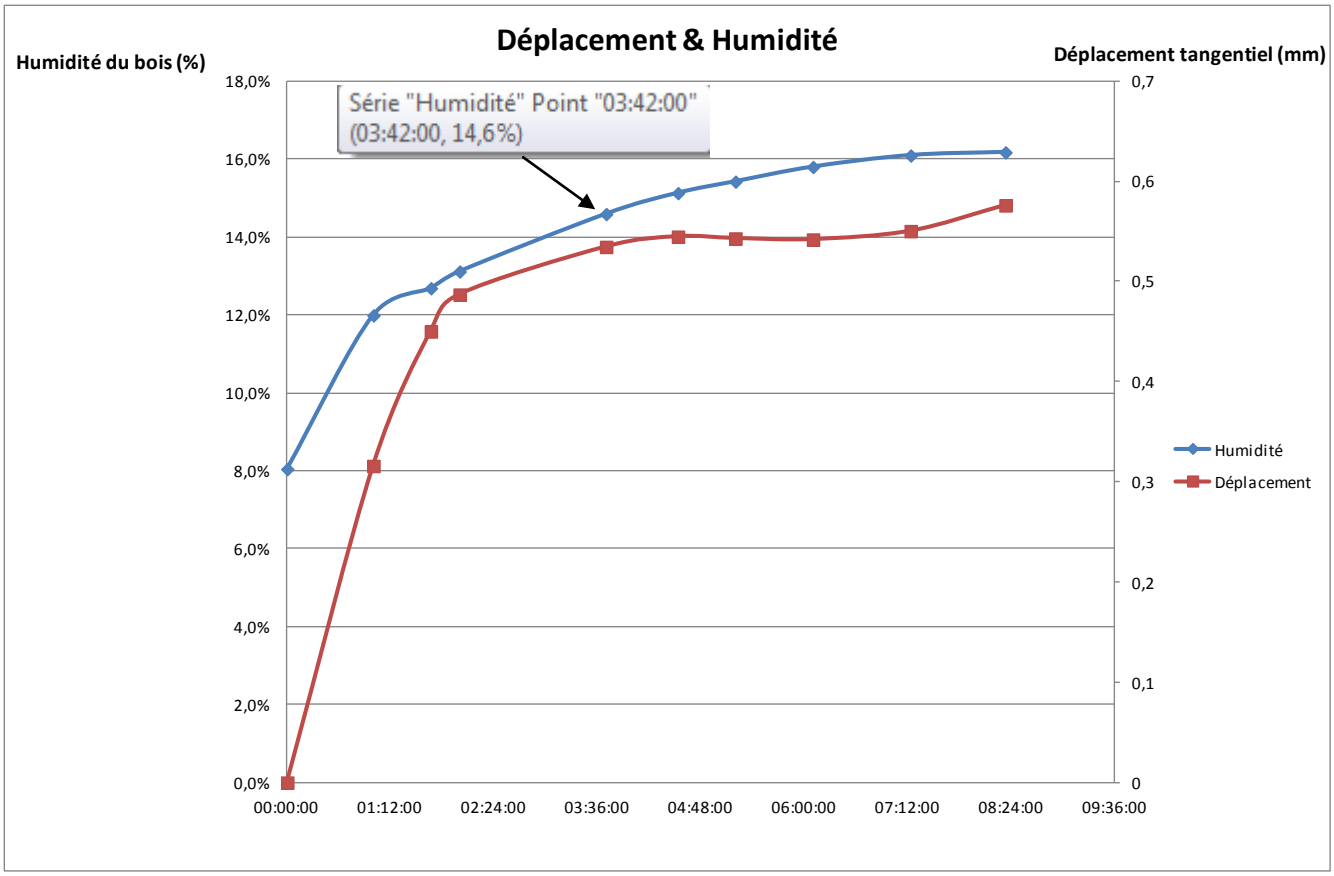


Figure 18 : Evolution de l'humidité et du déplacement

Nous pouvons constater dans un premier temps que l'humidité évolue très rapidement en début d'expérience, en effet, on constate une prise d'humidité de 6.4% en 3h42 alors que sur la fin de l'expérience la prise d'humidité sera de 1.6% sur une durée de 4h38. Le déplacement va suivre la même évolution que l'humidité, on peut voir que 4h permettent d'atteindre environ 80% du déplacement maximum.

Le déplacement maximal obtenu sur une période 15h est de 0.62mm, ce qui correspond à un coefficient de gonflement de 3%. La valeur du coefficient de gonflement calculée à partir des valeurs fournies par le FCBA est de 2.6% pour une variation d'humidité de 8.1%.

Nous pouvons émettre l'hypothèse que cette augmentation du coefficient de gonflement serait due à un flambement des parois cellulaires. On notera que ce flambement, pour une compression radiale impacte moins qu'un flambement cellulaire induit par une compression transversale.
Une deuxième hypothèse peut aussi être formulée. Le blocage pourrait induire un flambement dans la direction tangentielle de l'échantillon lié à la décohésion des fibres impliquant un glissement de matière autour d'un plan de cisaillement. Ces mouvements sont liés à un effet de poisson qui régit une contraction/extension de la matière dans les plans orthogonaux à la direction de chargement.

En utilisant les valeurs de déplacement tangentielles, nous avons pu déterminer pour chaque acquisition la valeur de la surface en contact avec la rotule (en considérant la variation dimensionnelle selon la direction longitudinale nulle). Ces résultats nous ont permis de tracer l'évolution de la pression tout au long de l'expérience. Ainsi, la figure 19 présente l'évolution des efforts et de la pression au cours du temps.

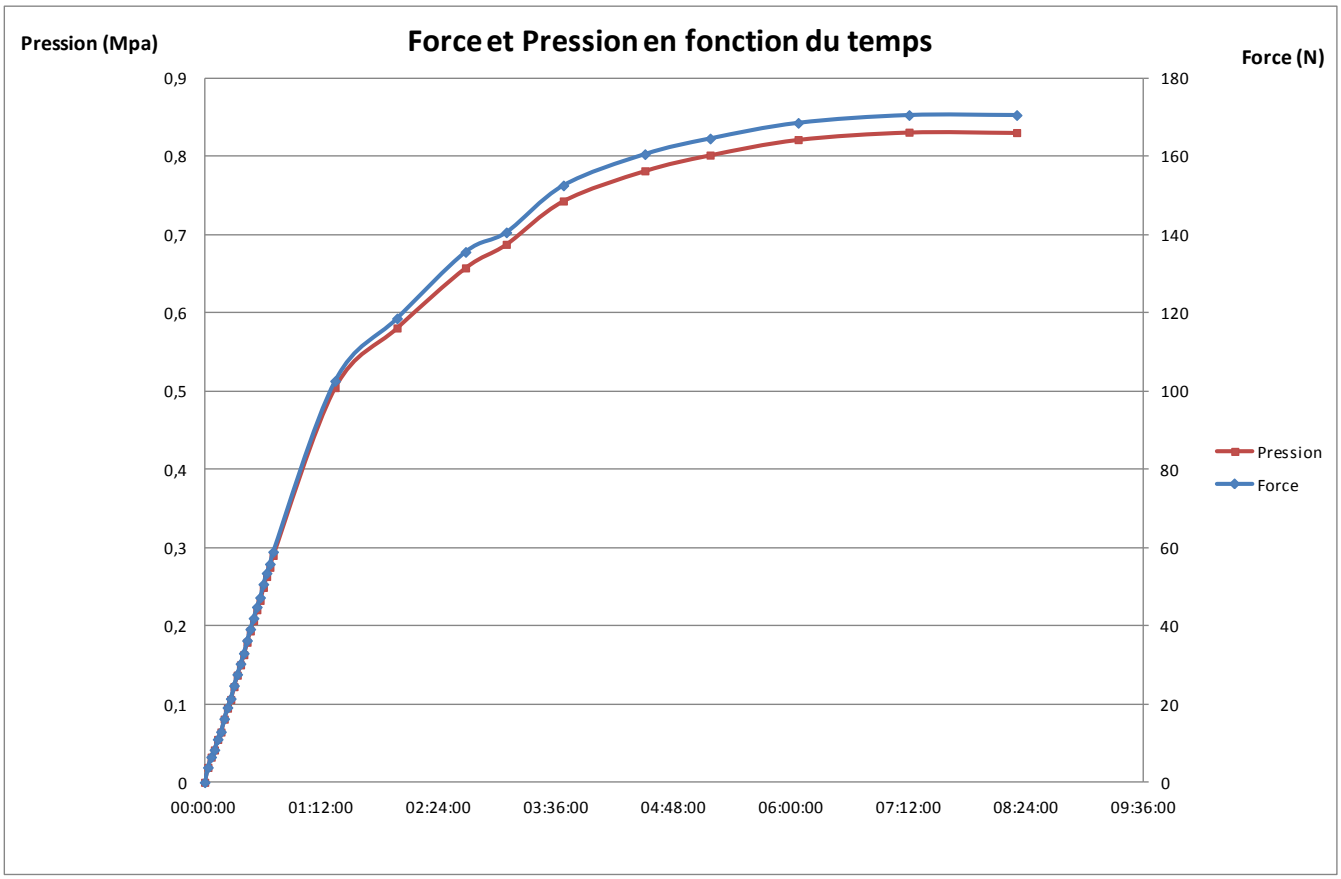


Figure 19 : Evolution de la force et la pression mis en jeu lors d'une prise d'humidité

Nous observons ici une évolution asymptotique de la force et de la pression. Une fois stabilisé à 16% d'humidité d'équilibre, on constate une force reprise par les capteurs de 170 N, ce qui équivaut à une pression de 0.83 Mpa.

Comme nous l'avons mis en évidence lors du calibrage mécanique, ce montage ne reprend pas la totalité des efforts, et une erreur non négligeable a été mise en évidence (perte de 160 N pour une variation de 9% d'humidité). Nous avons tout de même réalisé cette expérience pour mettre en évidence l'aspect dynamique du gonflement.

Dans le cadre d'un ouvrage d'art extérieur la prise d'humidité va fortement osciller durant les saisons tout en évoluant au cours des années de manière croissante. La tendance, présentée sur la figure 19, avec de rapides prises d'humidité, sera observée qu'au niveau de la surface du lamellé-collé. De plus, toute contrainte venant perturber le gonflement entraînera des phénomènes mécanosorptifs qui ne sont pas mis en évidence dans l'expérience réalisée.

2. EXPERIENCE N°2.

2.1. Etude de la prise d'humidité

En calculant le temps de mise à l'équilibre de manière approchée pour nos échantillons d'épaisseur 30 mm en bois de bout, nous avions obtenu 125h, soit 5 jours et 5h. Après avoir mesuré la masse régulièrement sur les échantillons témoins en veillant à perturber le moins possible l'atmosphère interne de l'enceinte, nous avons obtenu la courbe d'humidité suivante :

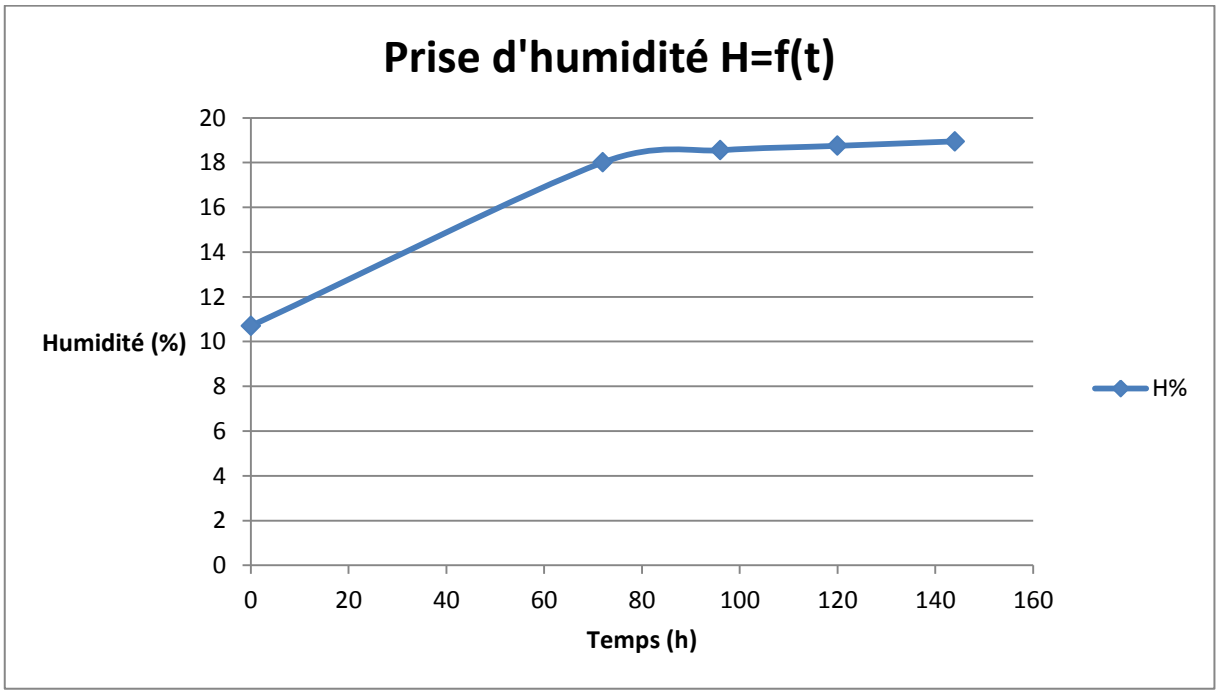


Figure 20 : Prise d'humidité de l'expérience 2

On constate que le temps réel est proche de celui calculé. On peut donc en déduire que la formule simplifiée issue de la loi de Fick permet une bonne approximation du temps de stabilisation d'une pièce de bois dans un environnement hygrométrique spécifique.

2.2. Comparaisons géométriques

Suite à cette expérience et à cette reprise d'humidité de 8.26%, nous avons pu obtenir les graphiques suivants :

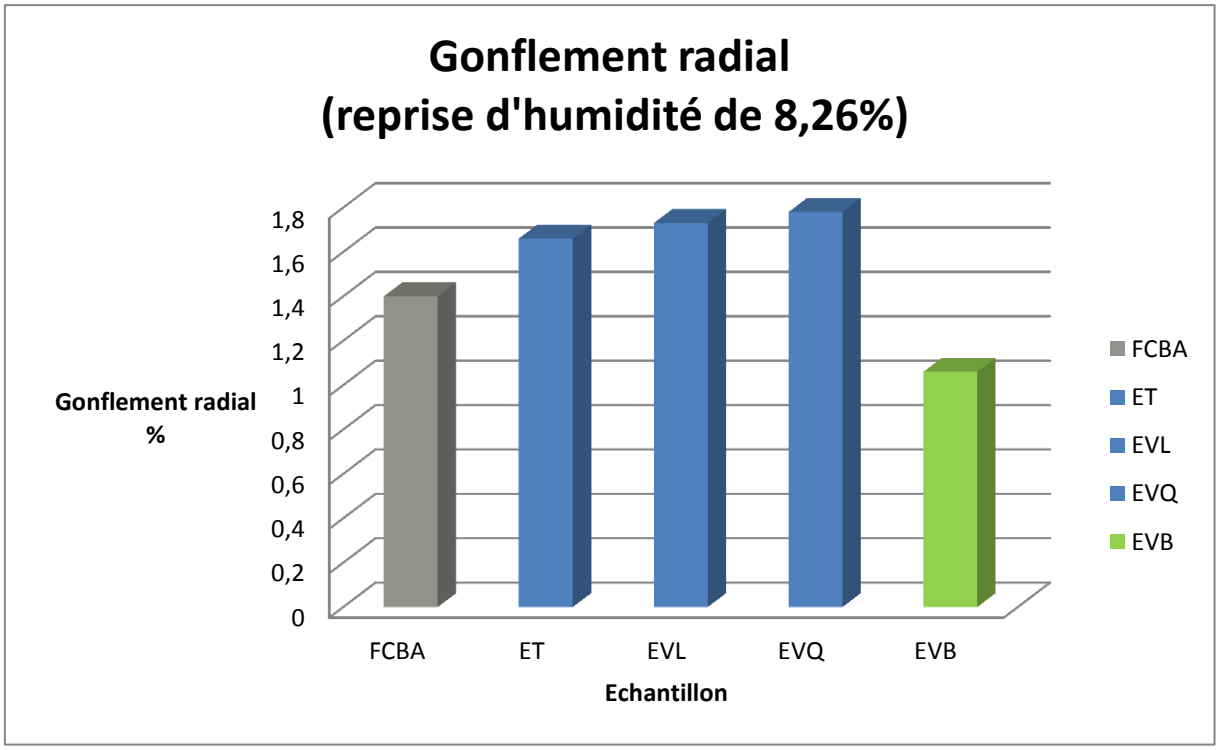


Figure 21 : Comparaison des gonflements radiaux

Sur ce graphique, on peut voir sur la gauche la valeur de gonflement radial théorique que l'on pourrait attendre pour cet essai. Elle a été calculée à partir des valeurs de coefficient de retrait données par le FCBA [16], soit 5.1% de retrait radial total pour l'épicéa.

La détermination de l'humidité par étuvage a permis d'évaluer l'humidité de départ à 10.69% et l'humidité finale à 18.95% soit 8.26% de variation. La nomenclature utilisée est la suivante :

- ET : moyenne obtenue pour les échantillons témoins (sans assemblages)
- EVL : moyenne obtenue pour les échantillons avec plaques et vissage linéaire
- EVQ : moyenne obtenue pour les échantillons avec plaques et vissage en quinconce

- EVB : moyenne obtenue pour les échantillons avec plaques et boulons

On constate tout d'abord que le gonflement des échantillons témoins est proche de cette valeur théorique, ce qui montre que le débit de nos échantillons était correct, et que la direction radiale était bien majoritairement présente pour l'expérience.

On constate aussi très nettement que concernant les trois types d'assemblage utilisés, seul l'assemblage par boulonnage est efficace pour empêcher le gonflement radial. Les assemblages par vis en lignes et en quinconce se révèlent ici inefficaces dans ce rôle, voire même contre-productif dans des proportions similaires. Une hypothèse d'explication sur ce phénomène sera donnée ultérieurement dans une autre partie de ce rapport.
Il est intéressant de noter que pour chaque type d'échantillon, les résultats étaient très proches, et que les valeurs obtenues sont obtenues par des mesures de type standard et virtuelles pour validation.

La méthode classique a consisté à mesurer les échantillons au pied à coulisse (Mitutoyo, Précision 0.02mm), et la seconde a été réalisée grâce au logiciel Adobe Photoshop CS3. Ayant en effet scanné tous nos échantillons (HP ScanJet, 1200ppp) avant et après le prise d'humidité, nous avons pu réaliser des montages montrant simultanément les différentes faces des échantillons avant et après l'expérience. Grâce au facteur d'échelle constant et au mesure de pixels, nous avons ainsi pu réobtenir les valeurs des différentes cotes obtenues manuellement. Voilà ci-dessous (image 17 et 18) et en annexes les rendus de montage.

En noir et blanc on observe l'échantillon à 18.95% et en couleur sa forme initiale à 10.69%. Nous avons toujours utilisé le même système pour replacer les centres des échantillons l'un sur l'autre, ce qui permet de visualiser leur variation de dimensions et les phénomènes tels que le tuilage.

Les mesures ayant été prises avec facteur de zoom trop important, nous n'avons pas pu détailler dans ce rapport en y mettant les clichés concernés.

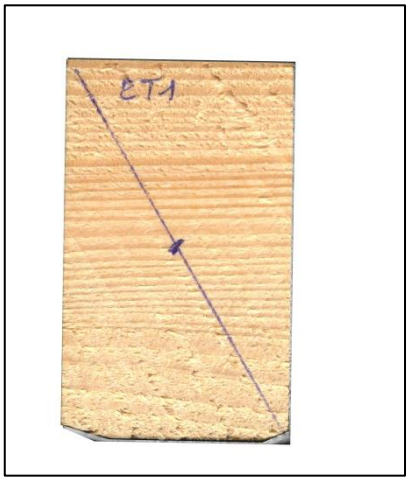


Image 17 : Montage type n°1



Image 18 : Montage type n°2

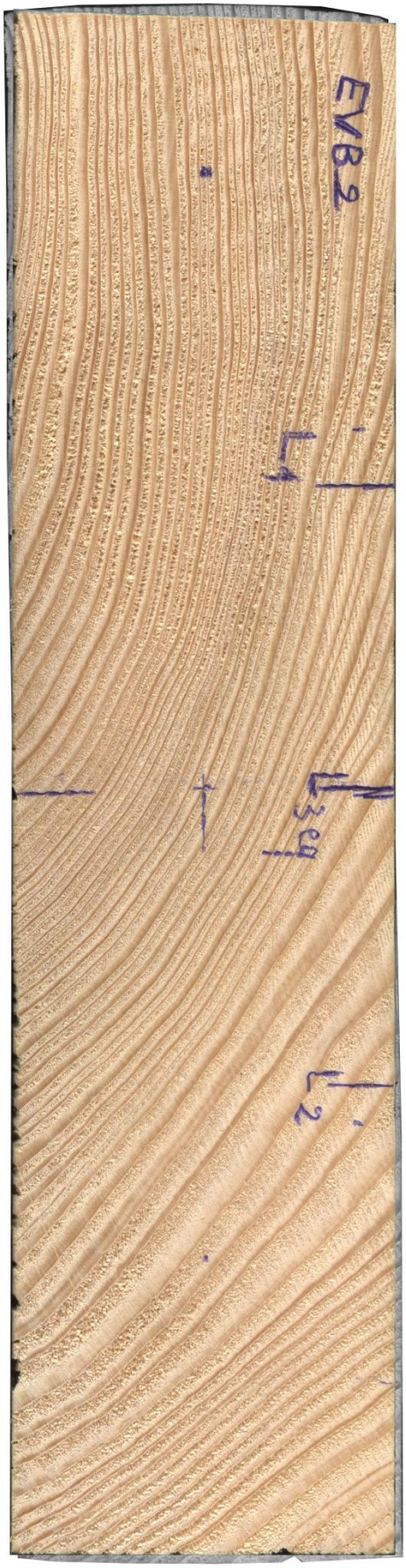


Image 19 : Montage type n°2

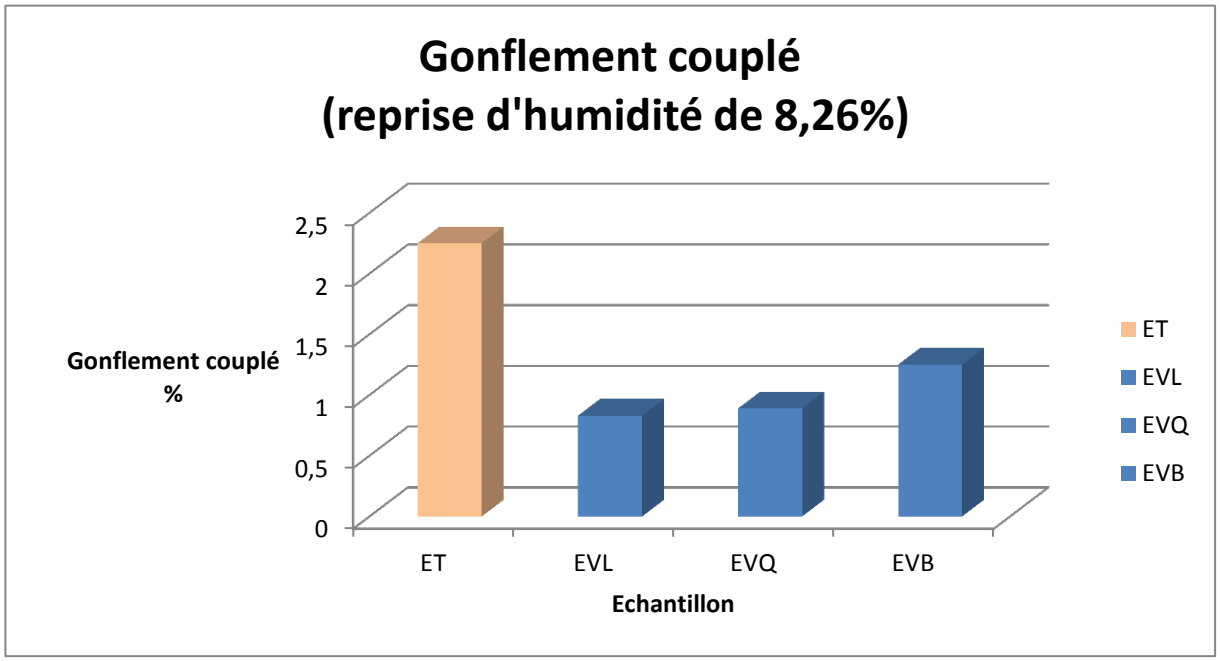


Figure 22 : Comparaison des gonflements couplés

Sur ce graphique est représenté le gonflement couplé radial/tangentiel de nos échantillons, pris sur la longueur de ceux-ci. Nous n'avons pas pu déterminer de valeur théorique pour comparer, car nos débits sur ces grands échantillons présentent des ratio % radial sur % tangentiel trop différents.

Nous pouvons voir au premier coup d'œil que ce sont les échantillons témoins qui ont subi la plus forte déformation. Mais il est intéressant de constater que les échantillons avec assemblages ont moins gonflé que ces derniers. Ceci est contraire à la logique qui voudrait que leur gonflement étant a priori bloqué dans la direction radiale, ils auraient dû d'autant plus gonfler dans la direction tangentielle (effet Poisson).

En observant ces deux graphiques et après réflexion, nous en sommes arrivés à émettre les hypothèses suivantes :

- Pour les systèmes à vissage linéaire et quinconce, le blocage radial n'a clairement pas fonctionné. En revanche, on peut penser que les efforts de gonflement couplé dans la grande direction ont été atténués par la présence des nombreuses vis, rattachées aux fers plats et donc peu déformables. Ce blocage inattendu de la direction couplée radiale/tangentielle a alors engendré par effet Poisson une augmentation du gonflement radial pur, ce qui expliquerait le fait que sur la figure ces deux types d'échantillons présentent une valeur de Gr plus élevée que celle des témoins.

- Pour les systèmes boulonnés, on constate le même type de phénomène, mais ici le blocage radial a fonctionné. On aurait donc ici un gonflement radial fortement atténué ayant pour conséquence une forte augmentation du gonflement couplé. Cependant, on peut penser que ici-aussi la présence des corps métalliques des vis a contribué à bloquer une partie du gonflement couplé, ce qui expliquerait là pourquoi celui-ci est plus élevé que dans le cas des autres EV mais plus faibles que pour les ET.

  Nous avons tenté de représenter cela sur la figure suivante :

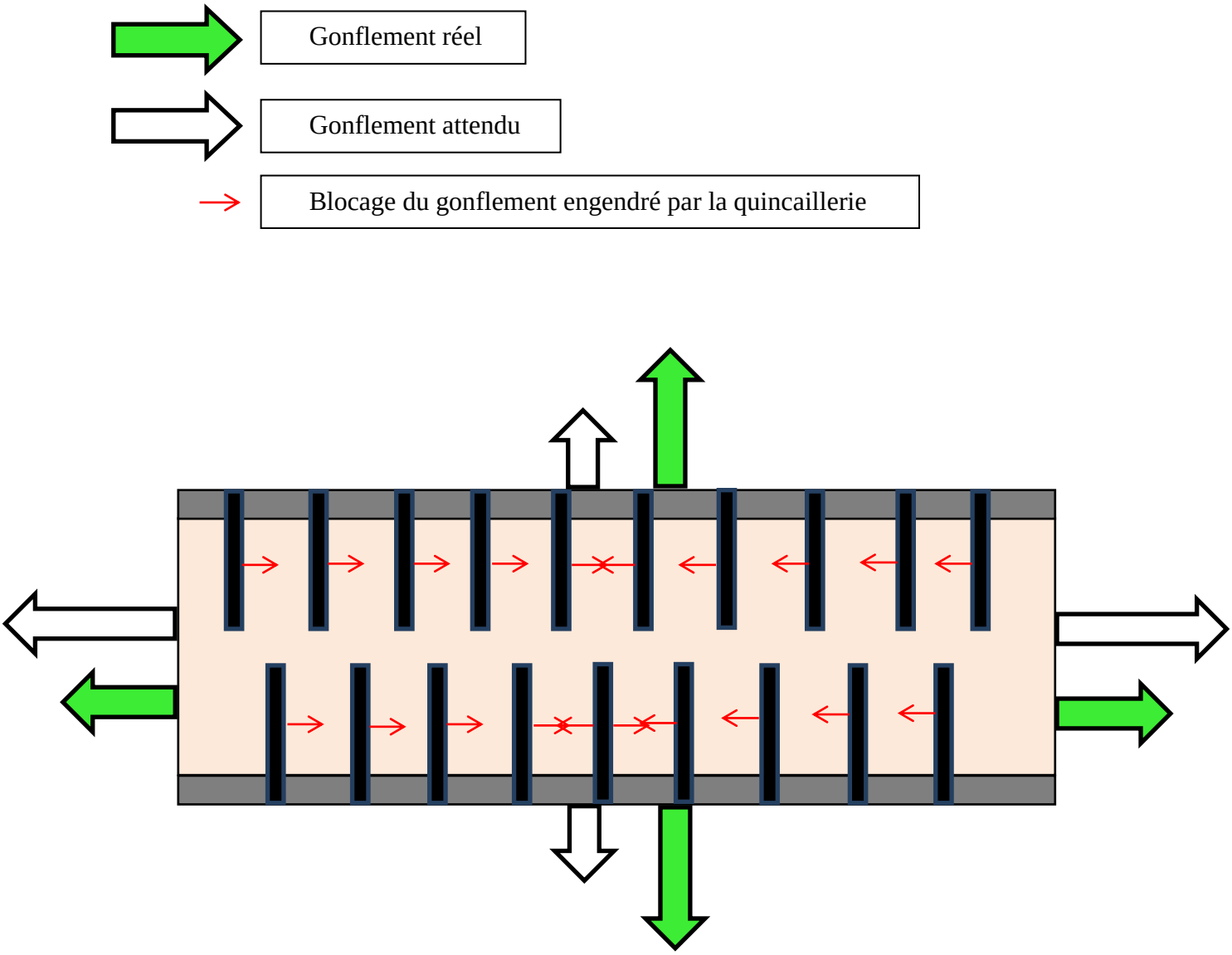


Figure 23 : Illustration possible du phénomène

Les deux gonflements semblent donc a priori être étroitement liés par l'effet Poisson au vu de ces résultats.

2.3. Comparaisons microscopiques

Une autre analyse que nous voulions réaliser était une étude microscopique des zones de passage des vis, pour voir dans quelle mesure celles-ci seraient altérées par un gonflement tel qu'il a été imposé ici. Nous avons pour cela réalisé les clichés suivants :



Image 20 : Coupe microscopique d'une empreinte de vis

On voit sur cette photo que la largeur moyenne de l'empreinte laissée par le filet dans le bois sur un échantillon n'ayant pas subi de gonflement, est d'environ 0.5 mm, ce qui correspond à la valeur obtenue grâce au plan fourni par Mr Varacca.

Nota Bene : L'affichage de l'échelle n'était pas bon sur la photo, les 2µm correspondent en réalité à 2mm.

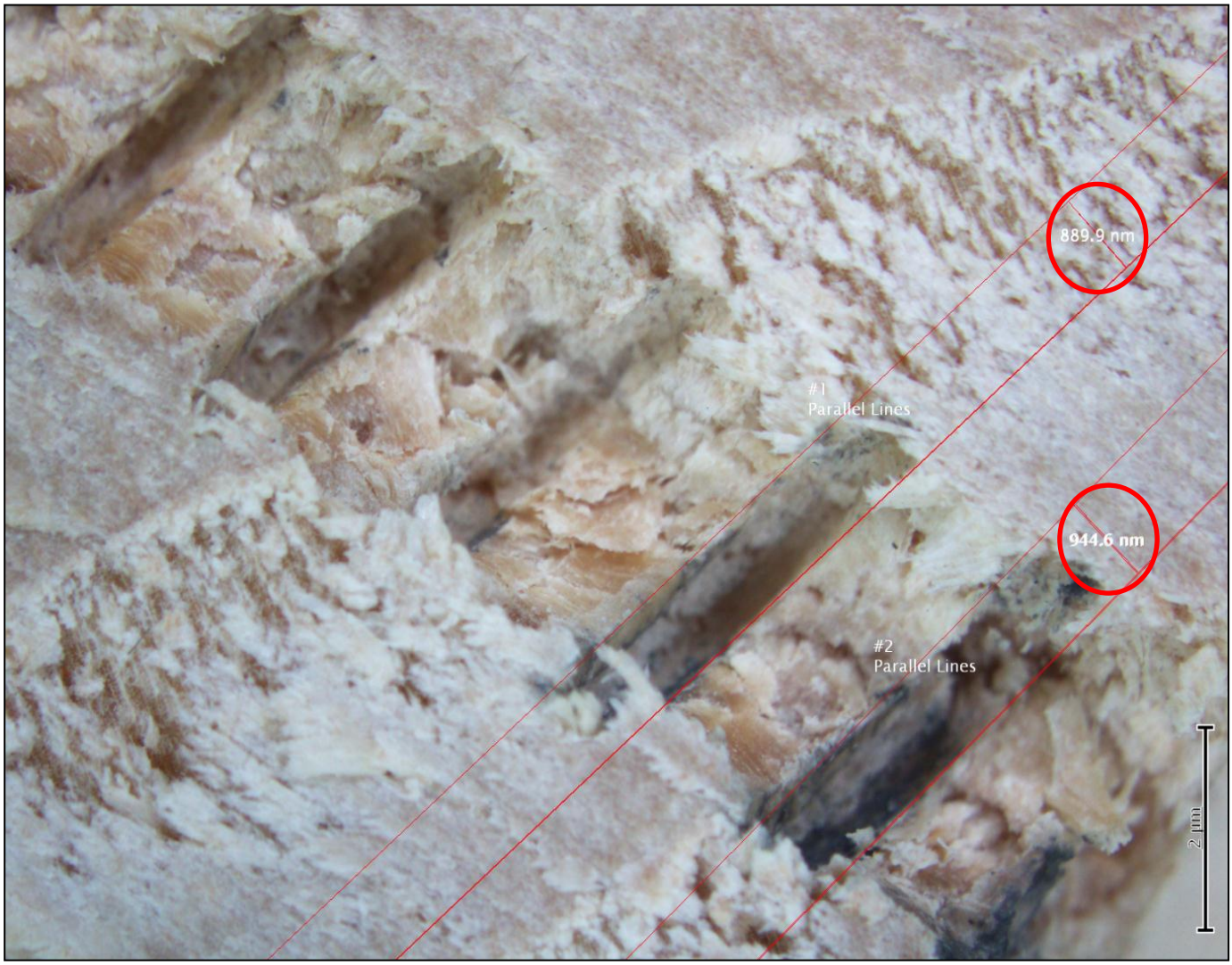


Image 21 : Coupe microscopique d'une empreinte après gonflement

On remarque sur ce cliché que la largeur de l'empreinte est passée à environ 0.9 mm, ce qui correspond presque à un doublement de la valeur de départ.

Ces mesures ont été faites pour les EVL et EVQ, et nous ont permis de montrer que pour le gonflement radial de X mm, on retrouve un élargissement des filets de X/2 mm sur les empreintes des vis de la partie supérieure et X/2 mm sur celles des vis de la partie inférieure. Les échantillons auraient donc une tendance à se comporter de manière symétrique par rapport à leur plan médian, dans le cas de conditions imposées elles-aussi symétriques (ici le nombre de vis et une reprise d'humidité constante et homogène dans le matériau).

3. DISCUSSION SUR LE MONTAGE ET LA VALIDITE DES RESULTATS

3.1. Etudes des paramètres d'erreur

Dans cette partie, nous allons tenter de présenter les différents points qui nous semble pouvoir impacter sur la reprise des charges pendant l'essai. On distinguera deux systèmes, les pièces mises en œuvre dans le montage d'essai et la structure de base.

3.1.1. Eléments du montage d'essai

- ***Les capteurs de force*** : Il est envisageable qu'une partie des pertes de charge soit la cause d'une mobilité des cellules de charge. Nous n'avons pas réalisé de suivi de variations dimensionnelles au niveau des capteurs. Il aurait été intéressant de charger les capteurs et de vérifier si il y à présence ou non d'un déplacement à l'aide d'un extensomètre.

- ***Les rotules*** **:** Étant donné que nous avons fabriqué ces éléments à la main, il est possible qu'une éventuelle mobilité autorise de faibles translations (déplacement de la bille au creux des cônes,…).

3.1.2. Structure de base

Les profilés ELCOM sont utilisés pour concevoir des portiques, carters, et ils permettent aussi de fabriquer des montages de guidage linéaire. Le fabricant met en avant un système d'assemblage conférant une très bonne tenue mécanique aux montages, et une grande précision au niveau du positionnement des profilés.

- ***Traverse basse mobile***

Le catalogue en ligne des profilés ELCOM fourni les différents moments d'inertie des profilés ce qui nous a permis de calculer la flèche susceptibles d'être prise au cours de l'expérience pour une charge donnée. La traverse basse est en flexion trois points, nous la modéliserons grâce au schéma suivant (figure 20).

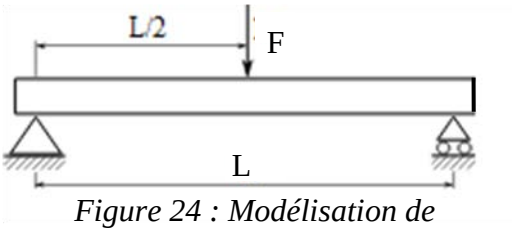


Figure 24 : Modélisation de la traverse basse

Nous prendrons une force F égale à 300 N et une longueur L de 200 mm. Sur notre montage L est la distance entre les deux capteurs de force. Le moment d'inertie donné par le fournisseur est égal à 4.15 cm^4.

Présentation du calcul :

Détermination de la déformé d'une poutre pour une charge ponctuelle centrée (contrainte de gonflement) placée sur deux appuis (les deux cellules de charge).

$$f = \frac{F \times L^3}{48 \times E \times I}$$

Analyse dimensionnelle : $\frac{\frac{[M].[L]}{[T^2]}.[L^3]}{\frac{[M].[L]}{[T^2].[L^2]}[L^4]} = [L]$

AN : $\frac{300 \times 200^3}{48 \times 69\,000 \times 41500} = 0.017\ mm$

La flèche obtenue théoriquement serait de 0.02 mm. En utilisant les données du FCBA, l'échantillon aurait dû subir une variation dimensionnelle dans la direction radiale de 0.55 mm. On peut donc supposer que 3% du déplacement a réellement eu lieu, tout en étant repris par la structure.

➢ ***Traverse haute fixe***

Nous pouvons maintenant étudier la déformation de la traverse supérieure. Celle-ci peut être modélisée par une poutre encastrée des deux côtés (montants), avec deux charges ponctuelles (positionnées à la place des capteurs). En modélisant le profilé sous Autodesk Inventor et en utilisant le logiciel de calcul RDM6, nous obtenons la courbe de déformation suivante (à l'envers par rapport à la réalité):

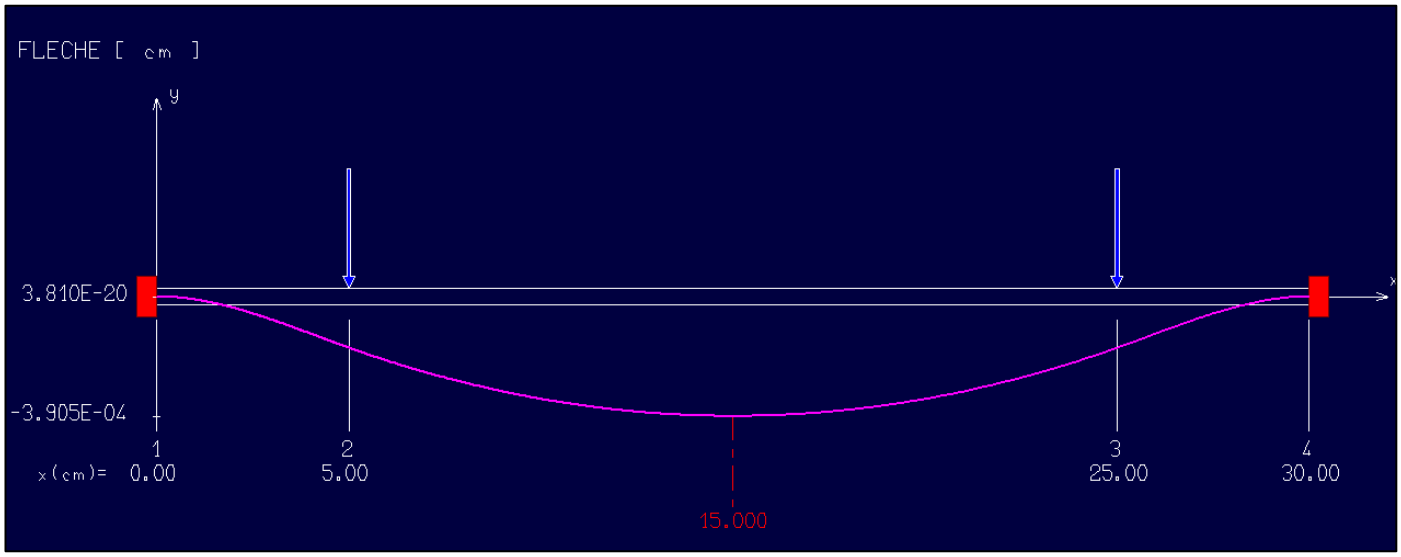


Figure 25 : modélisation de la flèche de la traverse haute

On obtient donc une déformation d'au maximum 0.004 mm, ce qui peut être considéré comme négligeable. Ce n'est donc pas cette traverse qui par sa flèche va gêner la reprise des efforts. En revanche son système de fixation n'est peut-être pas idéal pour ce type d'application. D'après les données ELCOM, la charge admissible est de 500 N/équerre, ce qui est largement suffisant en théorie au vu des charges à reprendre par notre montage.

3.2. Propositions d'amélioration

Concernant les améliorations possibles à apporter au montage, nous en avons retenu deux qui nous semblent pouvoir résoudre un certain nombre des problèmes rencontrés.

La première proposition serait de repenser le guidage entre la traverse basse et les deux montants du bâti. En effet, le guidage étant actuellement assuré par le système de fixation ELCOM en angle, la liaison n'est pas sûre. La solution idéale serait de mettre un système modélisable par deux pivots glissants, comme sur la figure ci-dessous.

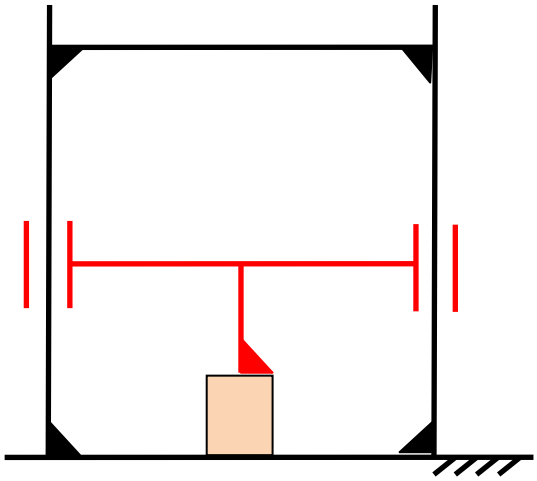


Figure 26 : Schéma cinématique du montage (sans les rotules et les capteurs)

Cela permettrait de s'assurer qu'aucun effort ne sera repris par le bâti, et cela en empêchant la traverse de s'incliner et de se bloquer (phénomène d'arc-boutement) par la création d'une liaison glissière équivalente.

L'autre point à revoir sur ce montage est le système d'encastrement entre la traverse haute et les montants du bâti. En effet, le système actuel nous semble insuffisamment efficace. La mise en position est bien réalisée, mais le maintien en position n'est peut-être pas suffisant pour bloquer tous les déplacements.

CONCLUSION

Au cours de ce projet, nous avons pu mettre en œuvre une démarche de réflexion basée sur une demande concrète, et cela fut particulièrement intéressant.

Concernant les résultats obtenus, nous pouvons tirer plusieurs conclusions :

- Le montage réalisé pour la détermination des efforts fonctionne relativement bien, mais il gagnerait à être modifié afin de rendre la prise de mesure plus précise. Nos valeurs sont en effet inférieures à celles de la bibliographie, et on constate que la précision mécanique et le choix des composants sont primordiaux dans ce type de montage.
- Les solutions de blocage testées présentent en revanche des résultats plus mitigés. Les blocages obtenus sont très faibles dans le cas des assemblages par vis à bois standard, et sensiblement plus efficace dans le cadre du boulonnage.
- Il semble délicat d'extrapoler les valeurs obtenues pour des tests sur des échantillons de bois massif de taille réduite pour les adapter à de très fortes sections de lamellé-collé.

Il nous semble donc, au vu de nos résultats, que le blocage mécanique des hygrovariations du bois est peu réalisable sans étude plus approfondie. Les efforts mis en jeu durant ce phénomène sont réellement considérables (quelques dizaines de kilogrammes pour nos échantillons). Même en bloquant le gonflement du bois de manière significative dans une direction par un assemblage efficace, il est difficile de prévoir comment vont évoluer les gonflements des autres directions. Ces phénomènes combinés sur lesquels peu de données sont disponibles actuellement risqueraient de poser problème pour la stabilité et la conception des structures en bois.

Cela entraînerait de plus des surcoûts assez importants au niveau des assemblages bois, en raison des systèmes de quincaillerie à mettre en œuvre. Il pourrait donc être intéressant de réaliser d'autres études plus poussées sur ce sujet en se concentrant sur un assemblage de type boulonnage, ou alors de repenser les types de joints de chaussée utilisés pour ces ouvrages.

BIBLIOGRAPHIE

[1] *www.sfsintec.biz.*

[2] *www.sfsintec.biz*

[3] *www.archiexpo.fr*

[4] *ARNOLD D. (1991) Building in Egypt: pharaonic stone masonry. Oxford University Press, New York*

[5] *ROWELL RM. (1995). One way to keep wood from going this way and that. Am recorder XXXVI:12-16*

[6] *HUSSON JM. (2009). Loi de comportement viscoélastique avec effet mémoire. Application à la mécanosorption dans le bois. Thèse*

[7] REMOND R. (2011) Enseignant-Chercheur à l'ENSTIB

[8] *ARMSTRONG LD. KINGSTON RST. (1962) "Effect of moisture changes on the deformation of wood under stress", Australian Journal of Applied Science Vol. 13*

[9] *PITTET V. (1996) « Etude expérimentale des couplages mécano-sorptifs dans le bois soumis à variations hygrométriques contrôlées sous chargement de longue durée » Thèse*

[10] *GRIL J. (1988) « Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure » Thèse*

[11] *SCHARFETTER H. (1980) "Thickness Stability of Particleboards"*

[12] *RANDRIAMBOLONA H. (2003) "Modélisation du comportement différé du bois en environnement variable." Thèse*

[13] *HEGER F. & NAVI P. 2005 « Comportement thermo-hydromécanique du bois, application aux technologies et dans les structures (p53) »*

[14] *MOUGEL E. 2010 « Cours sur l'Anatomie et la Physique du Bois » ENSTIB*

[15] *BENOIT Y., 2009, Guide des Essences de Bois (FCBA)*

ANNEXES

Annexe 1 : choix des conditions d'expérience

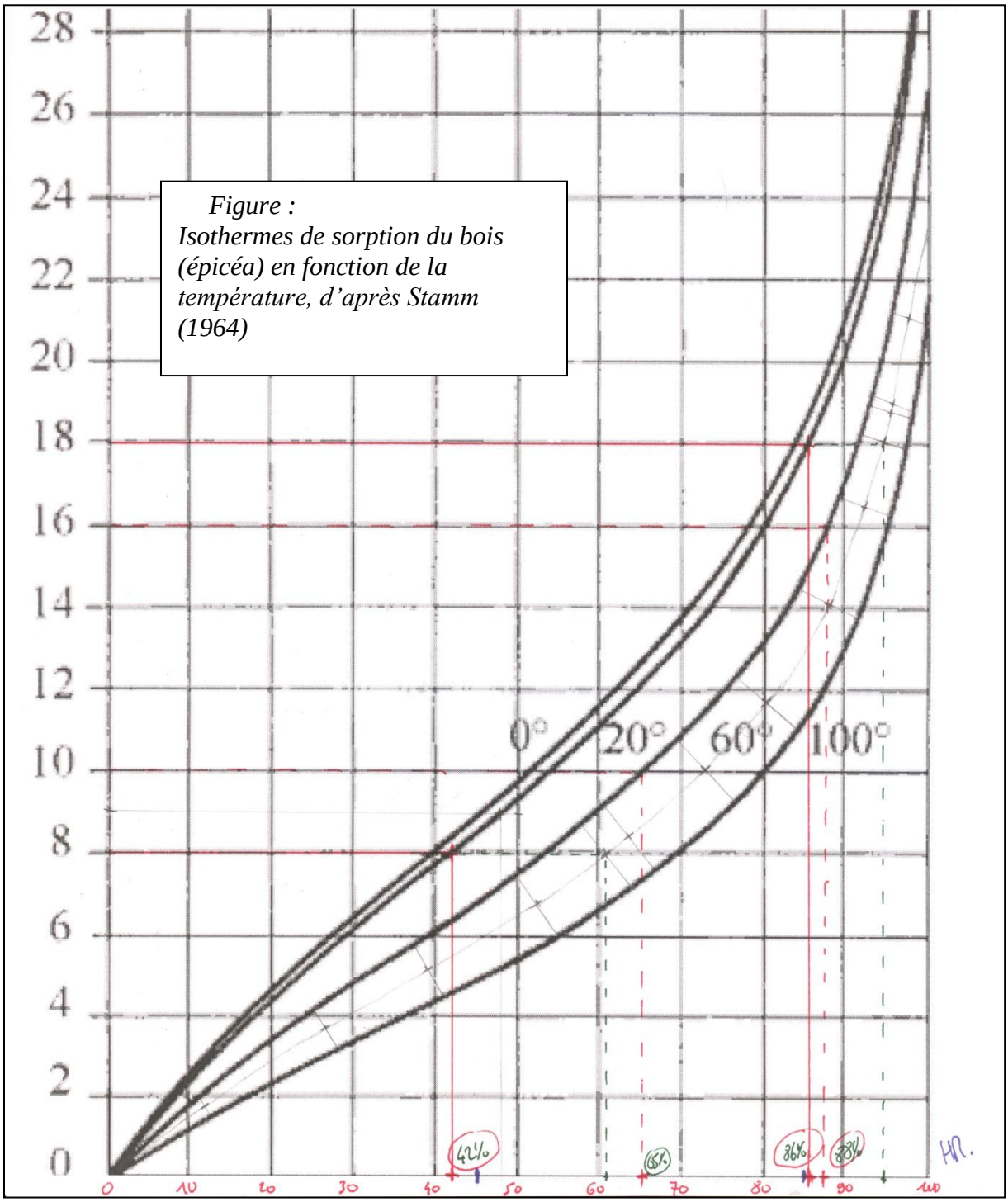
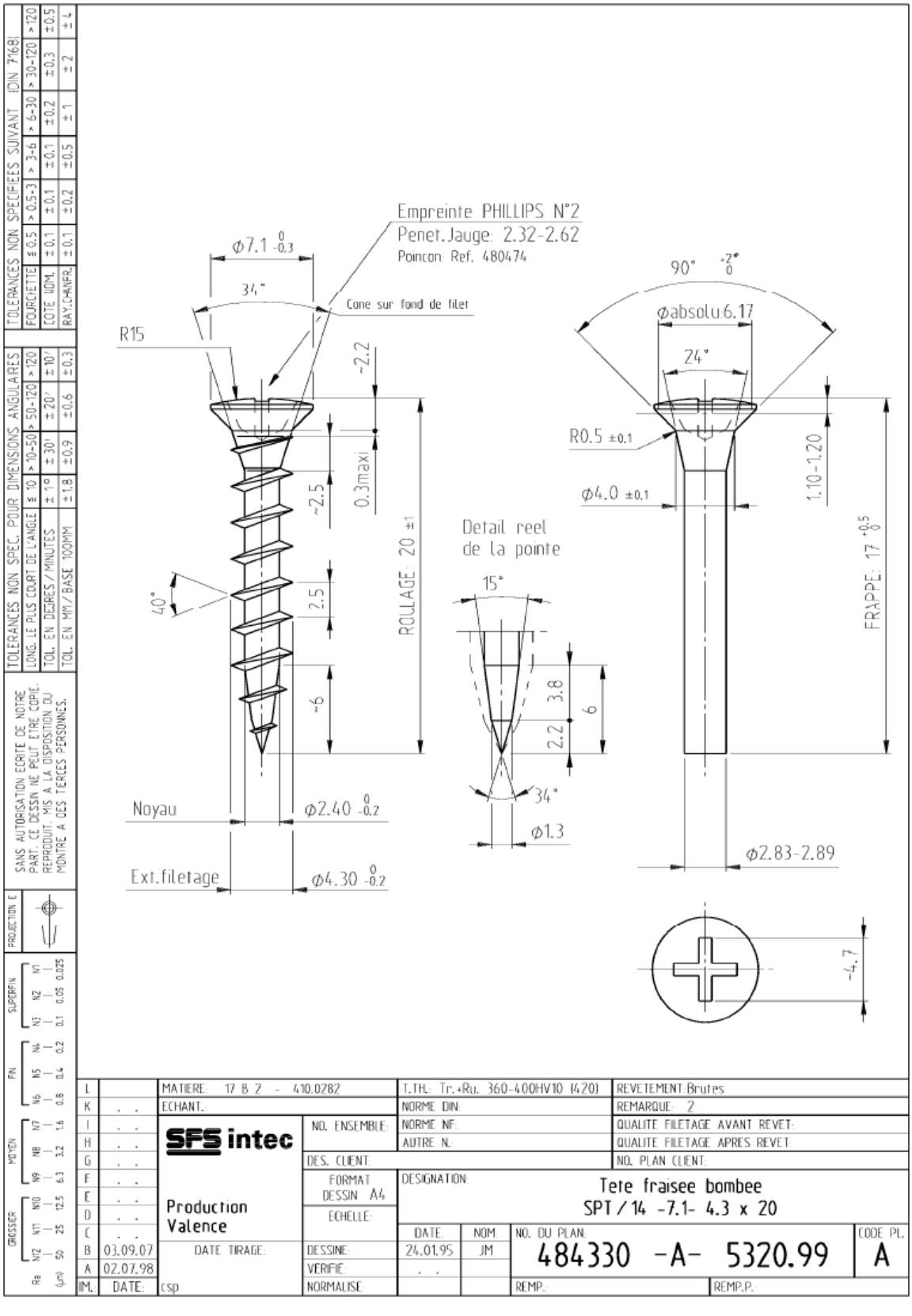
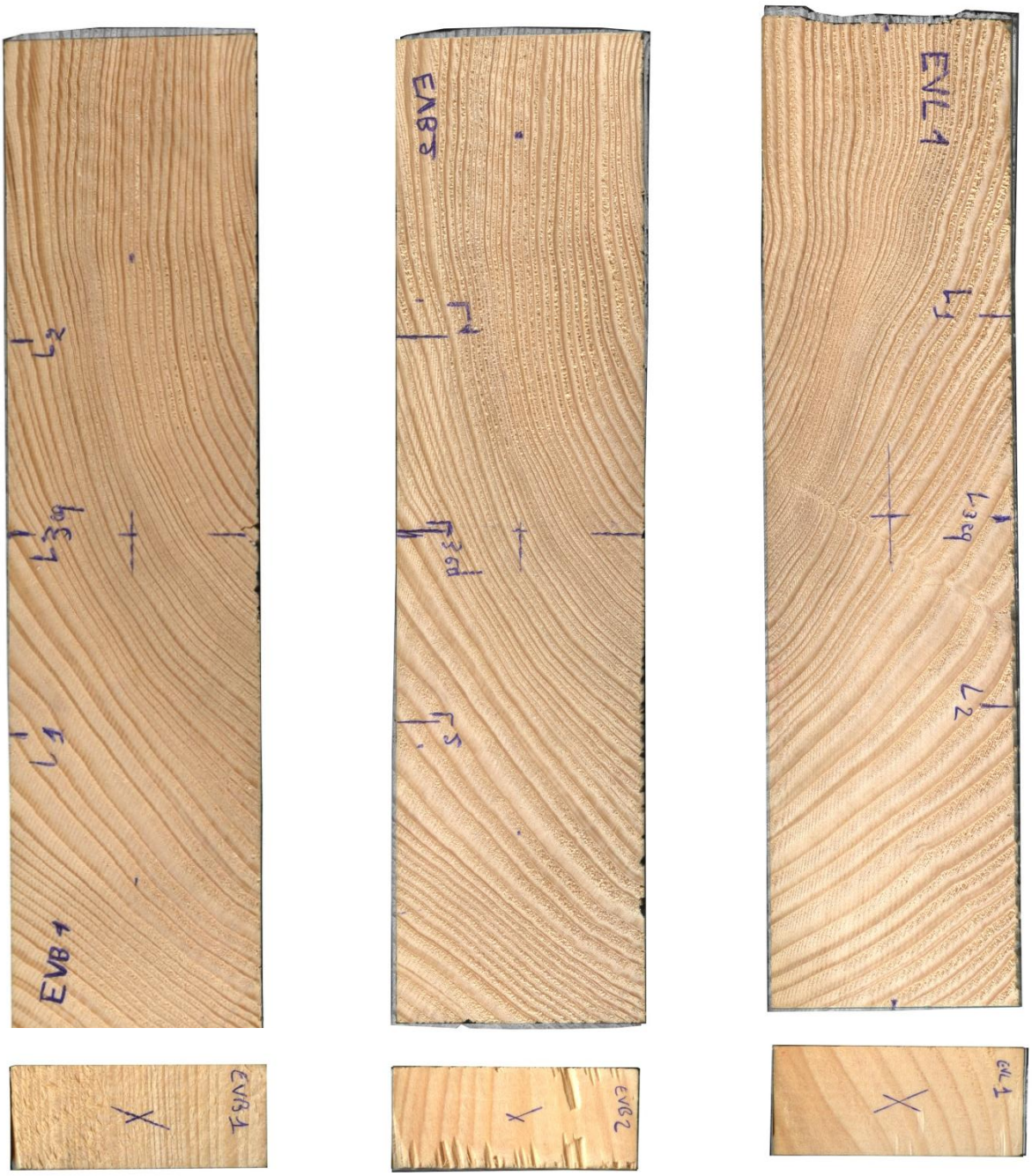


Figure :
Isothermes de sorption du bois (épicéa) en fonction de la température, d'après Stamm (1964)

Annexe 2 : plan des vis utilisées

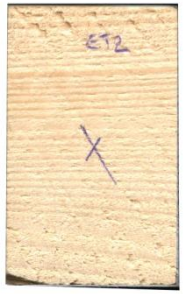


Annexe 3 : Montage photoshop des échantillons EVB, EVL, EVQ et ET :

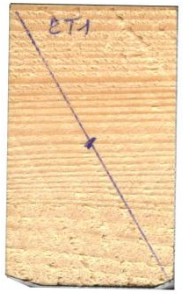



EVQ2
L1
L3eq
L2
EVQ2
X
EVQ1
L1
L3eq
L2
EVQ1
X
EVL2
L1
L3eq
L2
EVL2
X


L1
L3ep
L2
ET2


ET2


ET1
L2
L3ep
L1


ET1

RESUMÉ

Notre projet consiste à étudier la possibilité de bloquer les variations dimensionnelles du bois apparaissant lorsqu'il est soumis à des conditions climatiques changeantes. La société SFS Intec, à l'origine de ce projet, est un fabricant français de systèmes d'assemblages qui s'interroge sur la possibilité de concevoir des quincailleries assurant un maintien dimensionnel des éléments mis en œuvre dans les ouvrages d'art. Suite à nos recherches bibliographiques, nous avons décidé d'organiser notre projet selon deux axes d'étude, l'un consistant à évaluer les efforts mis en jeu pour bloquer le gonflement du bois bois et l'autre permettant de tester différentes solutions de blocage des variations. La première expérience nous a ainsi amené à concevoir entièrement un montage d'essai à l'aide de différents types de capteurs, dans l'optique de quantifier précisément le phénomène de gonflement. Puis, lors d'une réunion avec l'industriel, nous avons déterminé quels systèmes de maintien mécanique allaient être testés au cours de la seconde expérience. L'analyse des résultats est faite sur la base de critères visuels, géométriques et mécaniques, ce qui donnera à l'industriel une idée de la viabilité de tels systèmes.

Mots clés: Hygrovariation, blocage, contraintes, bois, quincaillerie, étude de viabilité.

ABSTRACT

Our project was to study the possibility of stopping the dimensional variations of wood, due to its moisture uptake during climactic variations. The company SFS Intec, at the origin of the project, is a French manufacturer of fastening systems which believes in possibility of designing hardware to ensure dimensional stability of structural elements. We decided to organize this project in two directions, one to evaluate the forces involved in the swelling of wood and the other to test various solutions to stop dimensional changes. The first experiment led us to design a complete test fixture with different type of sensors, in order to quantify precisely the phenomenon of swelling. Then, during a meeting with the manufacturer, we determined which mechanical support systems would be tested during the second experiment. Analysis of the results was made according to geometrical, visual and mechanical criteria, with a view to providing the manufacturer an idea of the viability of such systems.

Keywords: Hygrovariations, dimensional stability, wood, hardware, study of viability

ABSTRACT