



CONSTRUIRE LE COURBE  
Septembre 2016

### GRUPE III : GRILLE BOIS

Chadi A. Boustani ; Mateusz Bloch ; Alexandre Diévert ; Hadi Elasmr ; Pierre Gaboriaud ; Emilie Gorgery ; Alexandre Noceto

## Groupe III : Grille bois

### 1. Triage et essais qualitatifs du bois :

Le bois a été trié en 3 catégories :

- Un premier tas constitué du bois dit de bonne qualité, c'est-à-dire des lattes présentant pas, ou très peu de défauts sur une longueur qui dépasse les **3m**. Ce tas sera utilisé pour l'usinage des modules de grandes dimensions.
- Un deuxième tas constitué du bois dit de qualité moyenne, c'est-à-dire des lattes présentant certains défauts ou nœuds assez espacés pour pouvoir extraire des bouts de bon bois de longueur comprises entre **1.5** et **2.5m**.
- Un troisième tas constitué du bois jugé mauvais, c'est-à-dire des lattes présentant plusieurs défauts assez rapprochés qui ne permettent d'extraire que quelques bouts de dimension inférieure à **1m**.

Cette subdivision nous a permis de définir une typologie d'usinage bien précise en choisissant la pièce de bois convenable pour chaque grille et usage : selon la longueur requise de la latte, un bois de bonne qualité ou bien de moyenne qualité sera utilisé et coupé à longueur requise. Les chutes ainsi que les bouts découpés du mauvais bois seront utilisés pour usiner les pièces de longueur inférieure à **1m** et notamment les manchons. Les pièces assez médiocres ont été collées par paires afin d'être utilisées comme écarteurs au niveau des nœuds et des manchons.

### 2. Caractérisation mécanique et essais bois (resp. Olivier Perret):

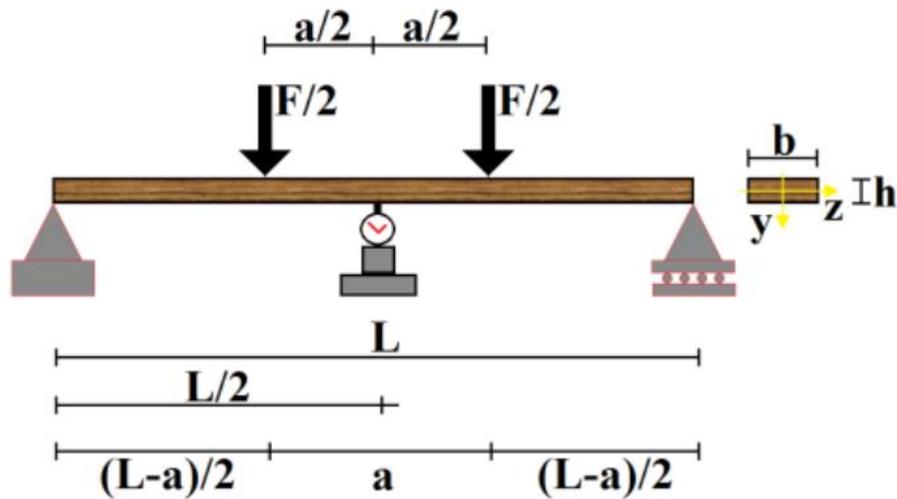
Caractérisation du bois en flexion : Les lattes de bois fournies par l'Association filière bois Haut Languedoc Sud Massif Central étaient donc de plus ou moins bonne qualité. La première étape était d'obtenir les caractéristiques mécaniques de ce bois afin de pouvoir donner les résultats au groupe Forme & Structure pour qu'il puisse calculer et vérifier la structure.

Il s'agissait donc de réaliser une série d'essai de flexion 4 points sur des éléments de 60 cm choisis (sans ou avec peu de défauts) jusqu'à rupture, et d'en déduire des valeurs moyennes à partir des données recueillies par l'ordinateur.

Les résultats obtenus sont les suivants :

- Caractérisation des lattes : valeur de résistance caractéristique en flexion : 50,65 MPa
- Valeur de résistance moyenne en flexion : 61,4 MPa
- Valeur caractéristique de Module de Young: 9 GPa (les résultats varient de 8 au 15 GPa)
- Valeur moyenne de Module de Young: 10 GPa (les résultats varient de 9 au 16 GPa)
- Rayon de courbure minimal :  $R = 105,7$  cm

Cependant, les essais ayant été réalisés sur du bois sans défauts, les résultats semblaient optimistes. Nous avons pu le constater lors du montage où certaines lattes sensibles (avec nœuds) ont plus ou moins bien résisté à la mise en forme du gridshell.



### 3. Test de qualification de la courbure maximale supportée par les lattes :

La courbure maximale ou le rayon de courbure minimal est un critère primordial pour le dimensionnement d'un gridshell. On a alors procédé à un test qualitatif de ce critère afin de définir la valeur minimale du rayon permise avant rupture du bois par flexion.

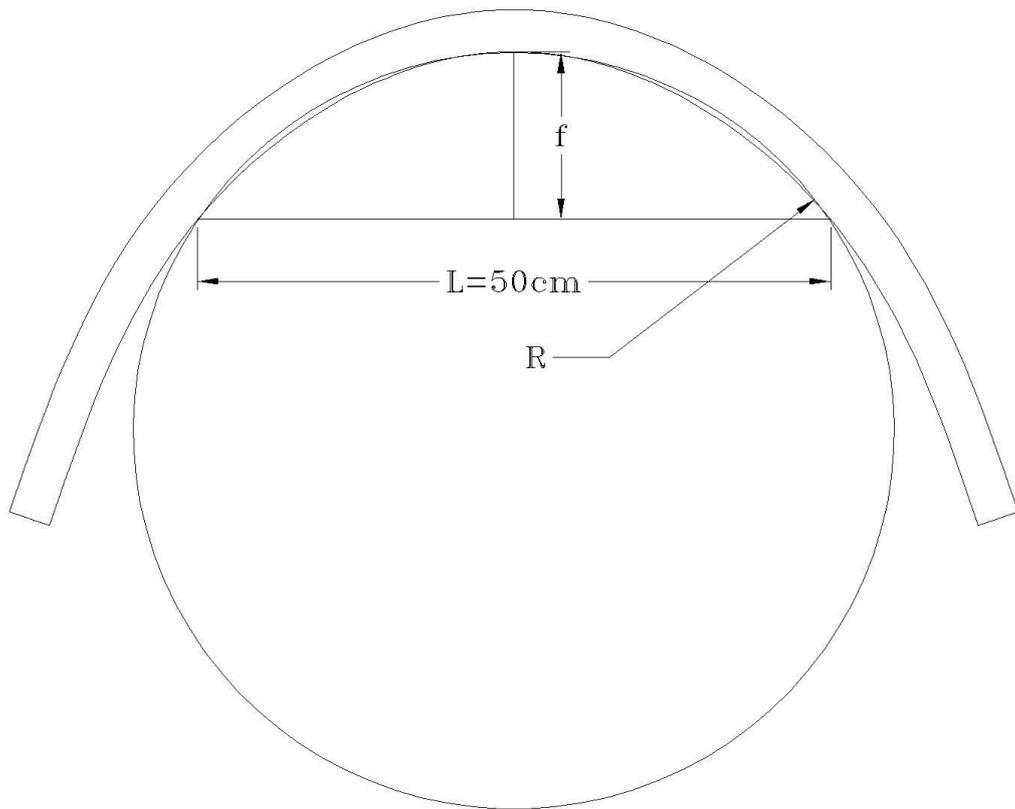
Le test est assez simple : en utilisant une latte de longueur arbitraire choisie égale à  $2.5m$  afin de pouvoir la fléchir à la main, on a procédé à la mesure d'une flèche spécifique de l'élastica. Ainsi, en utilisant autocad on peut retrouver le rayon de courbure local au point critique de la latte.

Ce rayon de courbure nous permet de calculer le moment maximal que peut supporter les lattes en utilisant la formule :

$$M = \frac{EI}{R}$$

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus :

$L$ (cm)	$f$ (cm)	$R$ (cm)	$M$ (Nm)
50.00	1.10	284.65	24.28
50.00	1.80	174.70	39.56
50.00	2.10	149.86	46.12
50.00	2.50	126.25	54.75
50.00	3.00	105.67	65.41
50.00	3.40	93.61	73.84
50.00	4.10	78.27	88.31
50.00	4.80	67.50	102.40

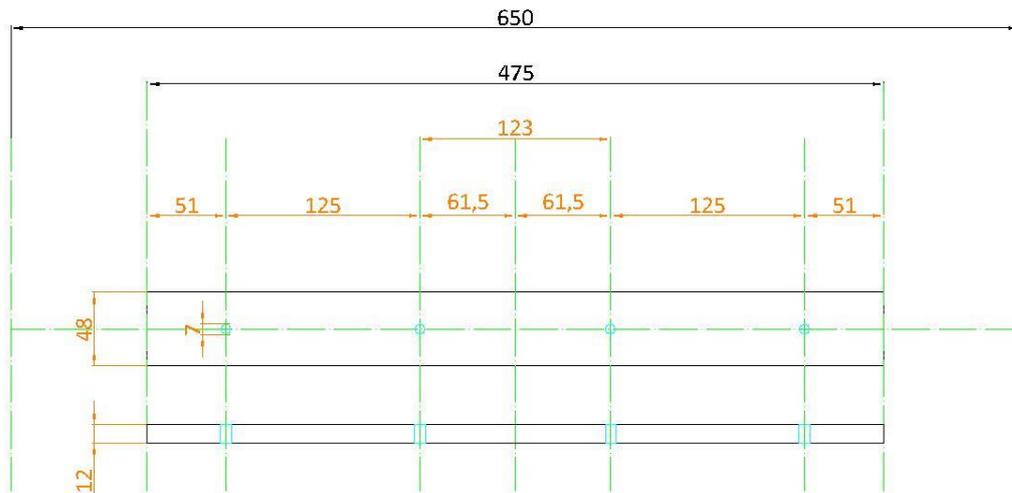




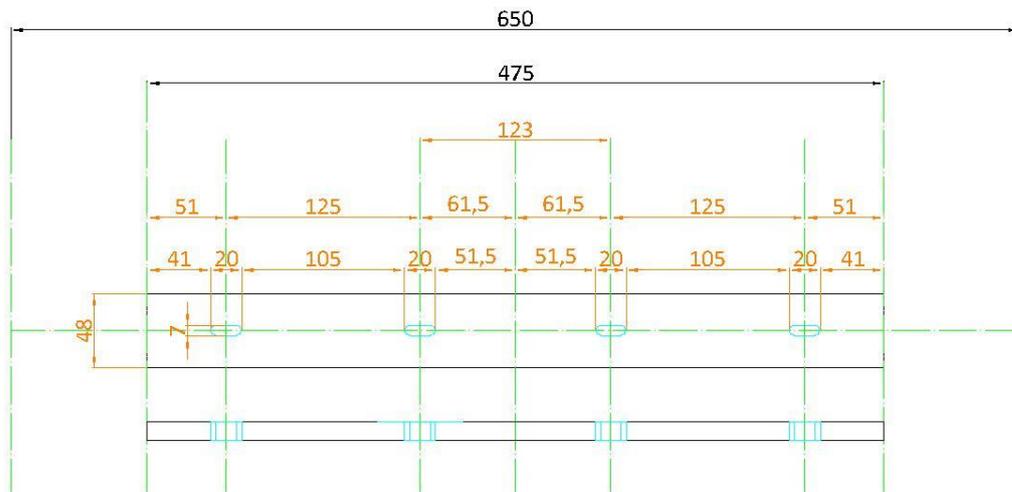
#### 4. Conception du manchon :

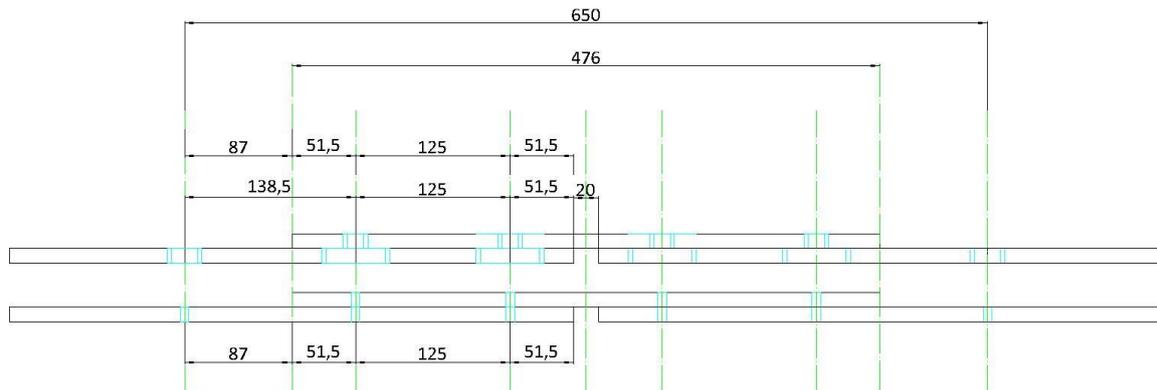
Il s'agit de déterminer les divers dimensions du manchon notamment celle des trous oblongs et des pièces de bois à ajouter. Les manchons devraient pouvoir supporter les variations de longueurs des lattes, celle en position supérieures spécifiquement, suite à la mise en forme de la grille. Il s'agissait donc de retrouver la variation de longueur maximale qui pourrait avoir lieu avec le rayon de courbure minimal existant dans la structure. En utilisant les plans et le modèle 3D fournis par le groupe de conception, on repère ce rayon de courbure minimal évalué à  $R = 3m$  sur une longueur de grille évaluée à  $3.6m$ . En utilisant autocad, on a calculé la variation maximale de distance qui aura lieu en passant de la position à plat vers la position courbe. Cette variation de distance devrait être entièrement reprise par les trous oblongs du manchon supérieur. Alors que la latte supérieure devrait reprendre, en plus de cette variation le cumul des variations de longueurs des différents modules afin d'avoir en fin de compte une seule dimension unifiée pour le trou oblong et ainsi faciliter l'usinage. Les dimensions enfin retenues sont alors  $58mm$  pour les trous de la latte supérieure et  $20mm$  pour les trous du manchon supérieur, alors que les lattes et manchons inférieurs ont des trous normaux.

## Latte inférieure du manchon



## Latte supérieure du manchon





## 5. Conception des cales de cisaillement :

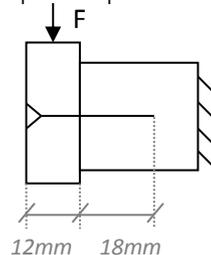
Nous comptons déterminer les dimensions caractéristiques des cales de cisaillement venant s'insérer entre les deux lits de lattes de bois.

Ces cales sont fixées au lit supérieur uniquement jusqu'à la mise en forme du gridshell. Ainsi les deux lits de lattes étant disjointes l'inertie des éléments est égale à la somme des inerties des deux lattes, ce qui simplifie leur courbure et donc la mise en forme du gridshell. Une fois la forme voulue atteinte, nous fixons les cales au lit inférieur, ce qui a pour effet de relier les deux lattes pour former un profilé dont l'inertie est égale à la somme de l'inertie des deux lattes plus les termes de Huygens générés par l'écartement des lattes avec la fibre neutre. Cela augmente considérablement l'inertie et « verrouille » donc la forme du gridshell.

Nous avons choisi de fixer en premier les cales aux lattes supérieures par soucis de simplicité. En effet, une fois la forme du gridshell atteinte, il est beaucoup plus simple de rajouter des vis dans les

Dimensionnement :

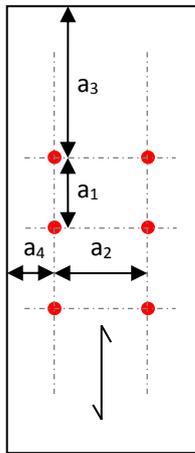
En utilisant la méthode indiquée dans l'eurocode 5, nous calculons la résistance au cisaillement simple des vis 4\*30. Une vis peut reprendre un effort  $F = 228 \text{ N}$



Ne trouvant pas la valeur de la surcharge de neige pour les chapiteaux et structures provisoires, nous prenons une valeur de constructeur de  $0,1 \text{ kN/m}^2$ . Nous appliquons cette surcharge sur le modèle grasshopper de la structure pour déterminer le cisaillement maximal des cales. Celui-ci est de  $169,6 \text{ N}$ . Une seule vis peut donc reprendre le cisaillement au niveau des cales.

Norme d'espacement des vis :

L'eurocode 5 prescrit des espacements minimums des vis dans les assemblages bois. Étant donné le sens dans lequel une cale est cisailée, nous sommes dans le cas d'une extrémité chargée et d'une rive non chargée. Les valeurs minimales à respecter sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :



Distance minimale (mm)	Avec préperçage	Sans préperçage
$a_1$	20	40
$a_2$	12	20
Extrémité chargée $a_3$	48	60
Rive non chargée $a_4$	12	20

Comme les cales font 36 mm de large et qu'il faut être à au moins 20 mm de la rive, il est impossible de visser les cales sans préperçage en respectant cette norme. Avec préperçage, nous pouvons mettre deux vis dans la largeur de la cale. Cependant, cette solution est considérée comme dangereuse. En effet, nous allons visser les cales à travers des lattes, sur la structure déjà mise en forme dans le cas des lattes inférieures. Le risque d'erreur sur la position ou l'axe des vis dans la cale est donc plus grand. Positionner des vis à 12 mm des rives nous paraît donc trop risqué. Pour éviter la rotation de la cale, deux vis de fixation à travers la latte supérieure sont nécessaires. La longueur minimale d'une cale est donc de 116 mm avec 48 mm sans vis à chaque extrémité.

Ces normes apparaissant très contraignantes, la possibilité de ne pas les respecter est envisagée.

#### Essais qualitatifs :

Nous comparons qualitativement 4 typologies différentes de système de calage :

Type 1 : Une cale de 150 mm avec 3 vis en haut espacées de 25 mm et deux vis en bas espacées de 40 mm

Type 2 : Une cale de 120 mm avec 2 vis en haut espacées de 20 mm et deux vis en bas positionnées identiquement

Type 3 : Deux cales de 100 mm avec deux vis en haut et deux vis en bas, espacées de 20 mm

Type 4 : Deux cales de 100 mm collées

La typologie 3 ne respecte pas les normes d'espacement. Les typologies 1 et 2, avec une seule cale, les respectent.

Nous procédons à des essais comparatifs de flexion 3 points. La flexion est réalisée avec une charge de 6Kg sur une portée de 1,70 m.



Nous comparons les valeurs des flèches obtenues :

Typologie de calage	Flèche (mm)
1 cale de 150 mm	11
1 cale de 120 mm	23
2 cales de 100 mm vissées	3
2 cales de 100 mm collées	7

La typologie avec deux cales vissées est donc celle qui apporte le plus de rigidité. Nous choisissons donc de ne pas respecter les espacements de vis prescrits par l'eurocode. Pour économiser du bois, nous optons pour une solution avec deux cales de 80 mm fixées avec deux vis espacées de 40 mm (donc à 20 mm des extrémités de la cale) pour diminuer le risque d'éclatement des fibres des lattes. Par soucis de rapidité d'exécution, nous choisissons de réaliser ces vissages sans préperçage.

#### Optimisation de la chaîne de production :

Nous percevons la difficulté d'exécution relative au positionnement des cales de cisaillement sous les lattes supérieures. En effet, il faut visser la cale sous la latte en passant à travers celle-ci. Une cale a une largeur de 36 mm et une latte a une largeur 48 mm, il est donc difficile de tenir la cale sous la latte en gardant leurs axes bien alignés. L'agent au poste de vissage doit tenir la cale à sa position exacte sous la latte, avec l'axe bien centré, et positionner des vis, sans visibilité de la cale, à 20 mm de l'extrémité de celle-ci. Une bonne précision en utilisant uniquement les deux mains de l'agent nous semble difficile à atteindre.

De plus la cadence à tenir à ce poste est assez élevée. Nous pré-dimensionnons la chaîne de production avec une cadence d'une latte toutes les 3 min soit 30s par cale. Il nous est donc apparu indispensable de réaliser un outil pour simplifier la fixation des cales, d'autant plus que nous estimons qu'il y a environ 400 cales à fixer.

Nous réalisons cet outil et le testons lorsque nous fabriquons les poutres utilisées lors des essais en flexion.

### Outil de fixation des cales de cisaillement



Cales de cisaillement

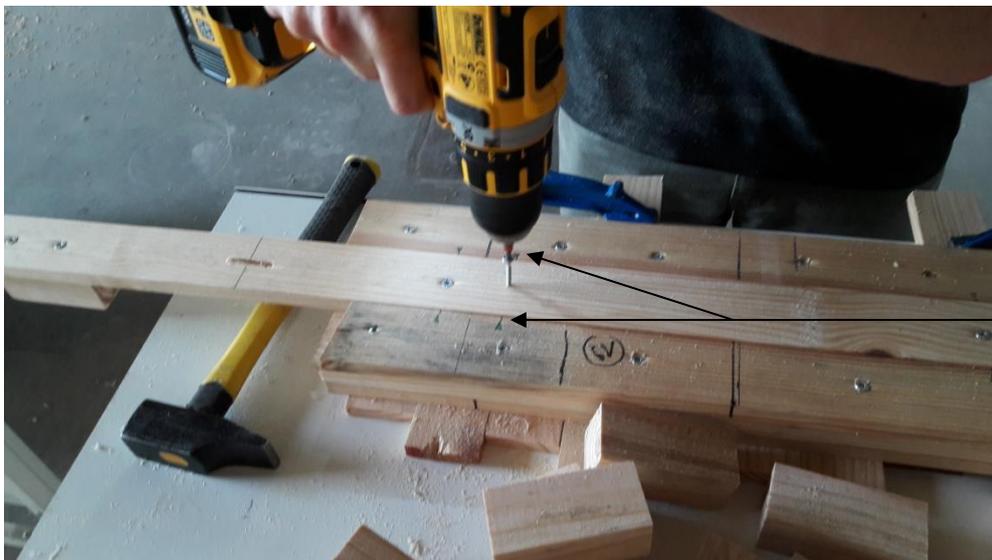
Latte supérieure

Trait d'axe du trou oblong sur la latte

Trait d'axe sur l'outil pour positionner la latte

Butées pour positionner les cales

Une fois les éléments mis en place sur l'outil, celui-ci tient seul la latte et les cales. L'opérateur a alors les deux mains libres pour visser. Des marquages sur l'outil indiquent où positionner les vis.



Marquages indiquant où positionner la vis

## 6. Usinage des lattes

Suite au dimensionnement et au prototypage des différents éléments de la grille bois, l'usinage a débuté. Celui-ci a été réalisé de façon automatisée grâce à une fraise montée sur un bras robotisé.

Après un premier tri des lattes de bois, qui a permis d'éviter les longueurs de bois avec défauts, chaque latte passe sur un banc qui la maintient en position pour assurer un fraisage optimal. Chaque latte a demandé 5 minutes d'usinage. Le bois à disposition était encore vert et/ou avec un taux d'humidité qui a provoqué une usure prématurée des fraises ainsi qu'un bourrage dans l'évacuation des copeaux lors de la réalisation des trous oblongs.

