



Filière  
Bois  
Wallonie



# La densification: un procédé pour ajouter de la valeur au bois feuillu léger

Marie-Stéphane Colla, Sophie Ryelandt, Thomas Pardoën

Louis Wodon, Lucas Bosman, Valentin Coenen, Diego de Crombrughe, Matthieu Gailliez

# Qui sommes-nous ?

## Université catholique de Louvain

~ 6800 employees

~ 39000 students

Located in Louvain-la-Neuve, Brussels, Mons, Tournai

Medical Sciences

Science and Technology

Human Sciences

*Enseignement*

**Ecole Polytechnique de Louvain**

~ 100 faculty members

~ 2200 students

Other schools: Sciences - Bioengineering

*Recherche*

6 other Institutes (e.g. Nano, life, IC, etc ...)

**Institute of mechanics, materials and civil engineering**

~ 30 faculty members

~ 280 researchers

~ 45 admin. and tech. staff

**Materials and process engineering**

~ 90 persons

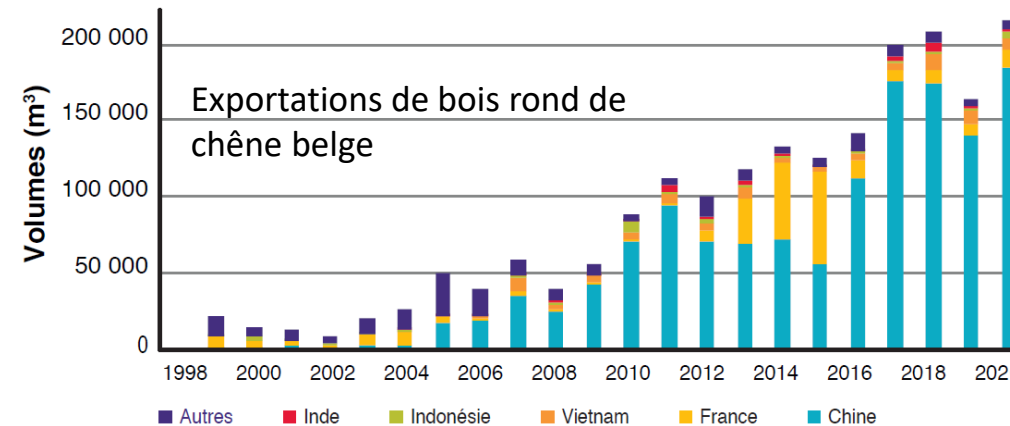
7 faculty members

70 researchers, 13 admin and tech.



## 2 constats : 1) Sous représentation des feuillus dans la chaîne de transformation

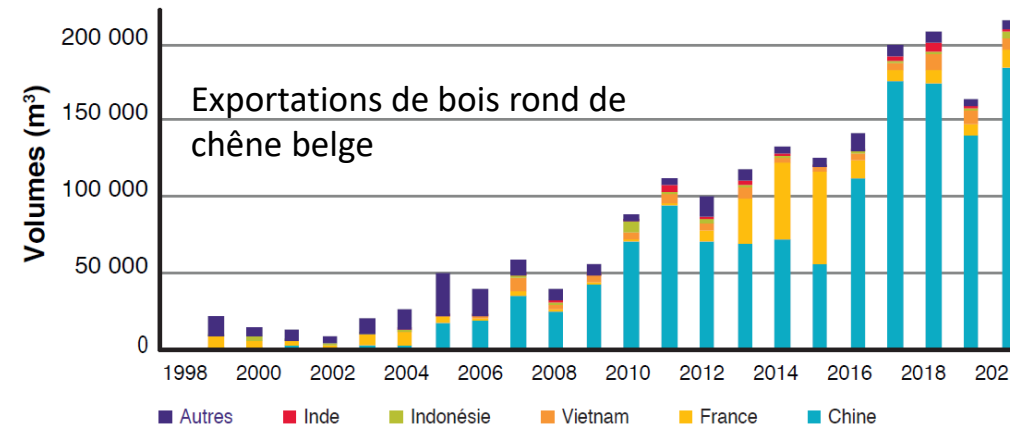
- 57% des arbres belges sont feuillus mais seules 8% des grumes transformées proviennent de feuillus
- Volume important file à l'exportation
- L'industrie de transformation du bois est mieux développée pour les résineux qui sont plus standardisés



Source : Banque Nationale de Belgique. [2021]. Code SH 440391. Analyse OEWB.

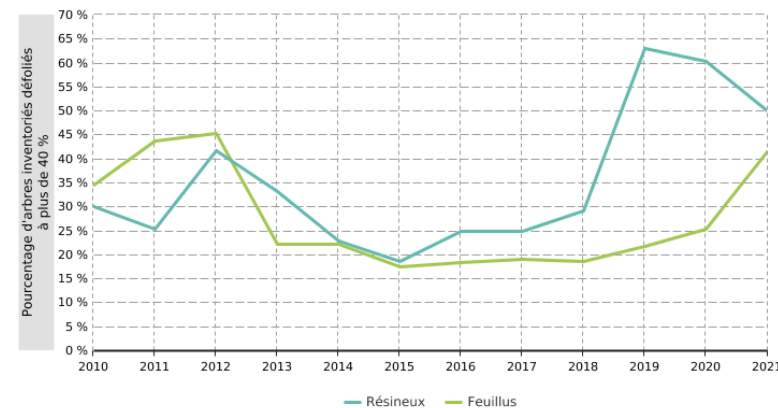
## 2 constats : 1) Sous représentation des feuillus dans la chaîne de transformation

- 53% des arbres belges sont feuillus mais seuls 8% des grumes transformées proviennent de feuillus
- Volume important file à l'exportation
- L'industrie de transformation du bois est mieux développée pour les résineux qui sont plus standardisés



Source : Banque Nationale de Belgique. [2021]. Code SH 440391. Analyse OEWB.

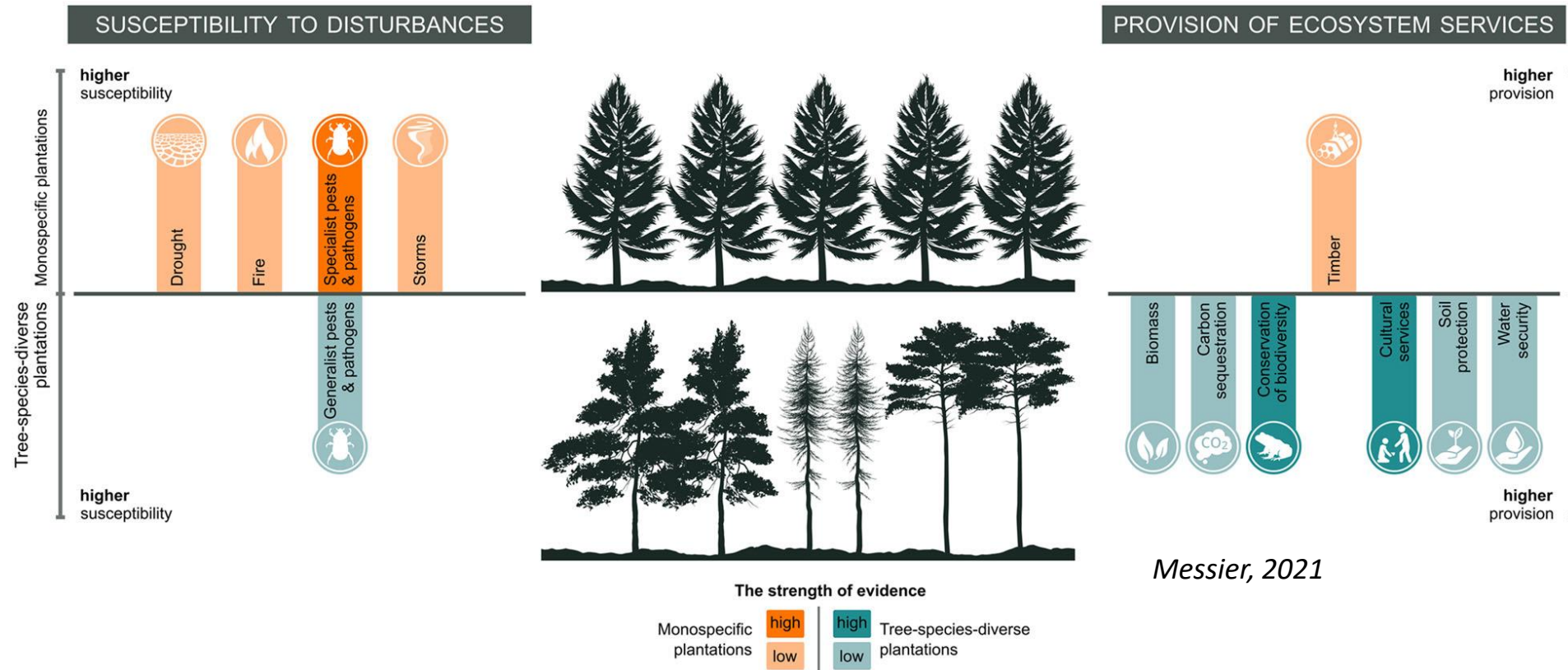
## 2) La santé des forêts inquiète



- Pourcentage d'arbres présentant une défoliation anormale en augmentation
- Vulnérabilité face aux nuisibles et événements climatiques, en raison notamment d'une surreprésentation d'essences denses et de monocultures

# De nouvelles pratiques sylvicoles permettent d'augmenter la résilience des forêts

- Mélange des **essences** et des **âges** au sein des parcelles (complémentarité)
- Introduction d'essences précurseurs à grande vitesse de croissance donc **faible densité**
- Diminution de la **densité** de plantation



Mais modification de la productivité des forêts et des essences à transformer

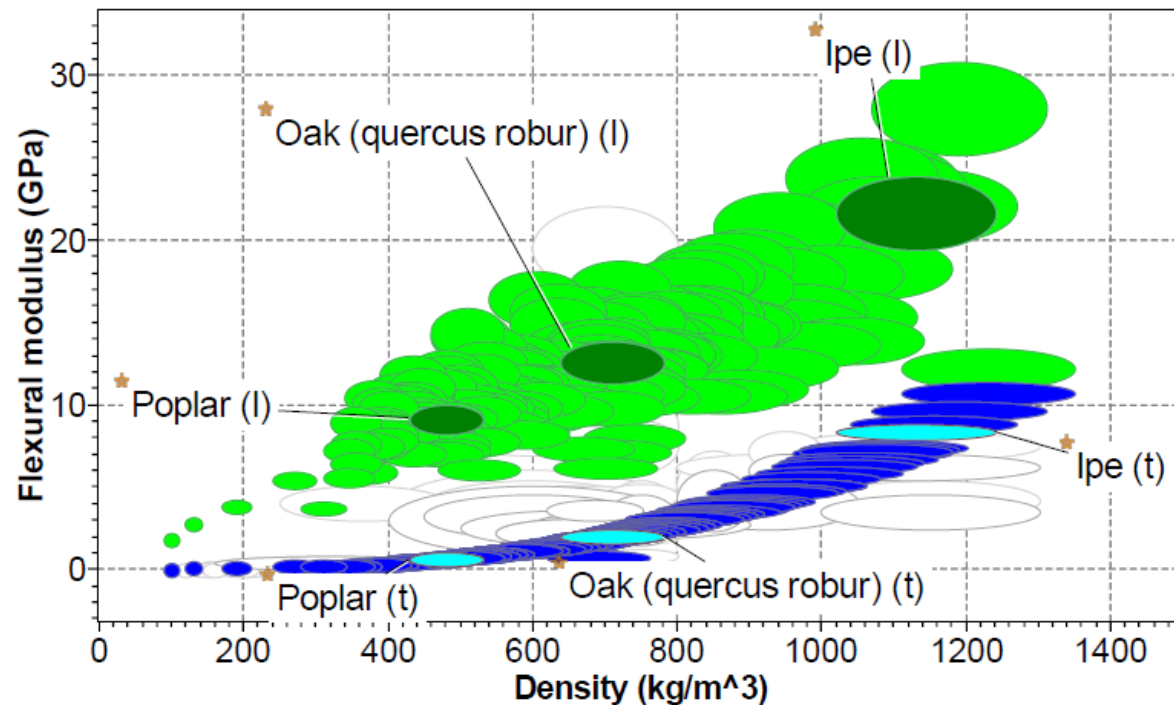


Besoin de proposer des solutions pour ajouter de la valeur au bois feuillu peu dense et donc peu attrayant économiquement.



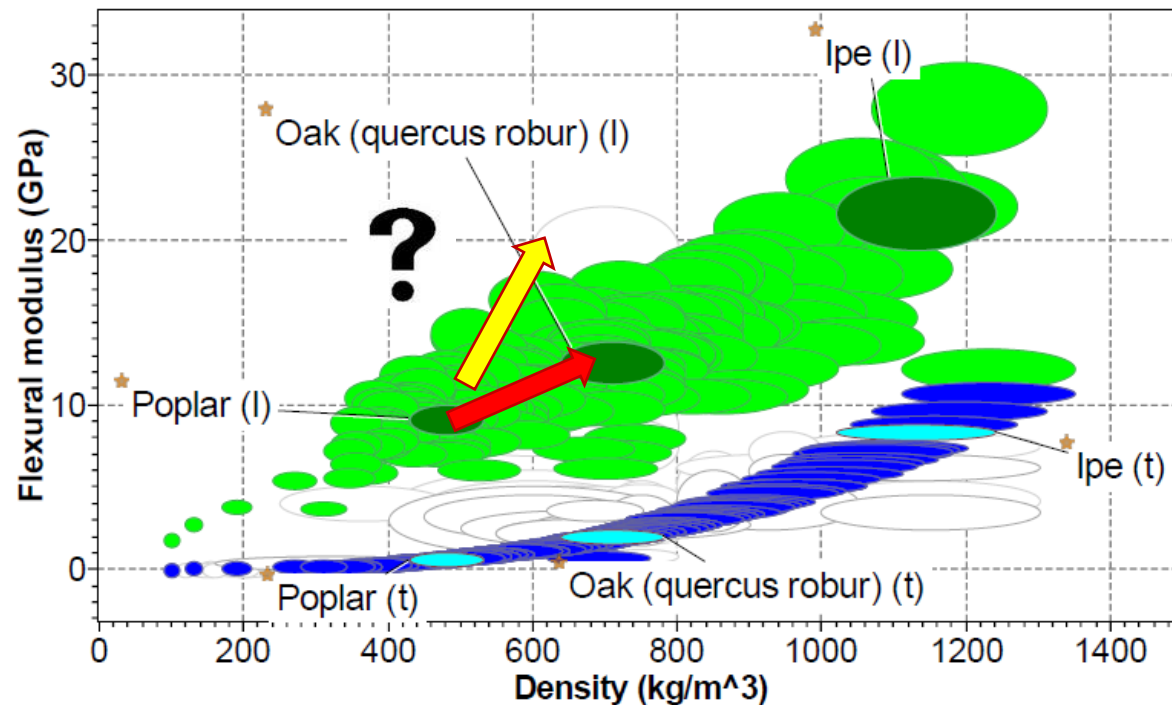
# Notre objectif : densifier le bois feuillu léger pour accroître ses performances mécaniques et diversifier ses usages

En utilisant une **méthodologie de sélection rationnelle** des matériaux et procédés pour cibler quelles propriétés seront clés pour augmenter la performance vis-à-vis d'une application donnée



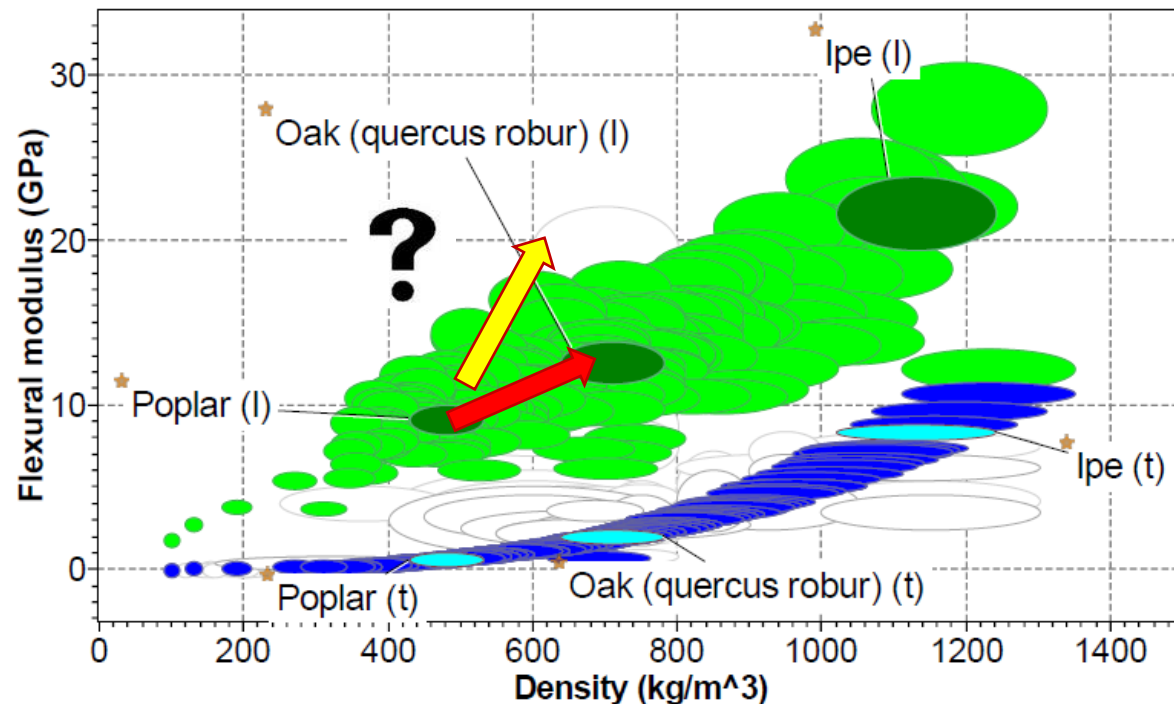
# Notre objectif : densifier le bois feuillu léger pour accroître ses performances mécaniques et diversifier ses usages

En utilisant une **méthodologie de sélection rationnelle** des matériaux et procédés pour cibler quelles propriétés seront clés pour augmenter la performance vis-à-vis d'une application donnée



# Notre objectif : densifier le bois feuillu léger pour accroître ses performances mécaniques et diversifier ses usages

En utilisant une **méthodologie de sélection rationnelle** des matériaux et procédés pour cibler quelles propriétés seront clés pour augmenter la performance vis-à-vis d'une application donnée



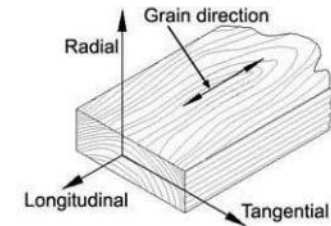
Notre application cible: les dalles de terrasse avec mise en forme simultanée



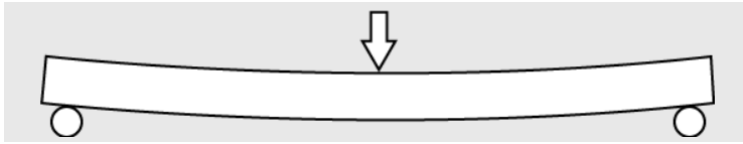
- Permet l'utilisation d'essences non utilisables avant
- Perte au sciage diminuées
- Durabilité augmentée



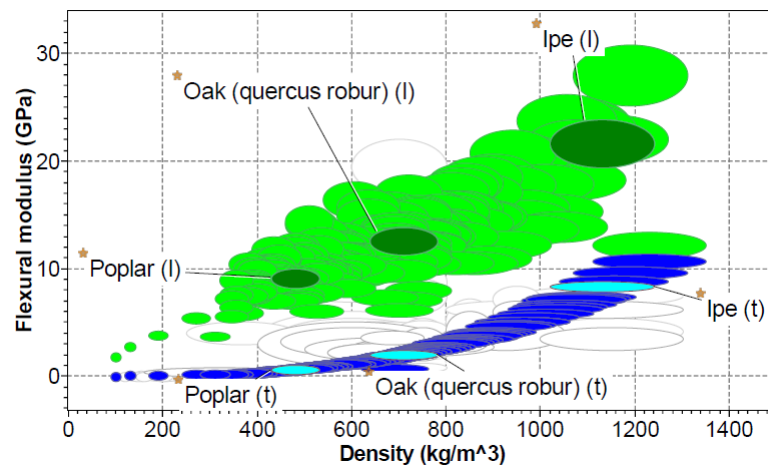
# La masse volumique affecte les propriétés mécaniques du bois



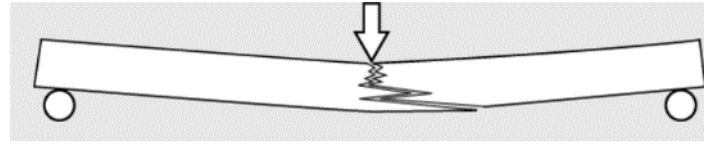
## Module d'élasticité (E ou MOE)



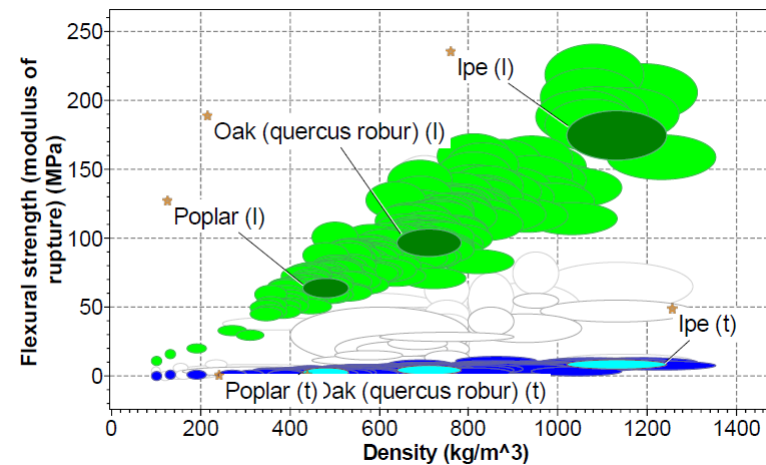
= rigidité, à quel point un matériau peut être déformé facilement



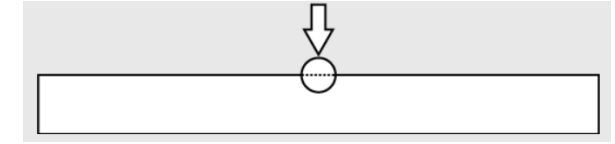
## Résistance à la fissuration ( $\sigma_f$ ou MOR)



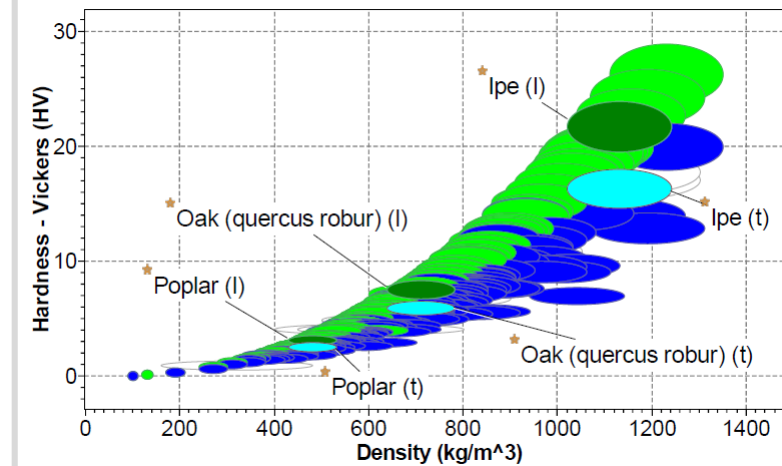
= jusqu'où peut-t-on déformer un matériau sans le casser



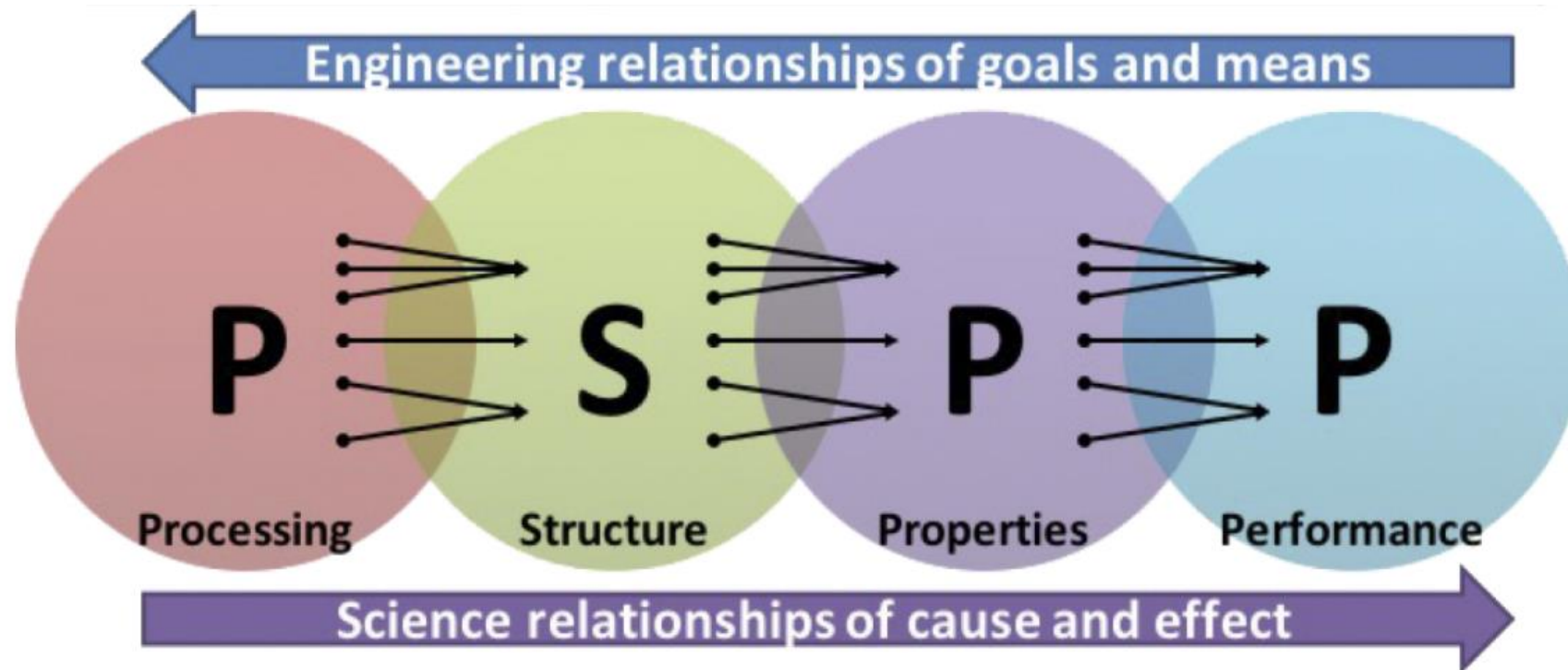
## Dureté (H)



= résistance d'un matériau à être marqué par un autre

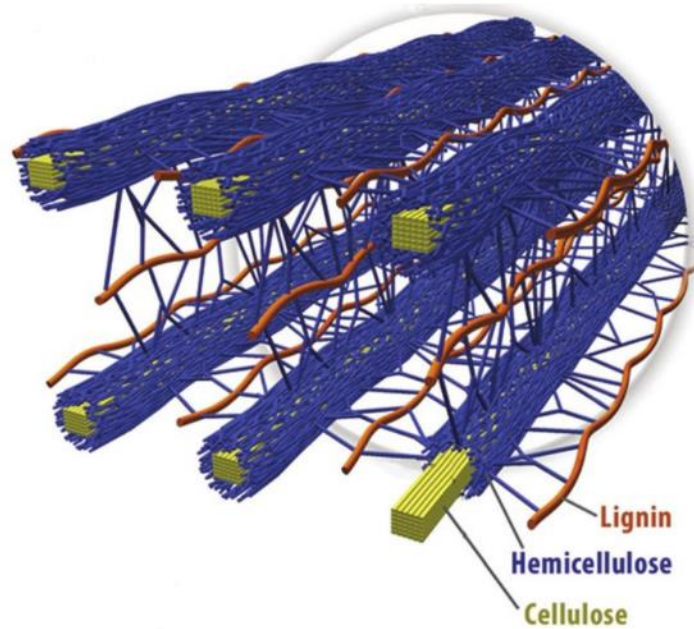


# La science des matériaux



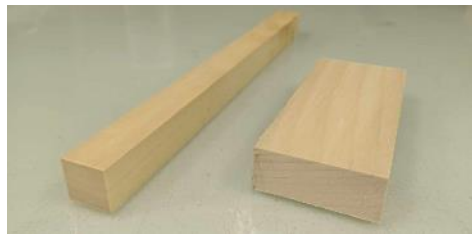
*Agrawal and Choudhary (2016)*

# Le bois est un matériau composite naturel



Il est composé de 3 polymères (grandes molécules faites de chaînes d'atomes) :

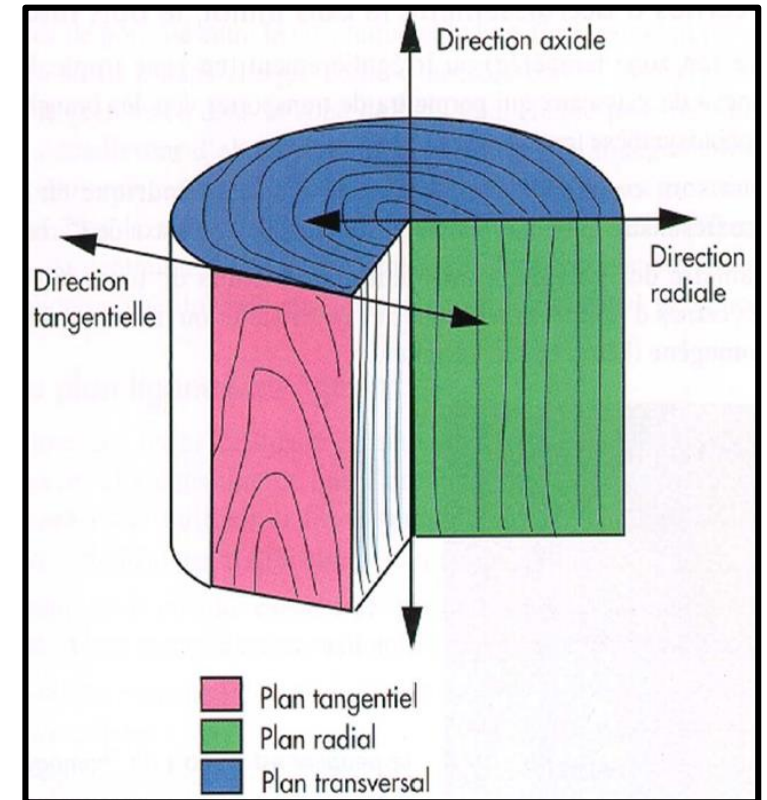
- **Cellulose**: 40-50 %, semi-cristallin, procure structure et résistance
- **Hemicellulose**: 25-40 %, amorphe, entoure la cellulose
- **Lignine**: 20-35 %, amorphe, agit comme un ciment entre la cellulose et l'hémicellulose



## Essence étudiée:

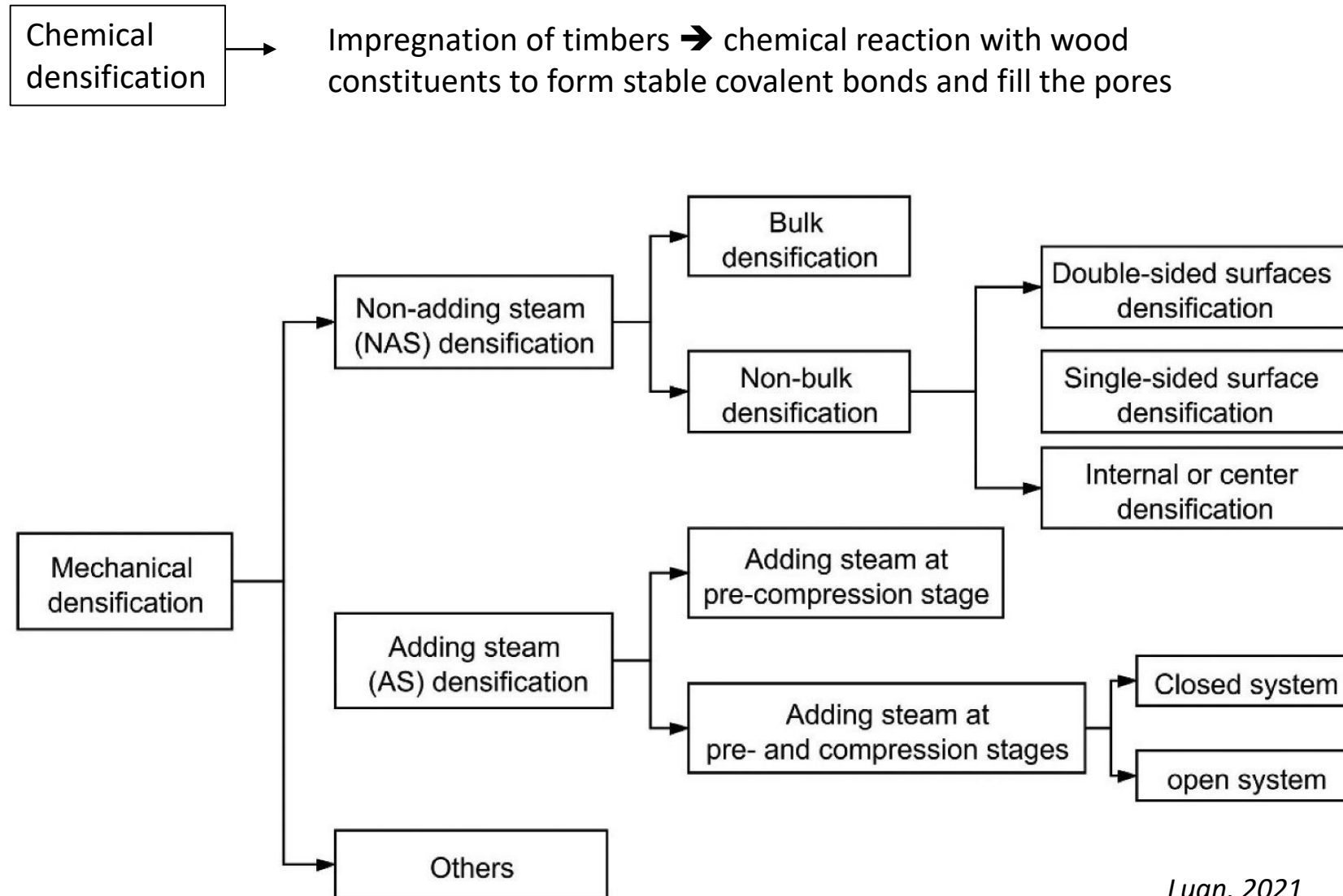
Peuplier (*populus tremula*) provenant d'une forêt belge

Masse volumique initiale = 460-550 kg/m<sup>3</sup>



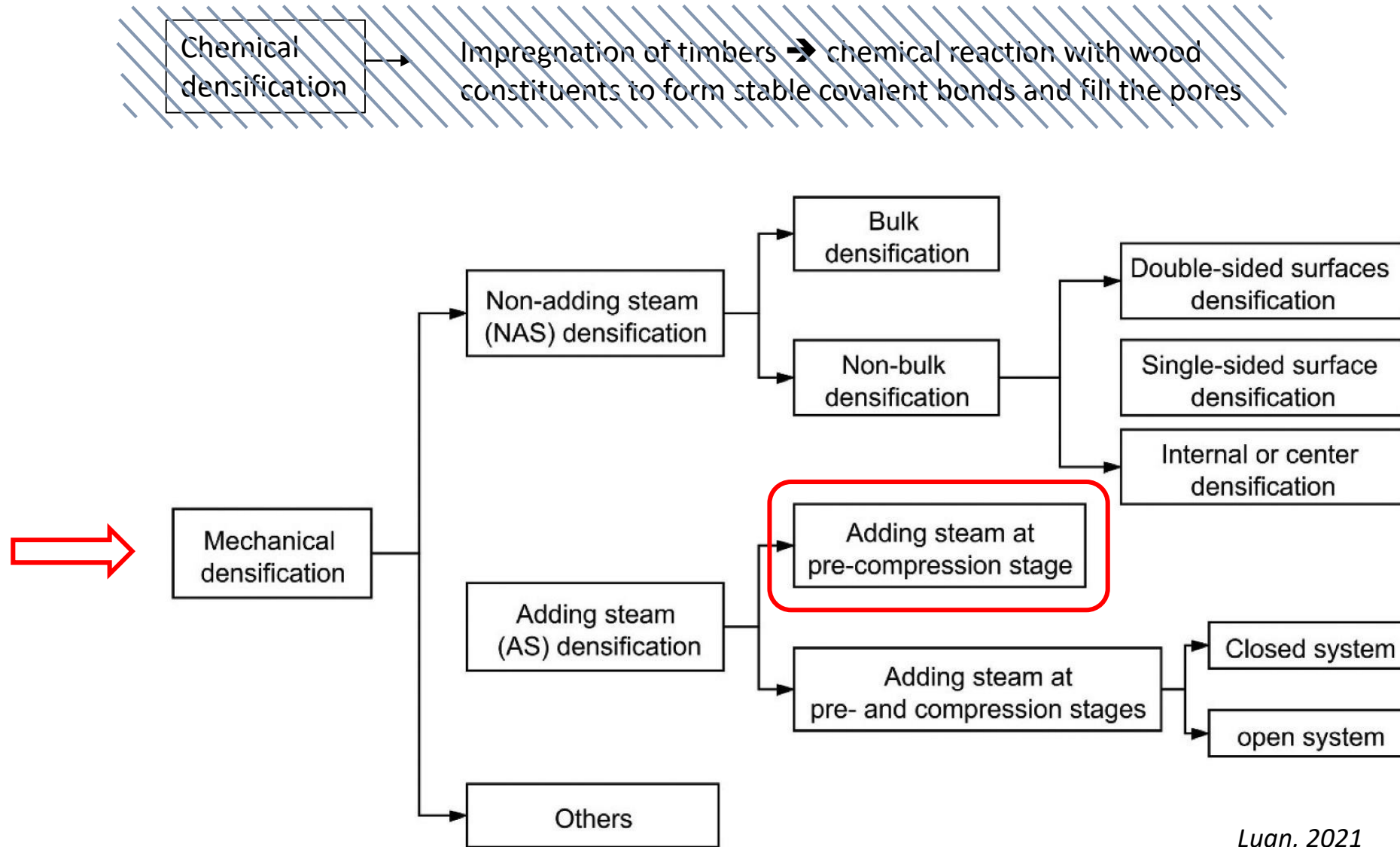
La direction selon laquelle on sollicite le bois affecte ses propriétés

# Il existe un grande variété de procédés de densification



Luan, 2021

# Il existe un grande variété de procédés de densification

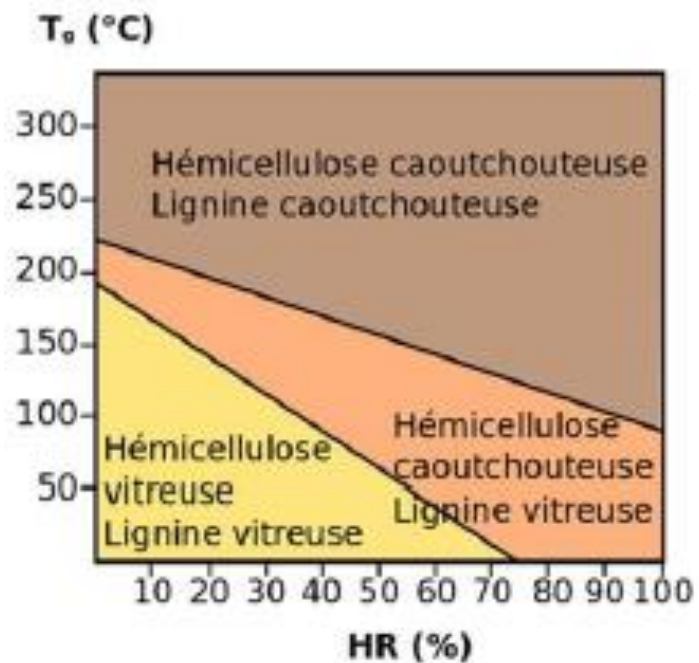


Luan, 2021



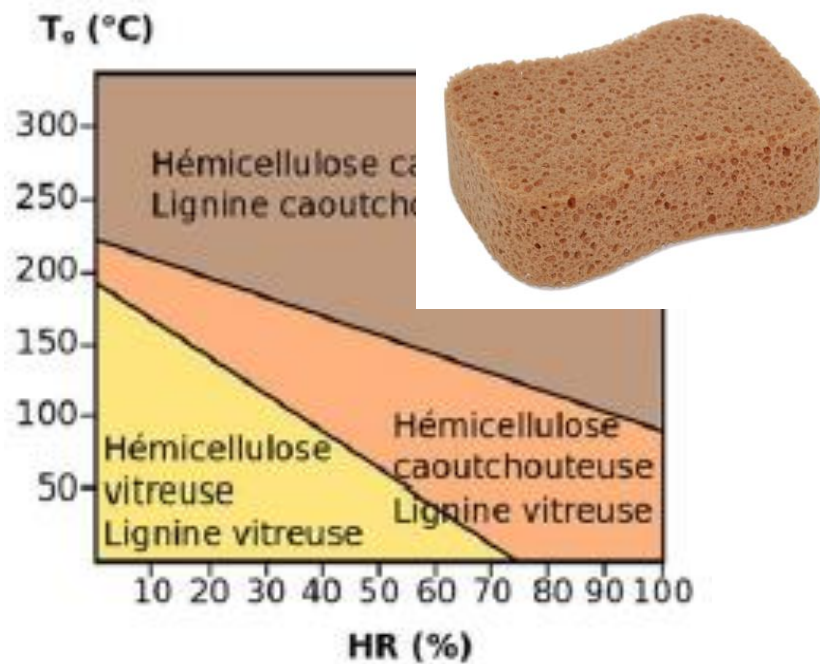
# Procédé de densification par voie thermo-hygro-mécanique : 3 étapes

- 1 Mise en condition du bois:**  
Combine  $T^\circ$  and humidité pour rendre le bois « mou et déformable » → état viscoplastique



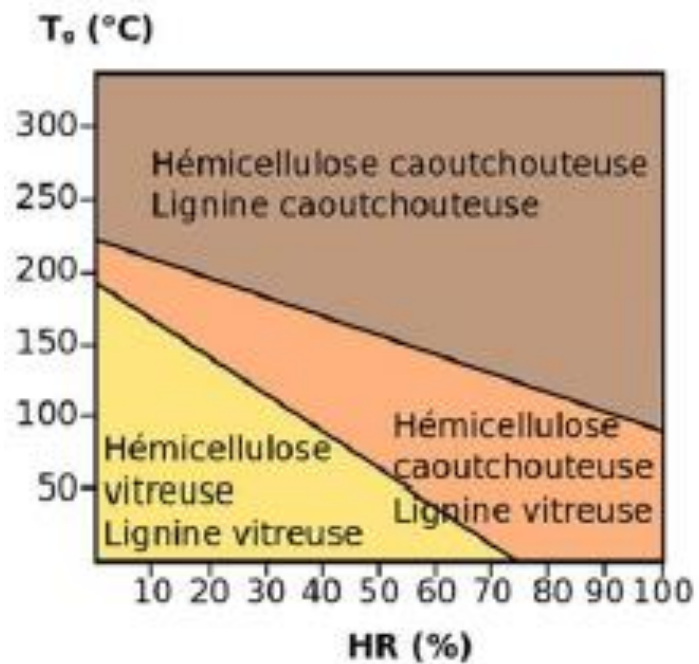
# Procédé de densification par voie thermo-hygro-mécanique : 3 étapes

- 1 Mise en condition du bois:**  
Combine  $T^\circ$  and humidité pour rendre le bois « mou et déformable » → état viscoplastique

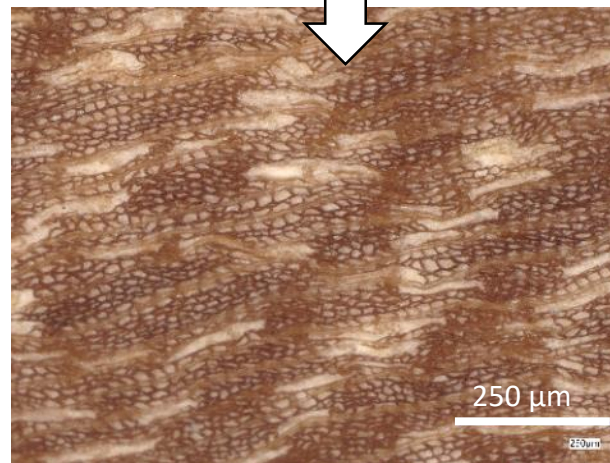
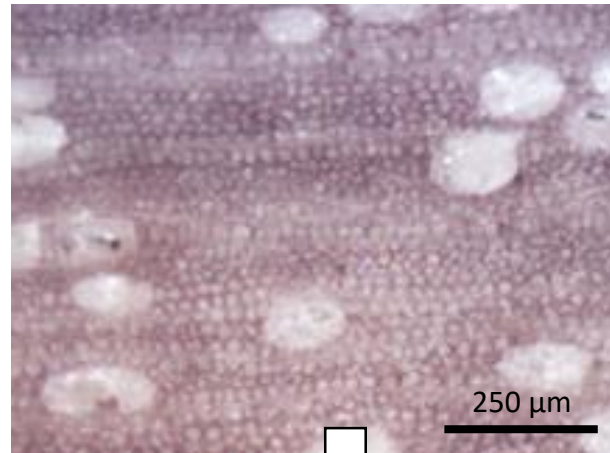


# Procédé de densification par voie thermo-hygro-mécanique : 3 étapes

**1 Mise en condition du bois:**  
Combine  $T^\circ$  and humidité pour rendre le bois « mou et déformable » → état viscoplastique

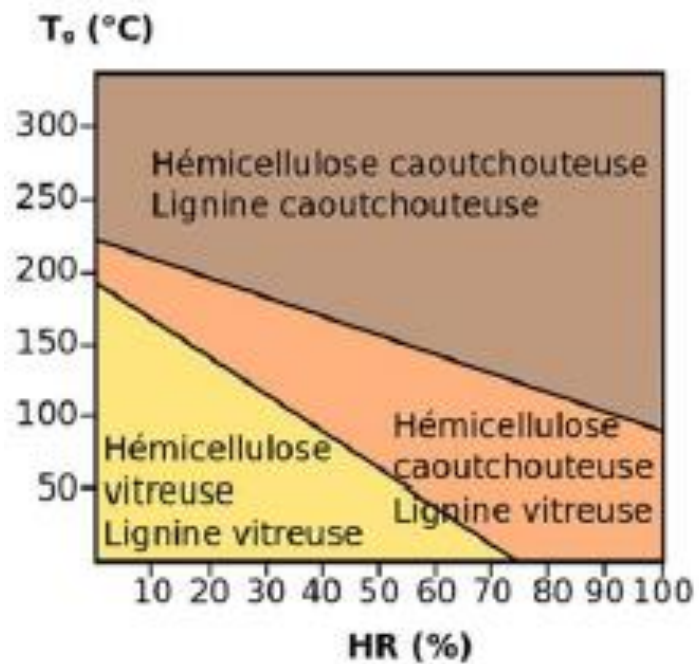


**2 Compression:** fermeture des porosités du bois

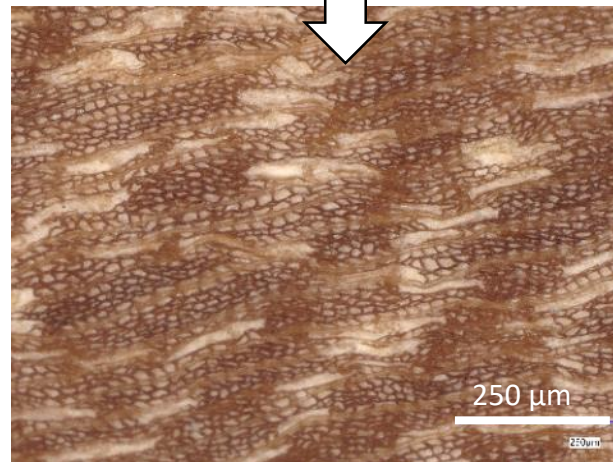
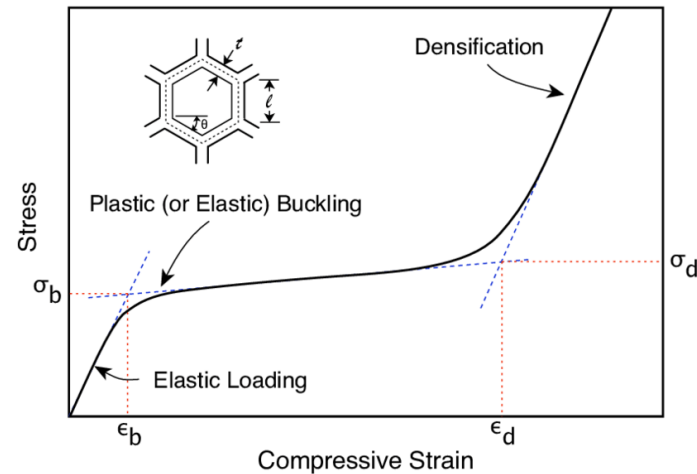


# Procédé de densification par voie thermo-hygro-mécanique : 3 étapes

**1 Mise en condition du bois:**  
Combine  $T^\circ$  and humidité pour rendre le bois « mou et déformable »  $\rightarrow$  état viscoplastique



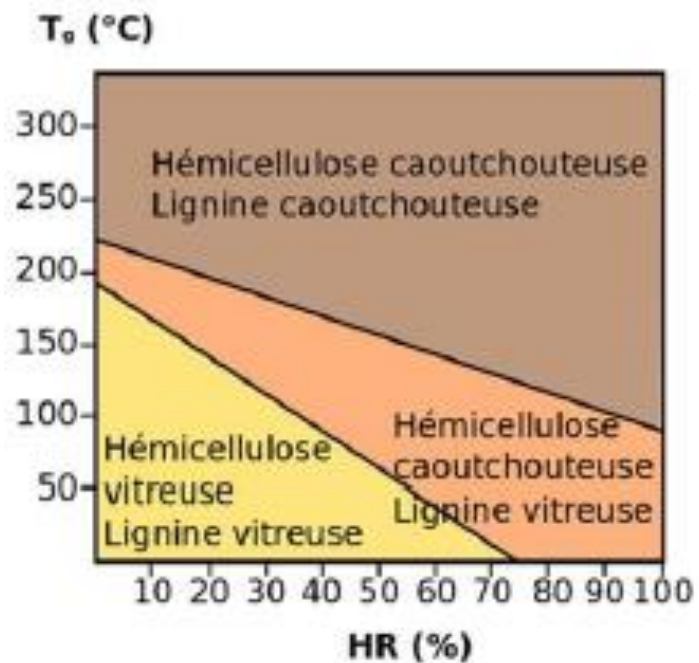
**2 Compression:** fermeture des porosités du bois



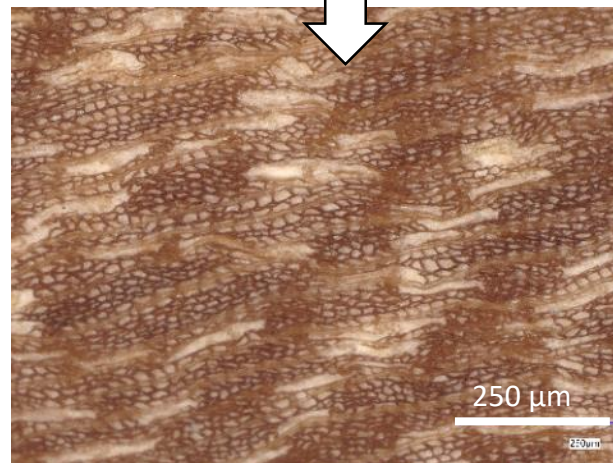
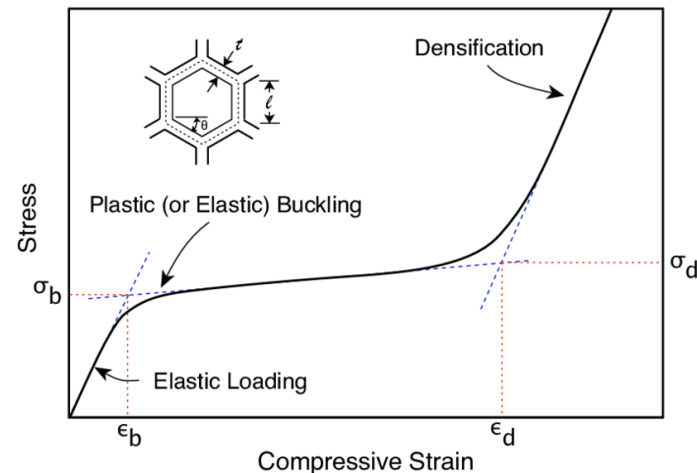


# Procédé de densification par voie thermo-hygro-mécanique : 3 étapes

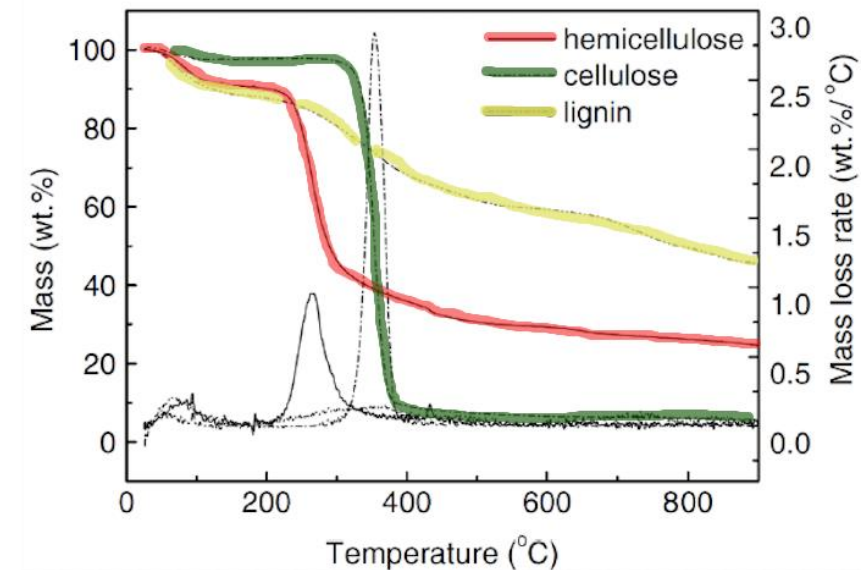
- 1 Mise en condition du bois:**  
Combine  $T^\circ$  and humidité pour rendre le bois « mou et déformable »  $\rightarrow$  état viscoplastique



- 2 Compression:** fermeture des porosités du bois



- 3 Post-traitement:** Dégradation de l'hemicellulose pour figer la structure compressée  $\rightarrow$  stabilité dimensionnelle





# Procédé de densification par voie thermo-hygro-mécanique : 3 étapes

**1 Mise en condition du bois:**  
Combine T° and humidité pour rendre le bois « mou et déformable » → état viscoplastique



**2 Compression:** fermeture des porosités du bois



**3 Post-traitement:** Dégradation de l'hemicellulose pour figer la structure compressée → stabilité dimensionnelle



# Procédé de densification par voie thermo-hygro-mécanique : 3 étapes

- 1 Mise en condition du bois:**  
Combine T° and humidité pour rendre le bois « mou et déformable » → état viscoplastique



- 2 Compression:** fermeture des porosités du bois

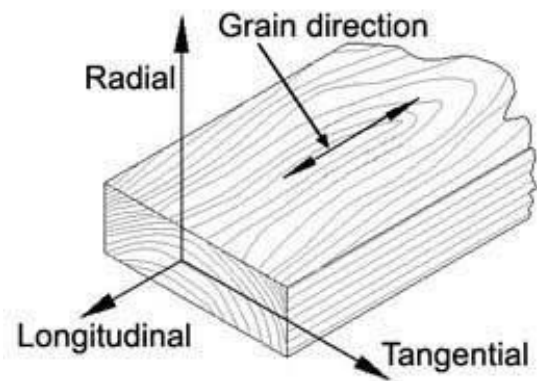


- 3 Post-traitement:** Dégradation de l'hemicellulose pour figer la structure compressée → stabilité dimensionnelle

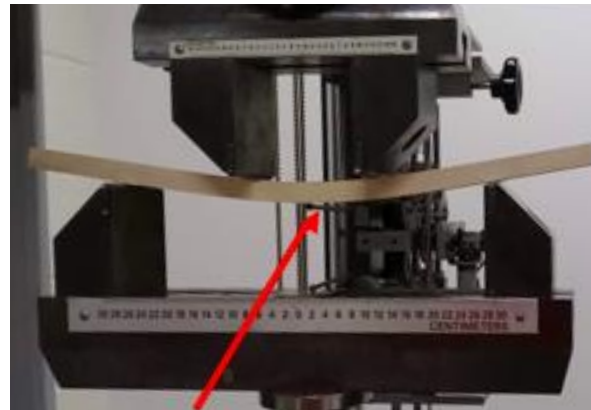


# Caractérisation des propriétés après densification

Densification selon la direction radiale



Essai de flexion ( $E$  et  $\sigma_f$ )



Mesure de la flèche et de la force correspondante

Essai de dureté ( $H$ )





# Procédé de densification par voie thermo-hygro-mécanique : 3 étapes

- 1 Mise en condition du bois:**  
Combine T° and humidité pour rendre le bois « mou et déformable » → état viscoplastique



- T = 95°C
- HR = 98 %
- Jusqu'à stabilisation de la masse

- 2 Compression:** fermeture des porosités du bois



- 3 Post-traitement:** Dégradation de l'hemicellulose pour figer la structure compressée → stabilité dimensionnelle



- T = 180 °C
- Durée = 45 min
- Refroidissement naturel

# Pre-identification step : design of experiment and response surface methodology

Pre-compression stage constant:

- T = 95°C
- MC = 98 %
- Duration up to specimen mass stabilization

Post-treatment stage constant:

- T = 180 °C
- Duration = 45 min
- Natural cooling rate

| Variable                      | Code and values |      |      |
|-------------------------------|-----------------|------|------|
|                               | -1              | 0    | 1    |
| R: compression ratio (%)      | 50              | 62,5 | 75   |
| T: temperature (°C)           | 140             | 170  | 200  |
| D: relaxation duration (s)    | 500             | 1150 | 1800 |
| V: deformation speed (mm/min) | 0,5             | 2,25 | 4    |



# Pre-identification step : design of experiment and response surface methodology

Pre-compression stage constant:

- T = 95°C
- MC = 98 %
- Duration up to specimen mass stabilization

Post-treatment stage constant:

- T = 180 °C
- Duration = 45 min
- Natural cooling rate

| Variable                      | Code and values |      |      |
|-------------------------------|-----------------|------|------|
|                               | -1              | 0    | 1    |
| R: compression ratio (%)      | 50              | 62,5 | 75   |
| T: temperature (°C)           | 140             | 170  | 200  |
| D: relaxation duration (s)    | 500             | 1150 | 1800 |
| V: deformation speed (mm/min) | 0,5             | 2,25 | 4    |

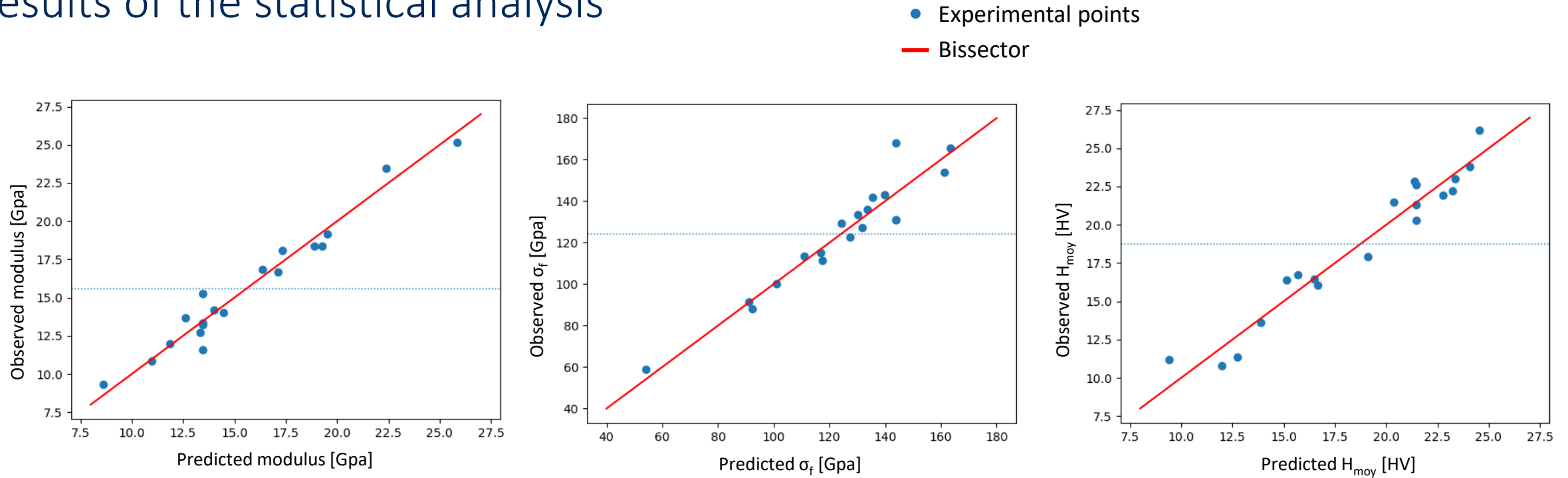
| Linear relation | Quadratic relation | Interactions |
|-----------------|--------------------|--------------|
| R               | R <sup>2</sup>     | (R, T)       |
| T               | T <sup>2</sup>     | (R, D)       |
| D               | D <sup>2</sup>     | (R, V)       |
| V               | V <sup>2</sup>     | (T, D)       |
|                 |                    | (T, V)       |
|                 |                    | (D, V)       |

21 experiments distributed among 3 independent blocs

JMP software

Responses to maximise: E,  $\sigma_f$ ,  $H_{moy}$  obtained from flexion test and micro-hardness

# Results of the statistical analysis



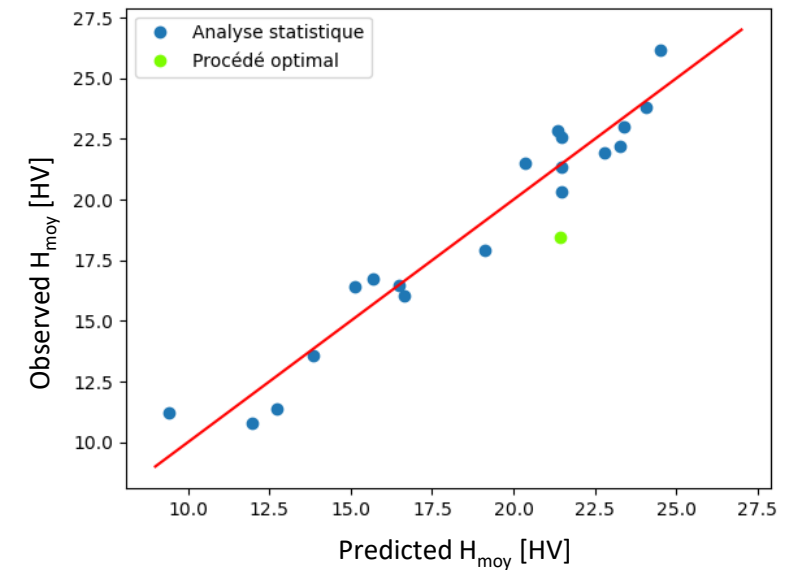
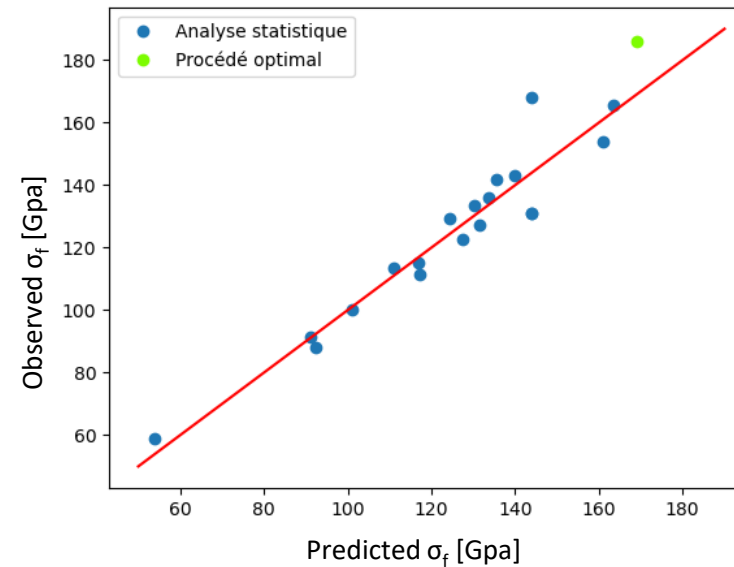
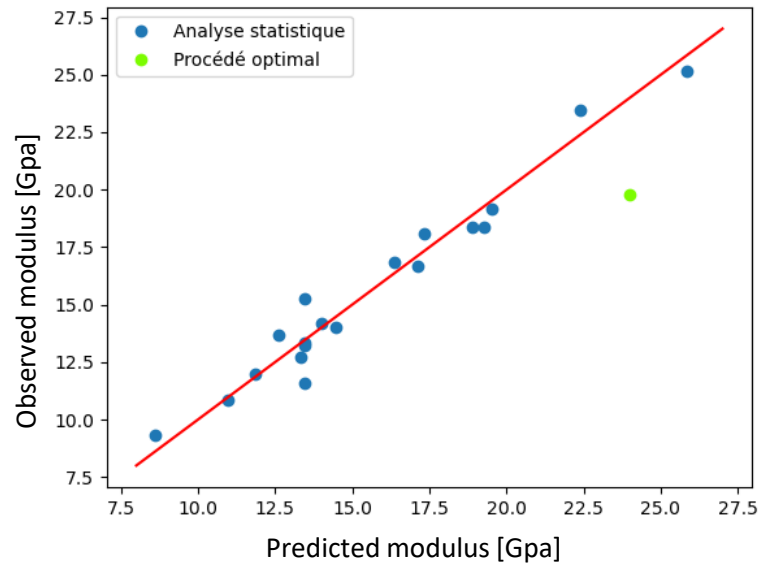
## Parameter identification to correlate prediction and experimental characterization

$$E_f = 13.46 - 0.37 \times T - 2.03 \times R + 1.38 \times V - 0.39 \times D + 4.67 \times T^2 + 1.27 \times T \cdot R - 3.11 \times R^2 - 1.93 \times T \cdot V - 2.66 \times R \cdot V + 1.18 \times V^2 + 0.78 \times T \cdot D + 2.48 \times R \cdot D + 1.65 \times V \cdot D + 0.04 \times D^2$$

$$\sigma_f = 143.91 - 8.2 \times T - 2.33 \times R + 13.58 \times V - 4.31 \times D + 2.58 \times T^2 - 2.96 \times T \cdot R - 17.47 \times R^2 + 9.77 \times T \cdot V - 5.55 \times R \cdot V - 5.96 \times V^2 - 4.45 \times T \cdot D + 22.63 \times V \cdot D - 6.34 \times D^2$$

$$H_{moy,i} = 21.47 + 1.8 \times T + 3.22 \times R + 0.48 \times V + 2.49 \times D - 0.43 \times T^2 - 0.41 \times T \cdot R - 2.7 \times R^2 + 1.17 \times T \cdot V - 0.52 \times R \cdot V - 0.85 \times T \cdot D - 0.13 \times R \cdot D + 0.06 \times V \cdot D$$

# Optimisation of the responses ( $E$ , $\sigma_f$ , $H_{moy}$ )



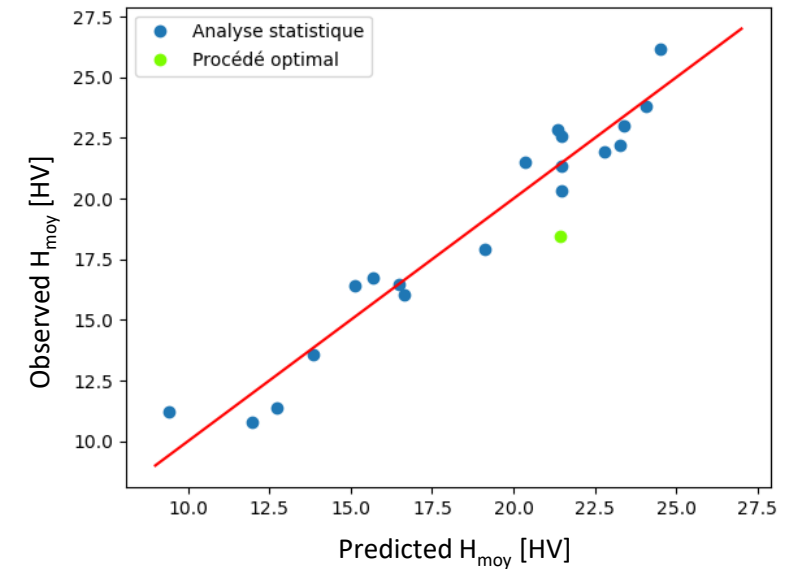
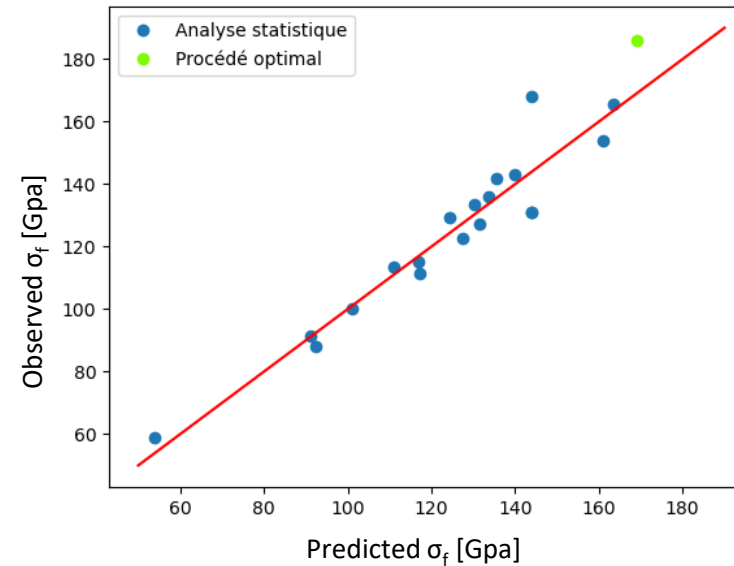
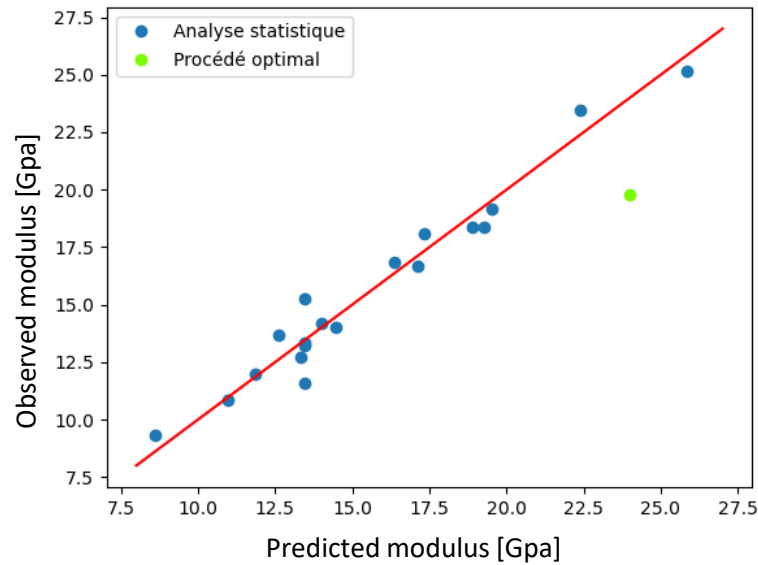
Optimisation: weighting such as elastic modulus and fracture stress is twice more important than hardness



## Optimal conditions:

- $T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$
- $R = 60,6 \%$
- $V = 4 \text{ mm/min}$
- $D = 1800 \text{ s}$

# Optimisation of the responses ( $E$ , $\sigma_f$ , $H_{moy}$ )



Optimisation: weighting such as elastic modulus and fracture stress is twice more important than hardness



## Optimal conditions:

- $T = 140\text{ °C}$  and  $170\text{ °C}$
  - $R = 60,6\%$
  - $V = 4\text{ mm/min}$
  - $D = 1800\text{ s}$
- } Boundary values !



# Propriétés optimales et optimisation du procédé de densification

## Optimal conditions:

- $T = 140\text{ °C}$  and  $170\text{ °C}$
- $R = 60,6\%$
- $V = 4\text{ mm/min}$
- $D = 1800\text{ s}$

Valeurs limites du  
domaine étudié !



Maximiser vitesse de déformation  
Maximiser durée de maintien



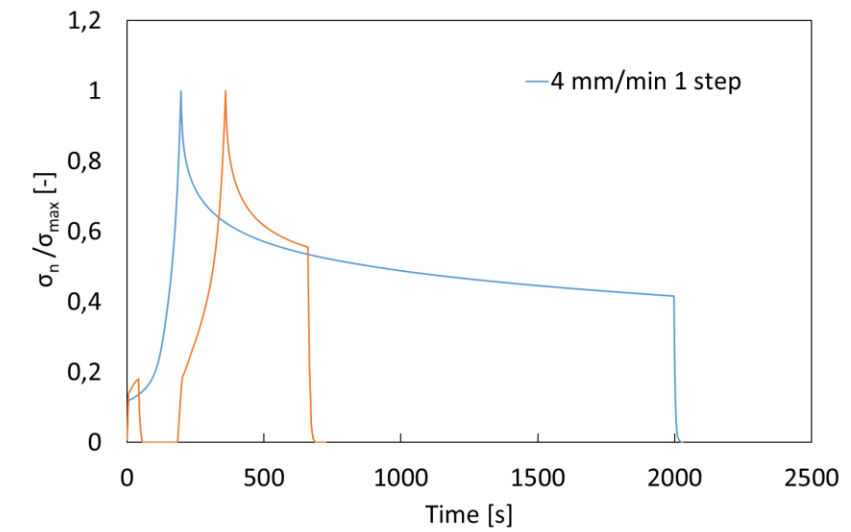
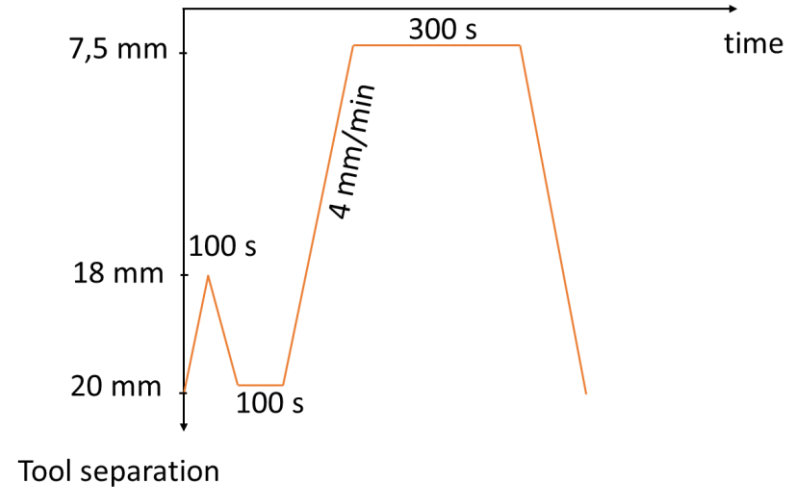
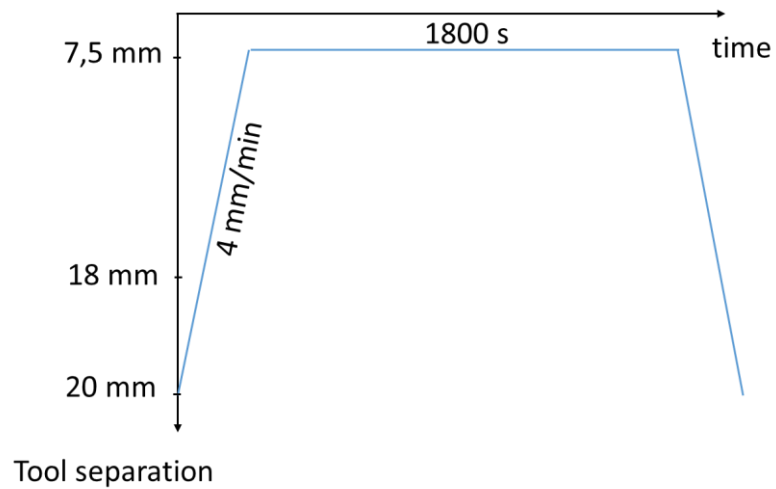
Section initiale



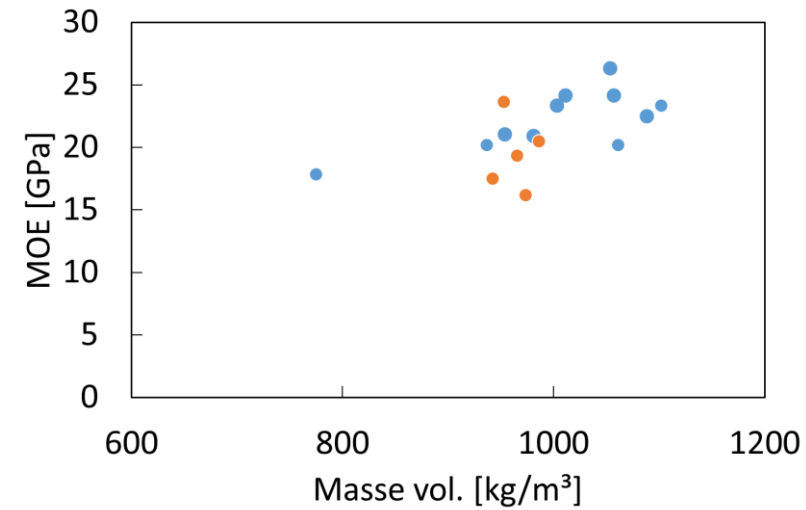
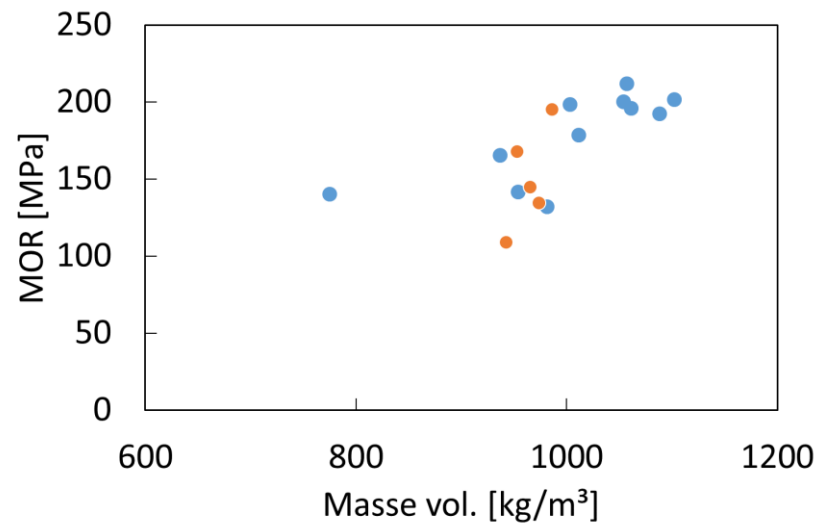
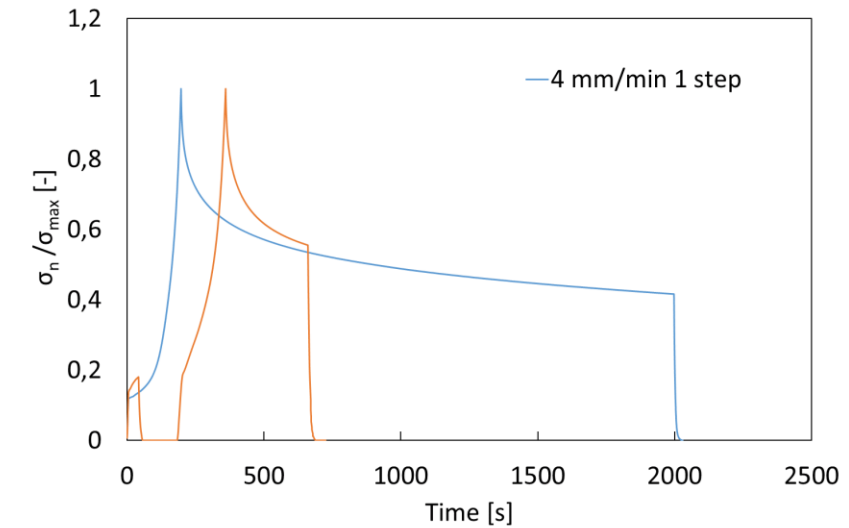
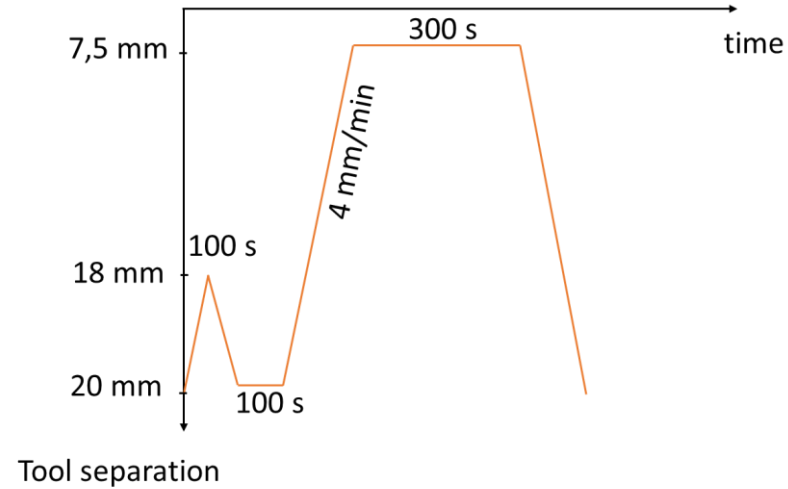
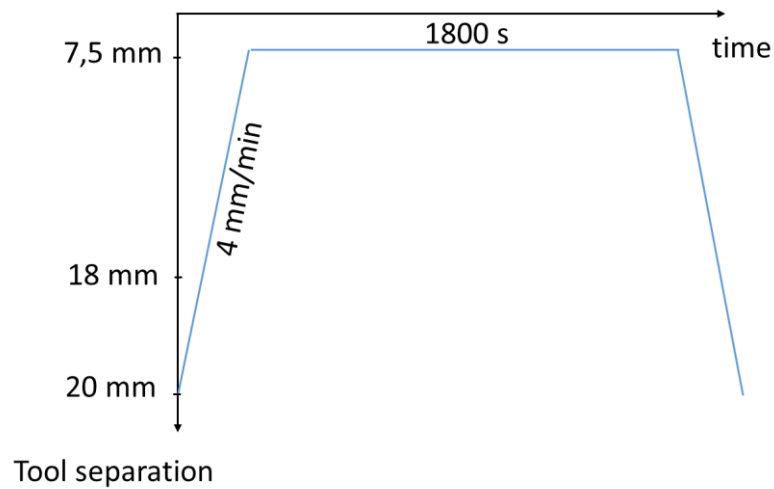
+ Eviter l'apparition d'endommagement au sein du bois



# Densifier par paliers permet de diminuer la durée du procédé



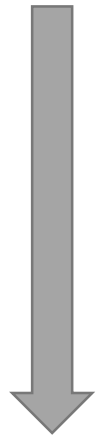
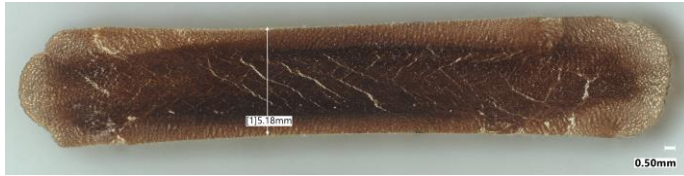
# Densifier par paliers permet de diminuer la durée du procédé



Diminution de la durée  
d'un facteur 6 du procédé  
tout en gardant la  
performance mécanique

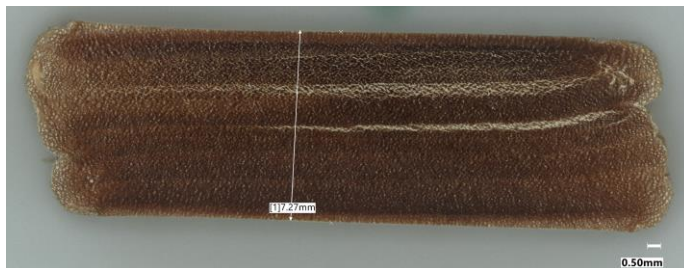
# Augmenter la vitesse de compression permet d'éviter l'endommagement

4mm/min - 1800s - 170°

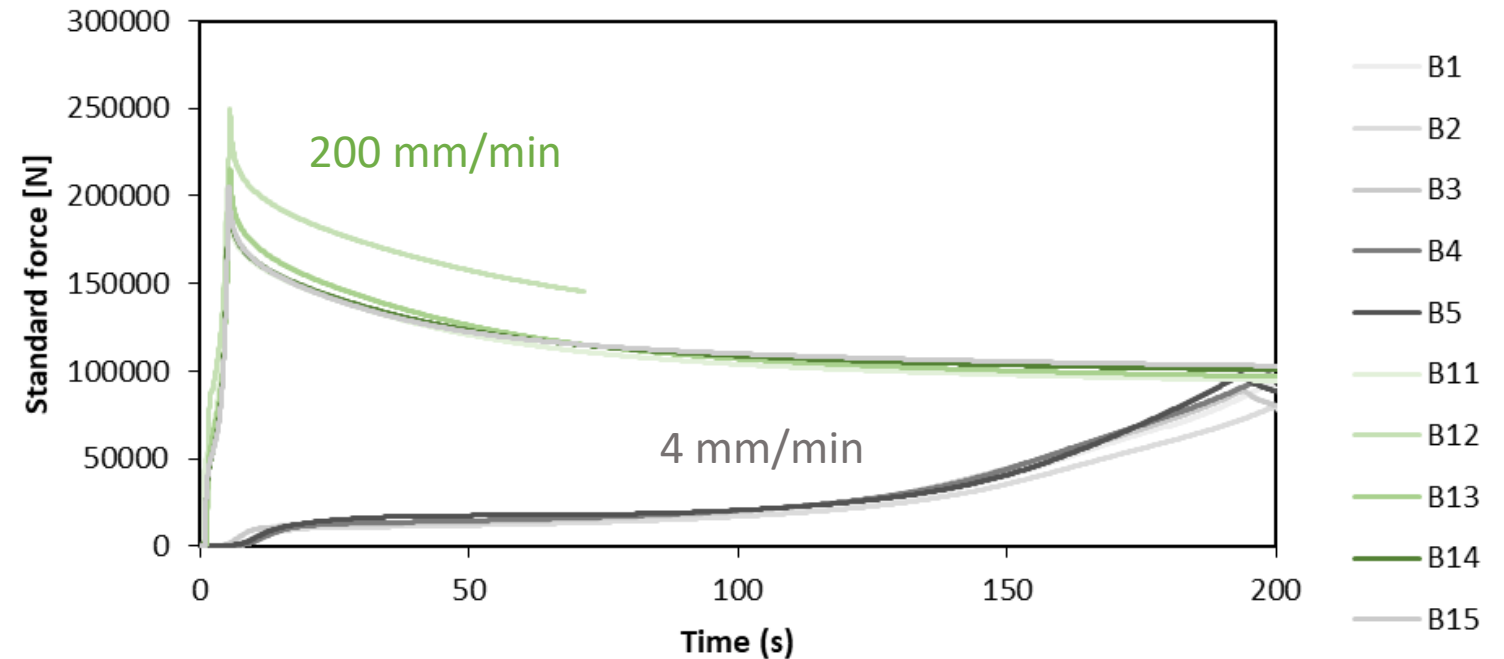


Durée étape de densification divisée par 40

200mm/min - 1800s - 170°



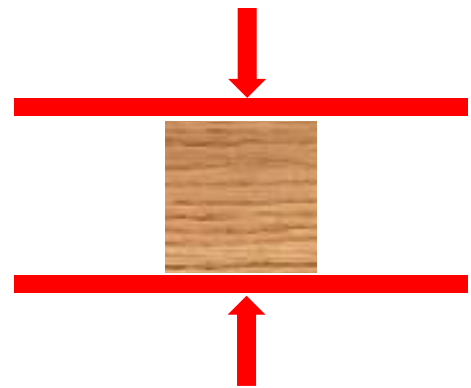
MAIS la force nécessaire pour densifier augmente (matériau visco-élastique et visco-plastique)



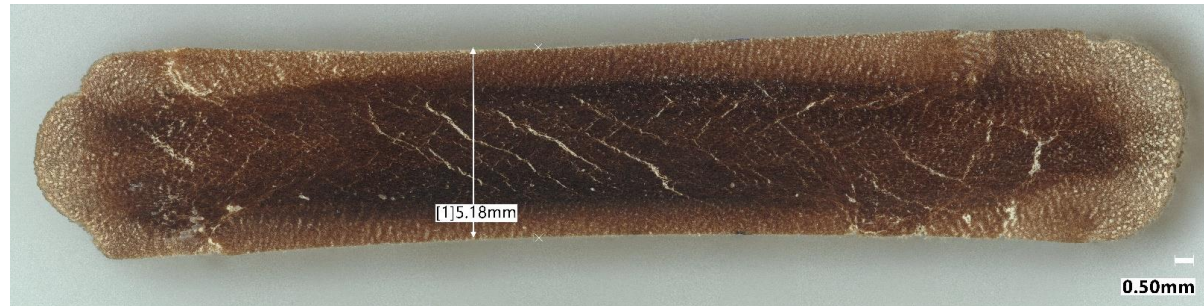
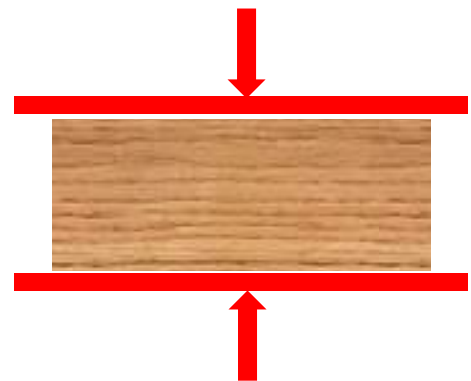
Réduire la durée permet d'éviter une trop grande perte d'humidité et donc de repasser sous la  $T_g$  du bois



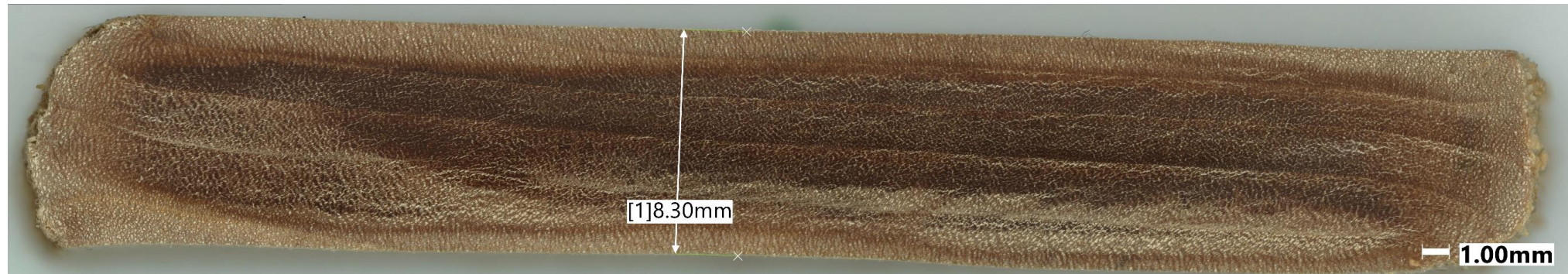
# Jouer sur le confinement de la matière permet d'éviter l'endommagement



vs.



4mm/min - 1800s - 170°

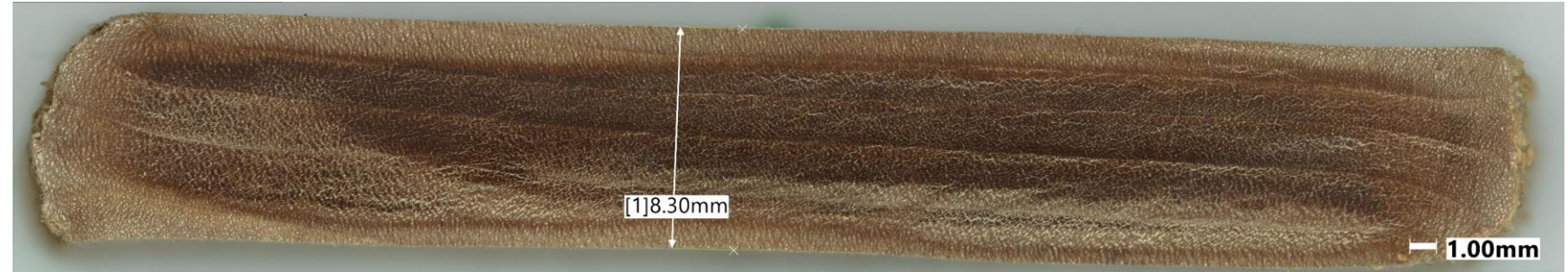
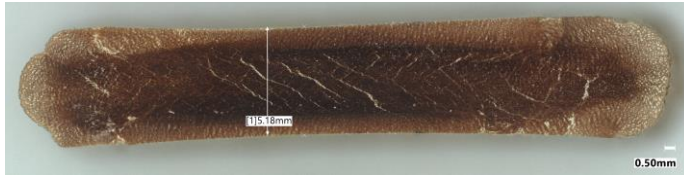


Paramètres de densification similaires, rapport hauteur/largeur différent  
Retour élastique plus important mais est fonction des paramètres de densification

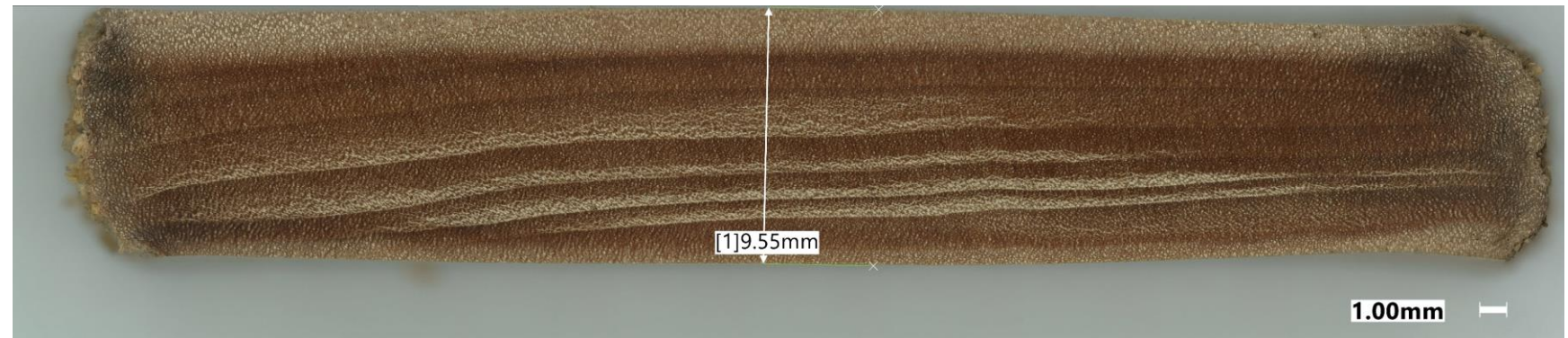


# Contrôle du retour élastique en jouant sur les paramètres

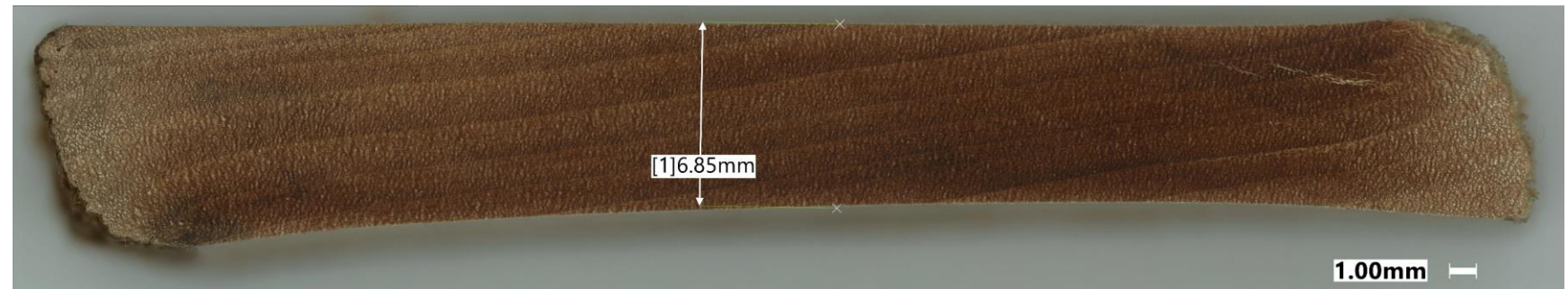
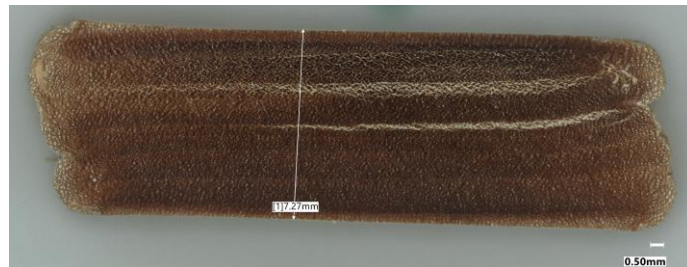
4mm/min - 1800s - 170°



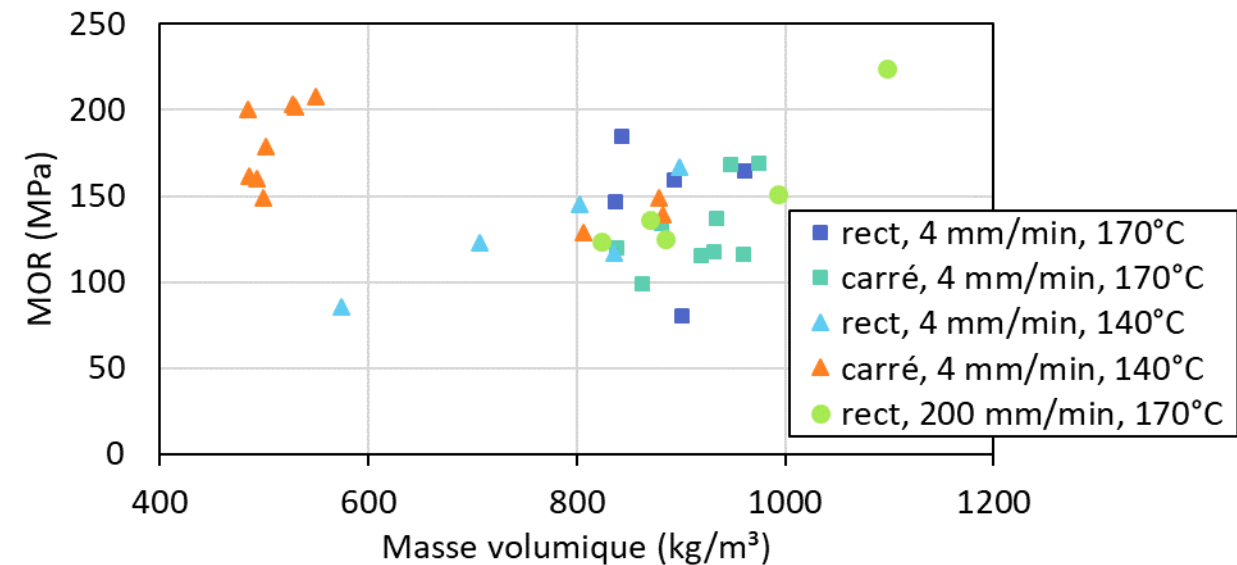
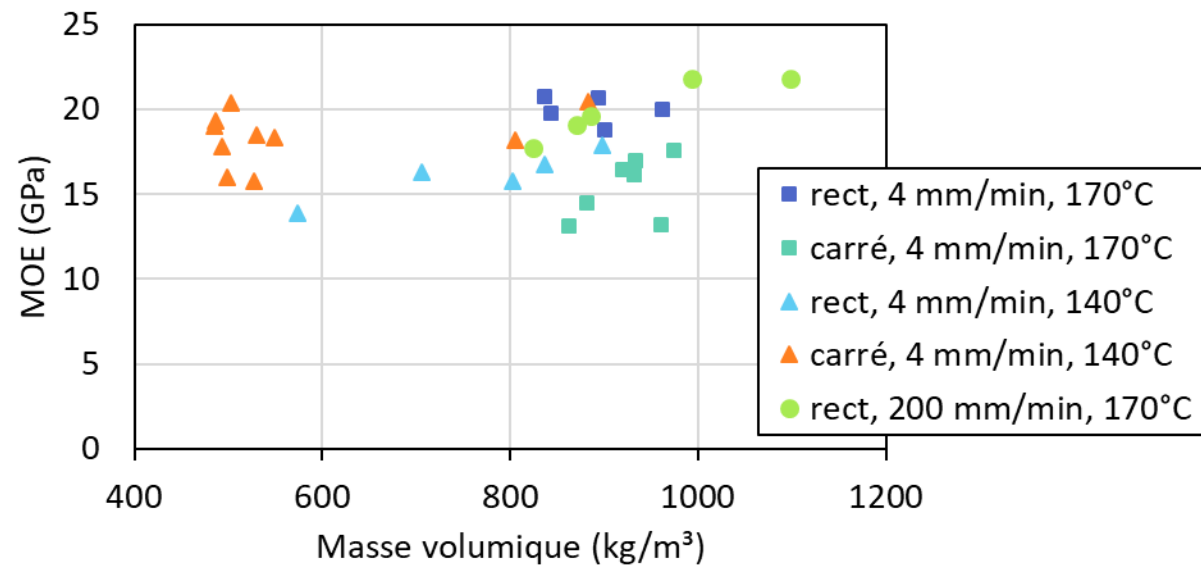
4mm/min - 1800s - 140°



200mm/min - 1800s - 170°



# Optimisation du procédé de densification sans perte de la performance mécanique

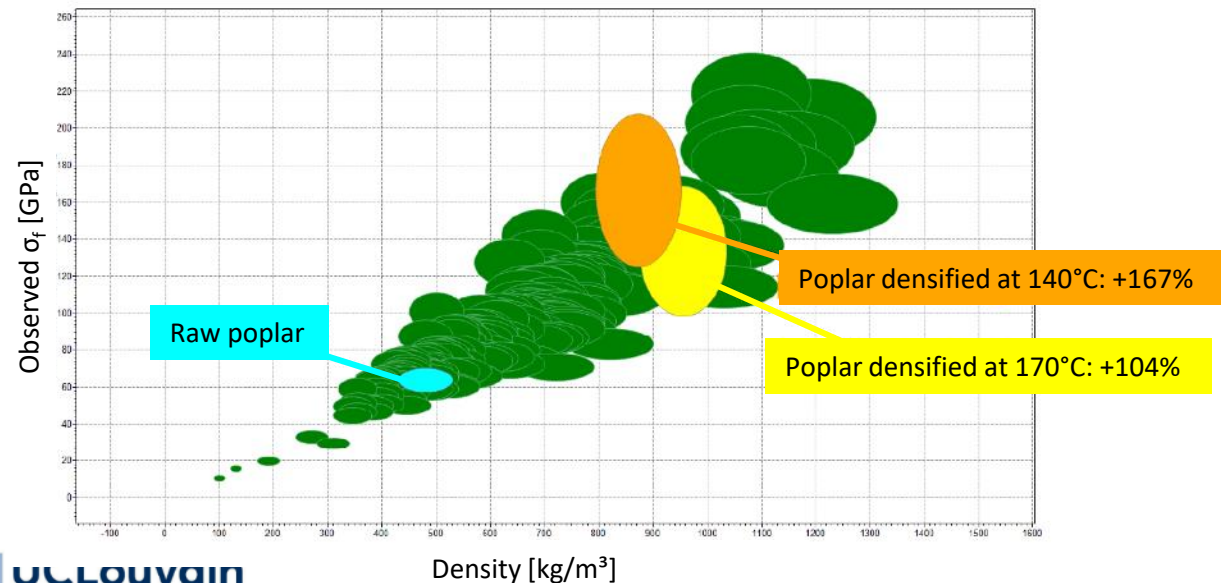
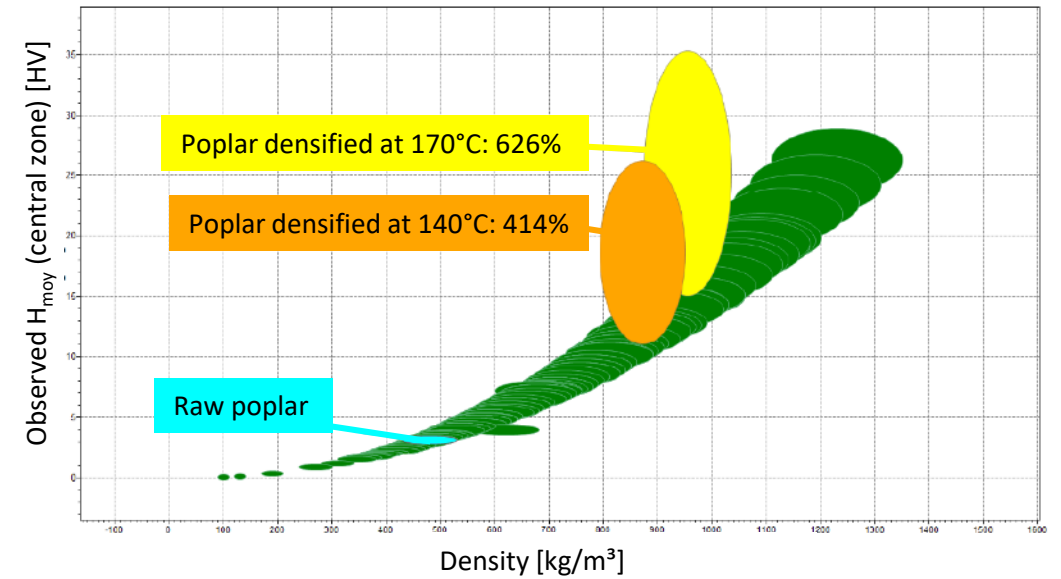
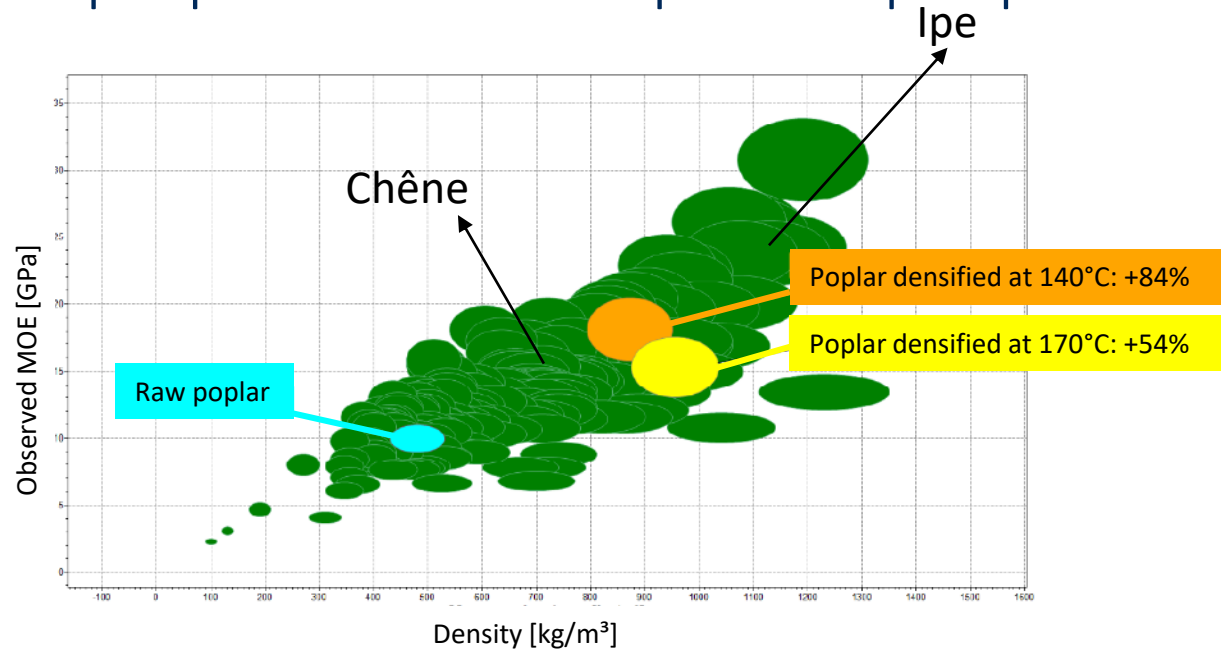


Retour élastique plus important à 140°C mais moins de dégradation des constituants du bois

→ propriétés mécaniques égales même à plus faible masse volumique 😊

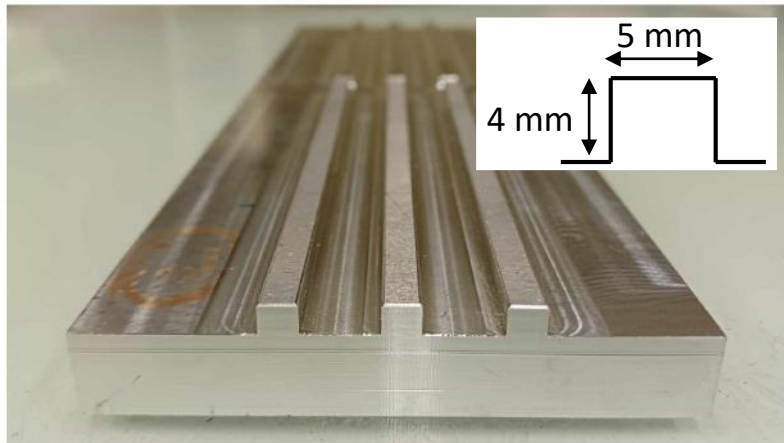


# Les propriétés mécaniques du peuplier densifié surpassent celles du chêne



- Amélioration de toutes les propriétés mécaniques par rapport à l'état brut
- Variabilité des résultats
- Gain en durabilité à évaluer

# Et si on ajoute une composante de mise en forme



## Pré-traitement:

- T = 95°C
- HR = 98 %
- Duration up to specimen mass stabilization

## Compression:

- T = 140 °C, 170°C, 200°C
- R = 60,6 %
- V = 4 mm/min
- D = 1800 s

## Post-traitement:

- T = 180 °C
- Durée = 45 min



140°C



170°C



200°C

- Choix d'un set de paramètres intéressants pour la densification homogène mais mauvais transfert de la géométrie du moule
- Endommagement du bois sur les motifs en relief



# L'étape de pré-traitement est clé pour le transfert de motif

## Pré-traitement:

- $T = 95^{\circ}\text{C}$
- HR = 60%, 80%, 98 %
- Duration up to specimen mass stabilization

## Compression:

- $T = 170^{\circ}\text{C}$
- $R = 60,6\%$
- $V = 4\text{ mm/min}$
- $D = 1800\text{ s}$

## Post-traitement:

- $T = 180^{\circ}\text{C}$
- Durée = 45 min



HR = 60 %

HR = 80 %

HR = 98 %

- L'humidité relative lors de l'étape de pré-traitement est un paramètre important
- De façon générale, la présence et l'évacuation de l'humidité et de la température, et leur effet sur la mécanique du bois doivent être parfaitement compris pour cibler correctement les différents sets de paramètres d'intérêt.

- Beaucoup de paramètres modifiables pour un procédé de densification versatile
- La méthodologie de sélection des matériaux permet de guider le choix des paramètres en fonction de l'application visée, il n'existe pas de set de paramètres optimaux universels

L'objectif est d'obtenir un matériau performant, ca ne signifie pas d'obtenir le plus performant

- Au-delà de la performance du matériau, il est important de travailler à optimiser le procédé de densification (viabilité industrielle).
- La modélisation du procédé nous guide dans le travail de recherche (pas présenté aujourd'hui)
- Des études de durabilité du bois densifié vont être entamées sous peu
- Analyse de cycle de vie du bois densifié vs bois exotique pour l'utilisation en terrasse extérieure a été initiée



Filière  
**Bois**  
Wallonie

**Wallonie**

With the support of the « Plan de Relance de la Wallonie »  
Under the coordination of the Filière Bois Wallonie  
DenseFloor Project (fiche 107)

# Merci

[marie-stephane.colla@uclouvain.be](mailto:marie-stephane.colla@uclouvain.be)  
[sophie.ryelandt@uclouvain.be](mailto:sophie.ryelandt@uclouvain.be)