



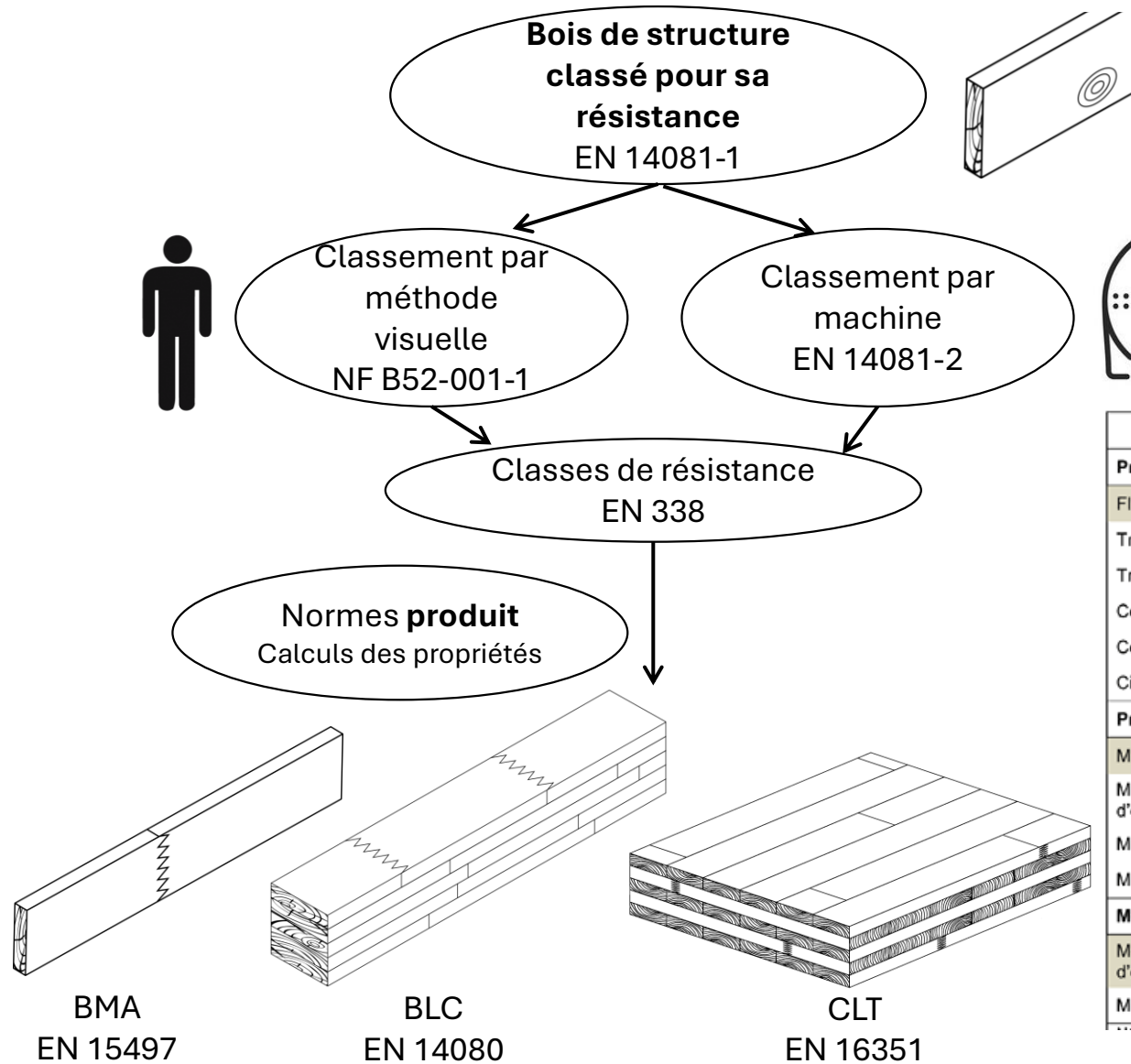
# La mesure d'angle de fibre du bois (application au classement pour la resistance)

Guillaume Pot

Cluny (71) - LaBoMaP (EA 3633)

# Contexte normatif des produits techniques de construction bois

- Normalisation pour assurer le bon dimensionnement des structures malgré la grande variabilité



EN 338	Classe	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30
<b>Propriétés de résistance en N/mm<sup>2</sup></b>									
Flexion	$f_{m,0,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30
Traction axiale	$f_{t,0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19
Traction transversale	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compression axiale	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24
Compression transversale	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7
Cisaillement	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0
<b>Propriétés de rigidité en kN/mm<sup>2</sup></b>									
Module d'élasticité moyen en flexion axiale	$E_{m,0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0
Module d'élasticité caractéristique à 5% d'exclusion en flexion axiale	$E_{m,0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0
Module d'élasticité transversal moyen	$E_{m,90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40
Module de cisaillement moyen	$G_{mean}$	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75
<b>Masse volumique en kg/m<sup>3</sup></b>									
Masse volumique caractéristique à 5% d'exclusion	$\rho_k$	290	310	320	330	340	350	360	380
Masse volumique moyenne	$\rho_{mean}$	350	370	380	400	410	420	430	460



# Contexte normatif des produits techniques de construction bois

Les machines de classement sont réglées sur **450 éprouvettes** représentatives :

- du pays d'origine
- des dimensions
- de la qualité de l'approvisionnement
- de l'essence



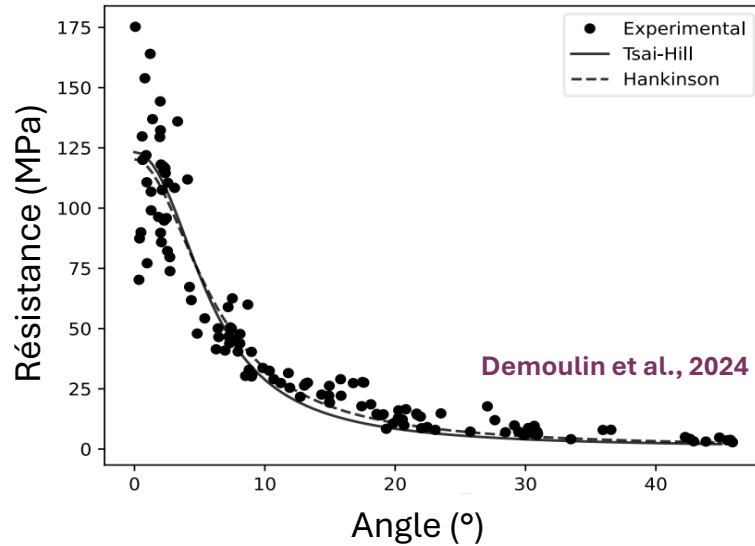
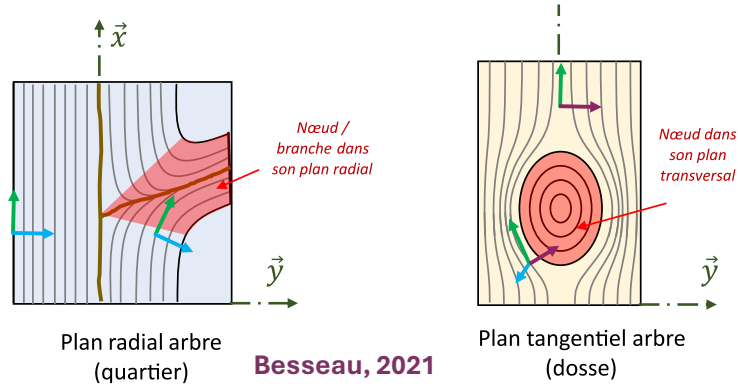
Les bois attribués à une certaine classe doivent respecter des seuils de **propriétés classantes** :

- **Résistance** caractéristique à 5 % d'exclusion
- **Module élastique** moyen
- **Densité** caractéristique à 5 % d'exclusion

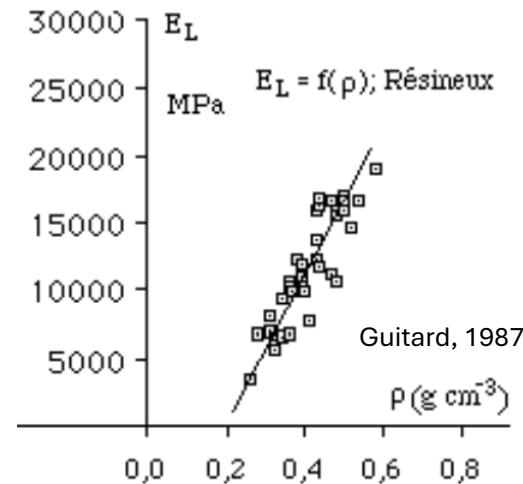
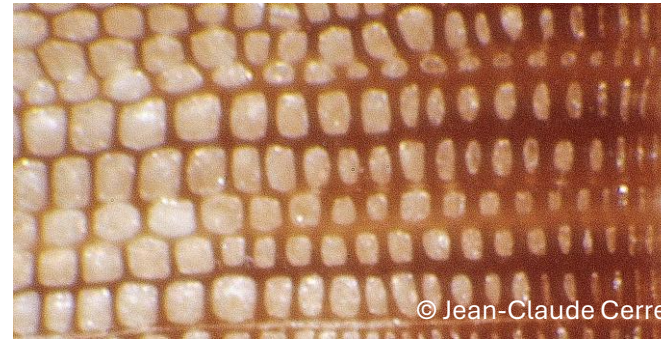
EN 338	Classe	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30
<b>Propriétés de résistance en N/mm<sup>2</sup></b>									
Flexion	$f_{m,0,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30
Traction axiale	$f_{t,0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19
Traction transversale	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compression axiale	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24
Compression transversale	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7
Cisaillement	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0
<b>Propriétés de rigidité en kN/mm<sup>2</sup></b>									
Module d'élasticité moyen en flexion axiale	$E_{m,0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0
Module d'élasticité caractéristique à 5% d'exclusion en flexion axiale	$E_{m,0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0
Module d'élasticité transversal moyen	$E_{m,90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40
Module de cisaillement moyen	$G_{mean}$	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75
<b>Masse volumique en kg/m<sup>3</sup></b>									
Masse volumique caractéristique à 5% d'exclusion	$\rho_k$	290	310	320	330	340	350	360	380
Masse volumique moyenne	$\rho_{mean}$	350	370	380	400	410	420	430	460

# Principaux paramètres d'influence sur les propriétés mécaniques du bois

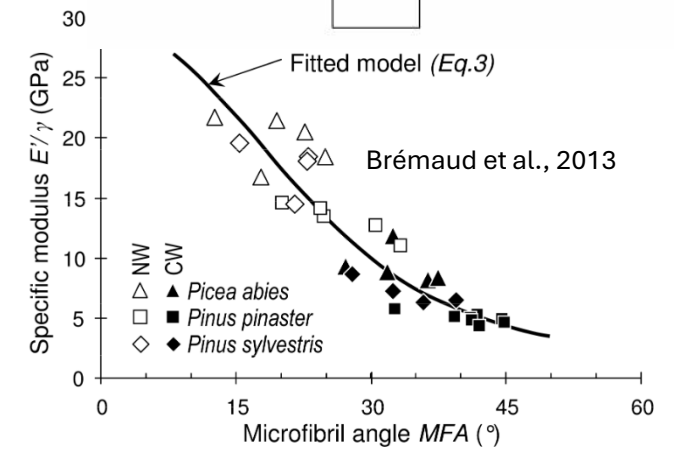
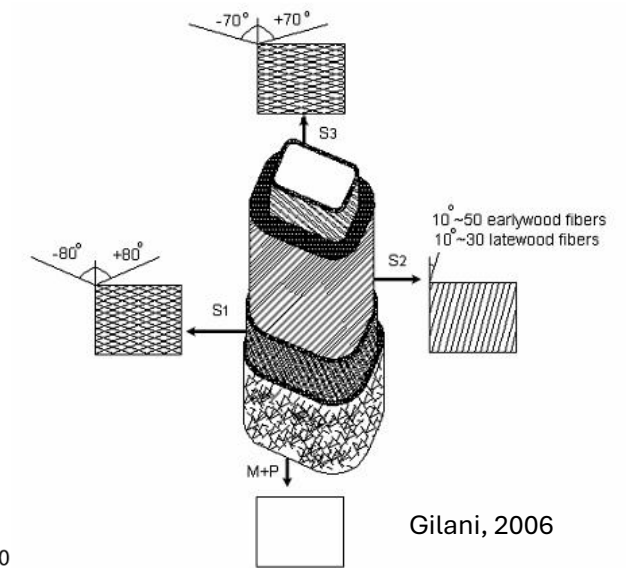
1. L'**orientation des fibres (ODF)**, et donc la présence de nœuds



2. La proportion/épaisseur des parois cellulaires des fibres, et donc la **masse volumique**

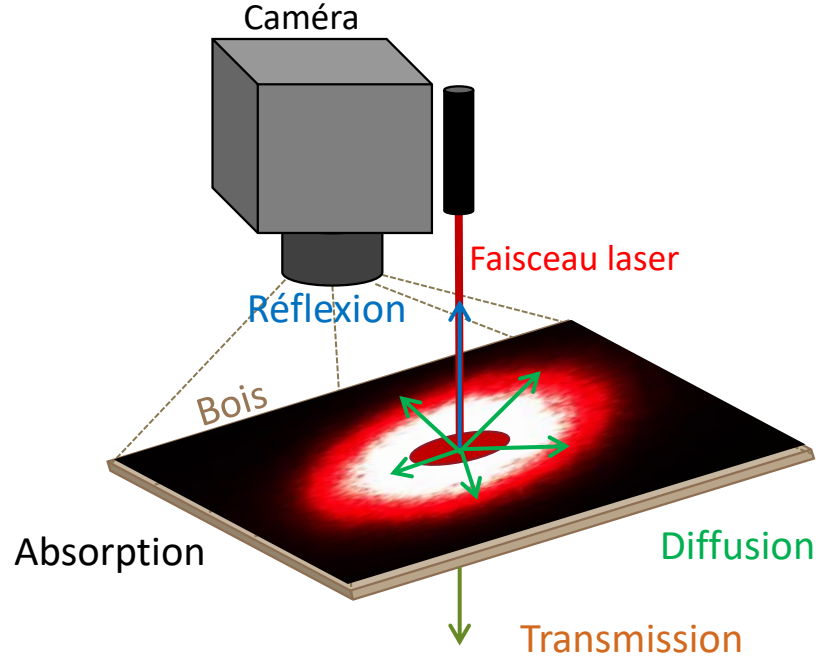


3. L'angle des microfibrilles de cellulose (**AMF**)

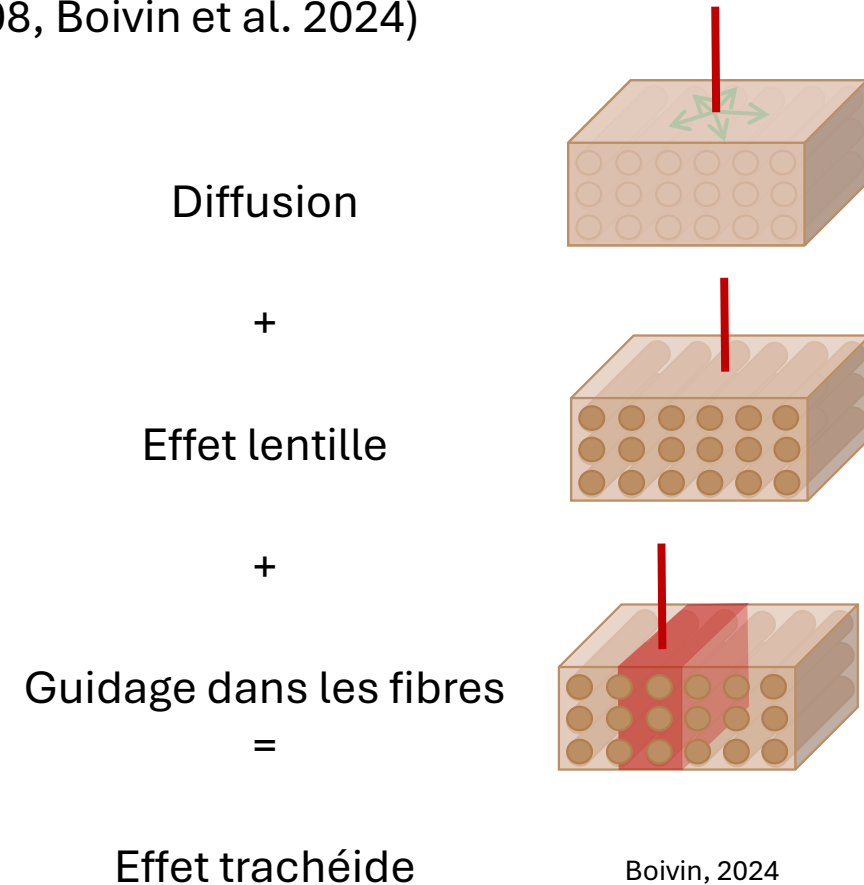


➔ Pour une essence donnée en qualité « **bois de structure** » (à forte nodosité), influence prépondérante de l'**orientation des fibres** et masse volumique aisément mesurable

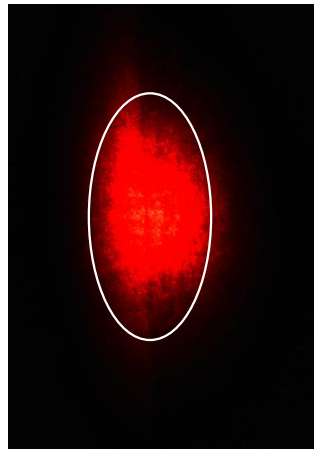
# Principe de la mesure de l'orientation des fibres par diffusion lumineuse laser, appelé « effet trachéide »



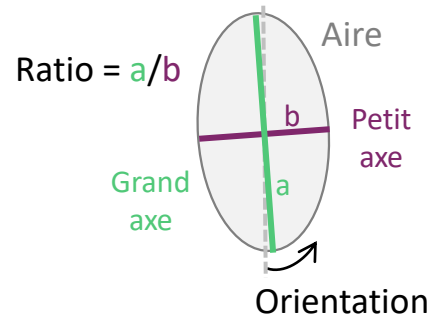
- Premier brevet en 1976 (Matthews and Beech)
- Physique du phénomène pas encore parfaitement comprise (Simonaho and Silevennoinen 2004, Hu et al. 2004, Kiene et al. 2008, Boivin et al. 2024)



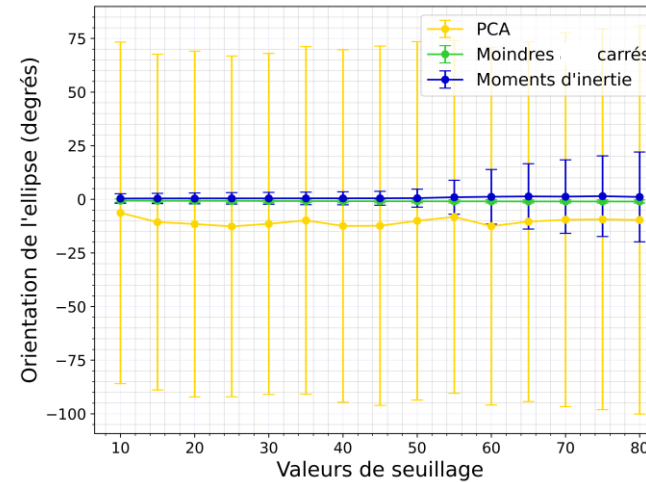
# Principe de la mesure de l'orientation des fibres par diffusion lumineuse laser, appelé « effet trachéide »



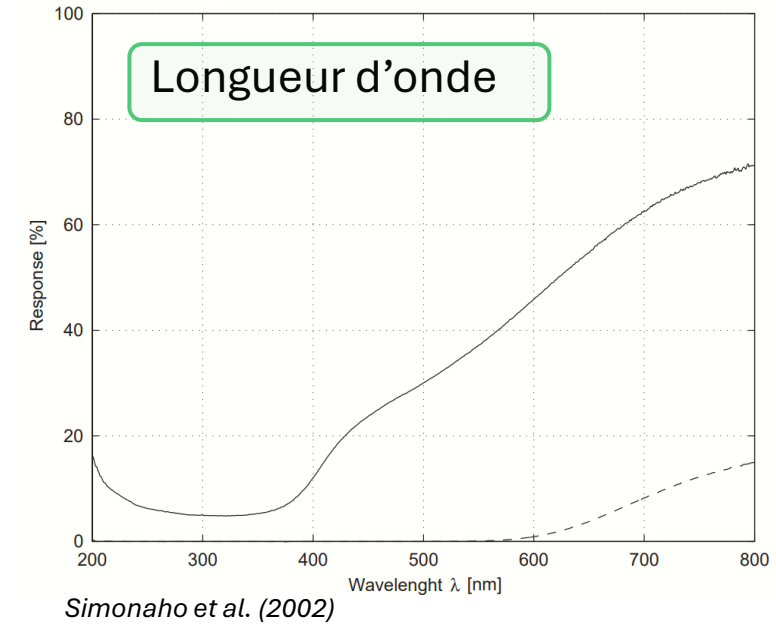
Fit d'une ellipse



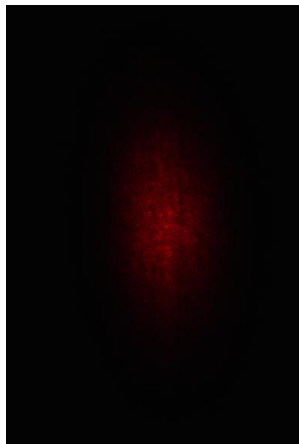
Méthode de fit



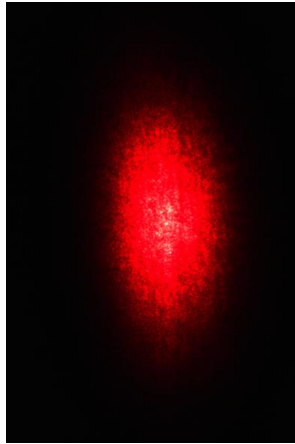
Longueur d'onde



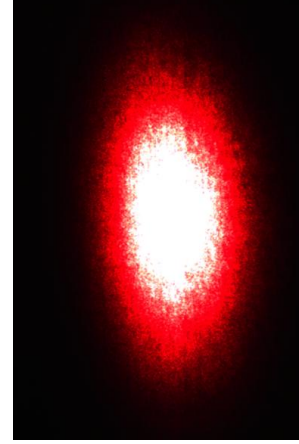
Temps d'exposition



court



moyen



long

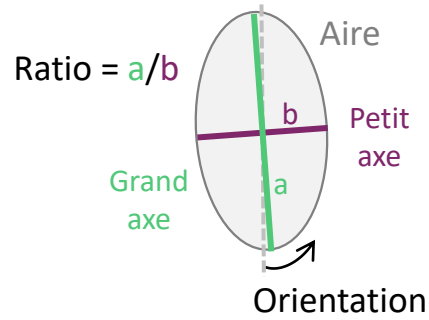
Approche empirique pour déterminer puissance, longueur d'onde, temps d'exposition, ...

Concrètement :

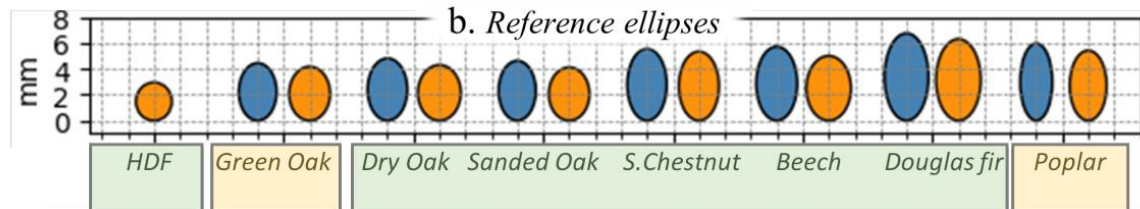
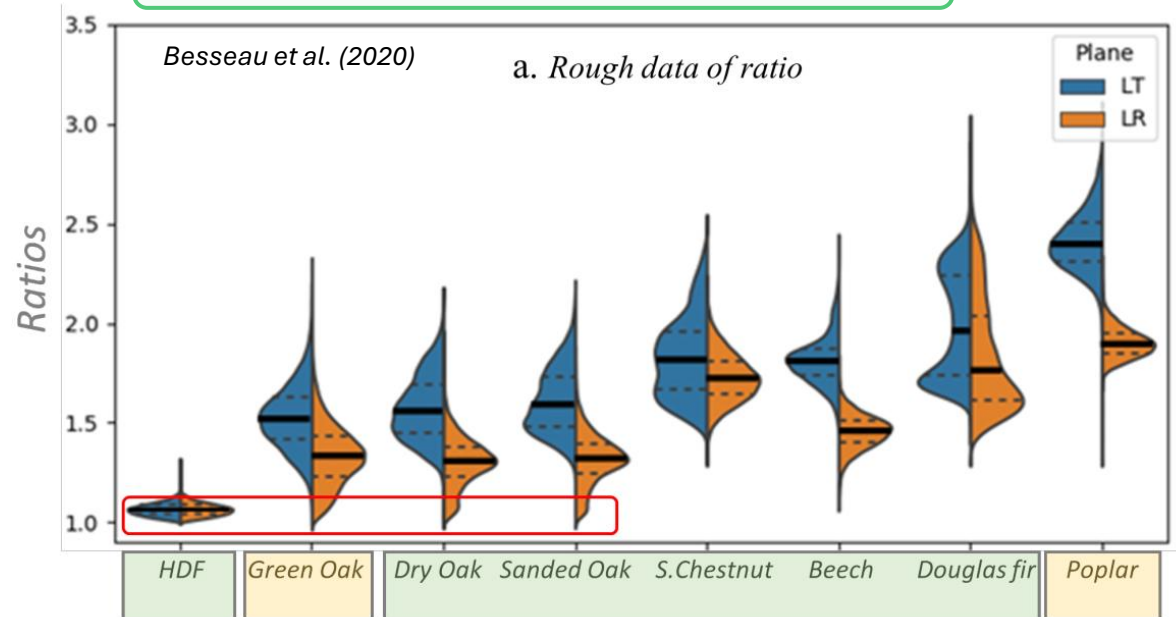
- Epicéa, douglas, peuplier : longueur d'onde > 650 nm, faible puissance
- Chêne : longueur d'onde > 860 nm, puissance > 5 mW



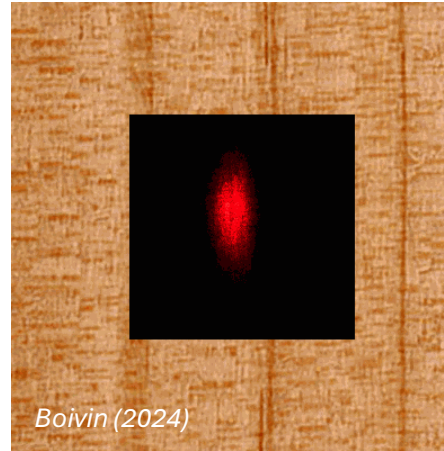
# Facteurs d'influence



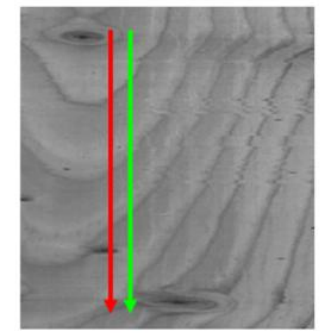
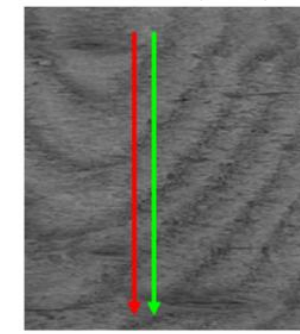
Essence / plan ligneux / état de surface



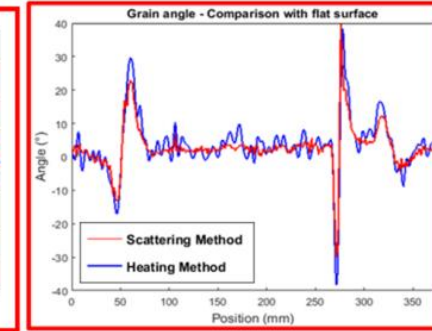
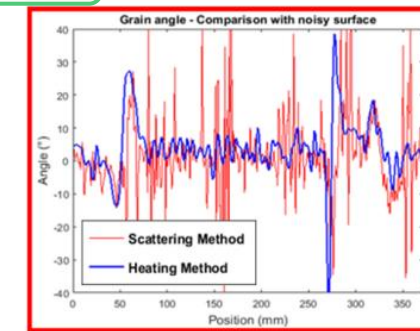
Bois initial/final



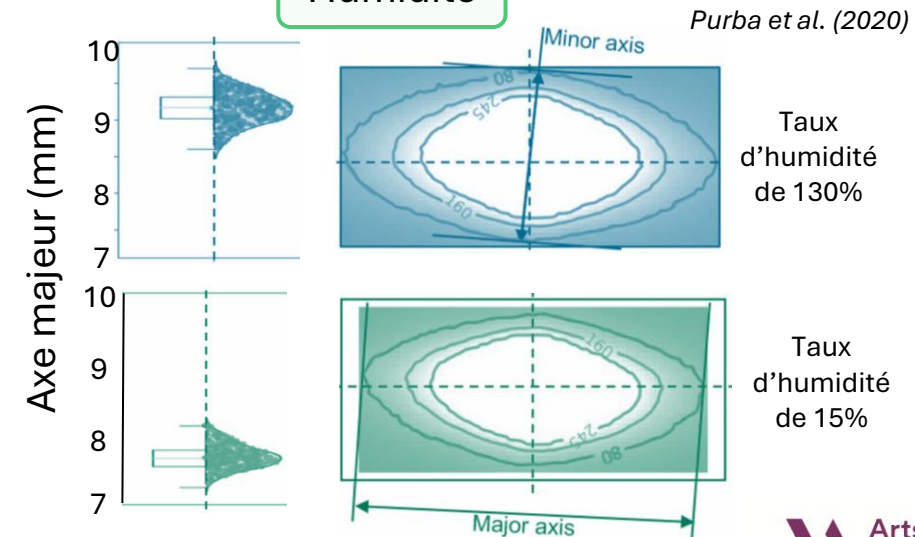
*Daval et al. (2015)*



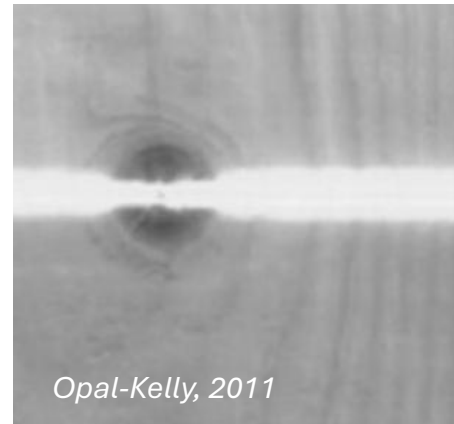
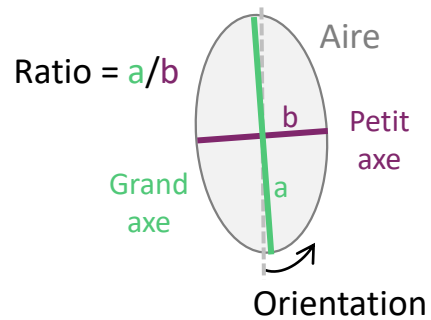
Surface



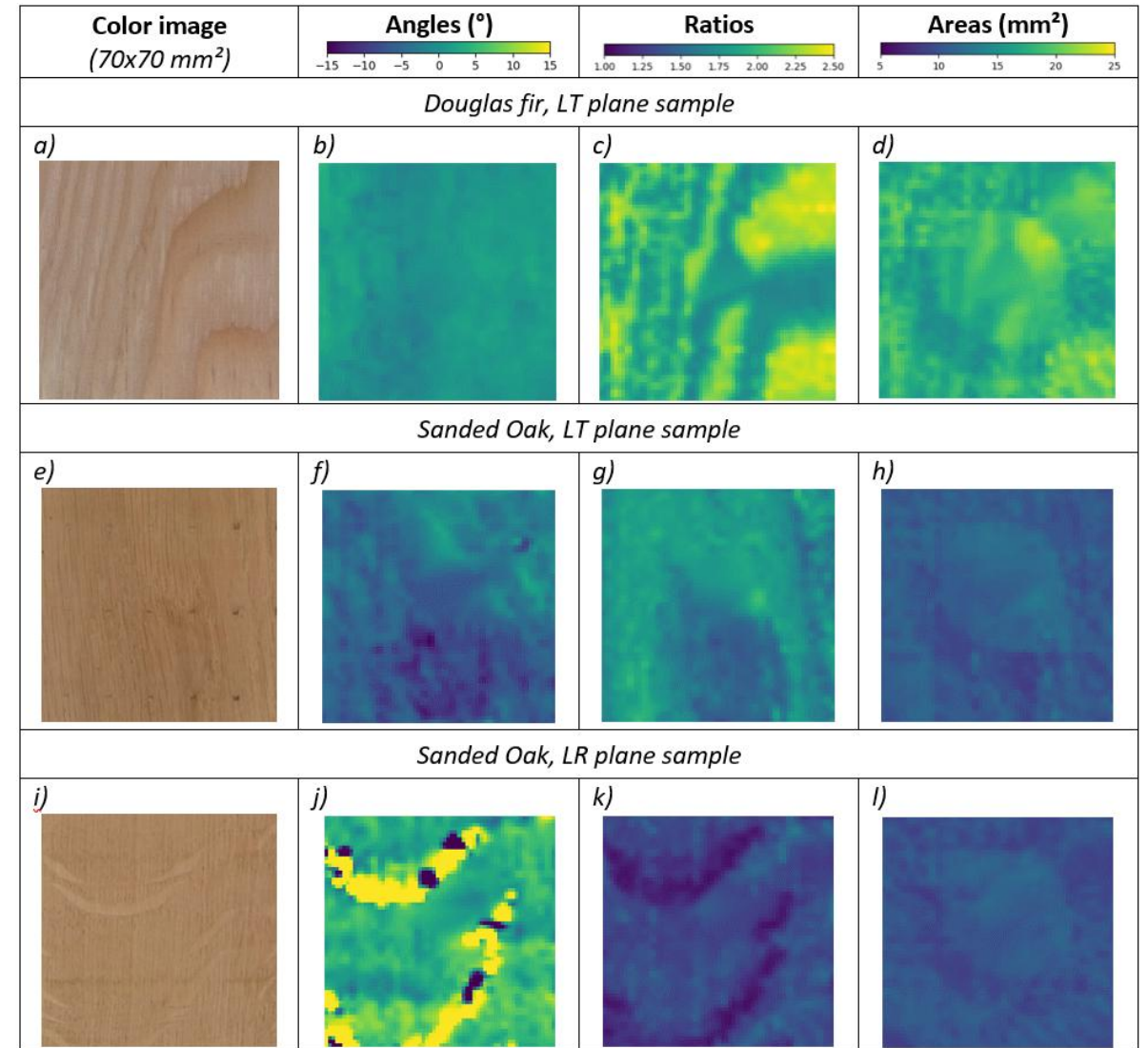
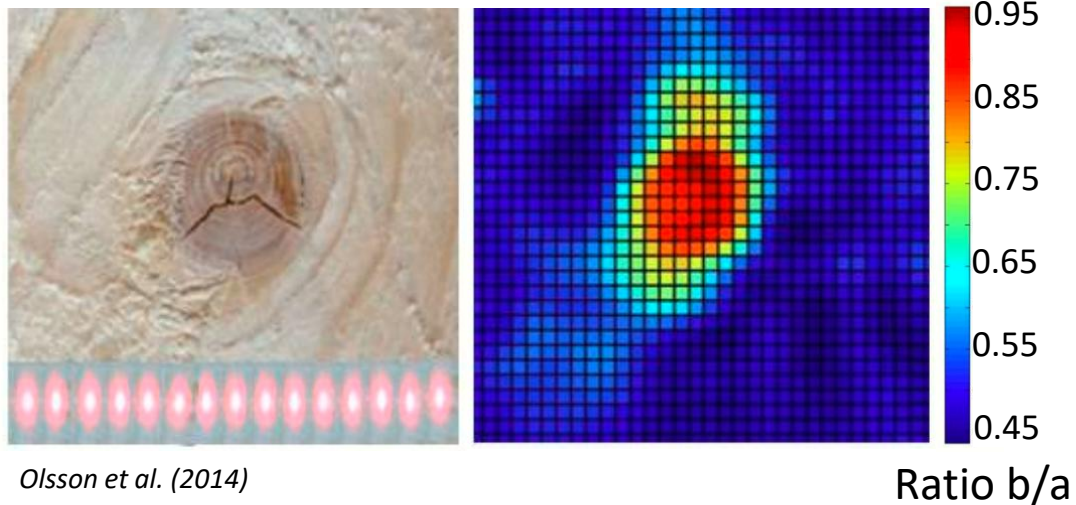
Humidité



# Comportements de l'effet trachéide



- Nœuds
- Rayons ligneux
- Limites de cernes (ratio seulement)



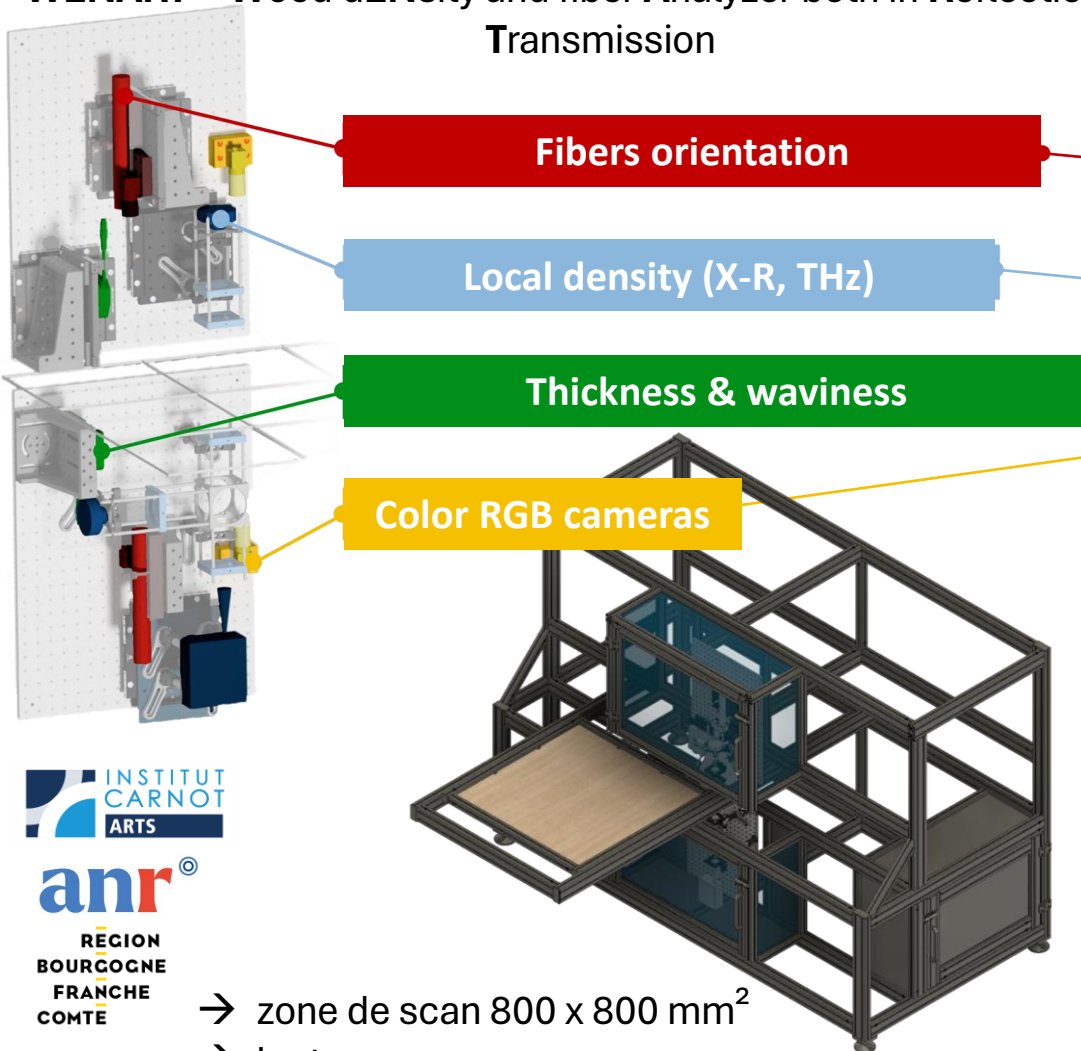
Besseau et al. (2020)



# Machines intégrant la mesure d'orientation des fibres

## Scanner de laboratoire LaBoMaP : mono-point

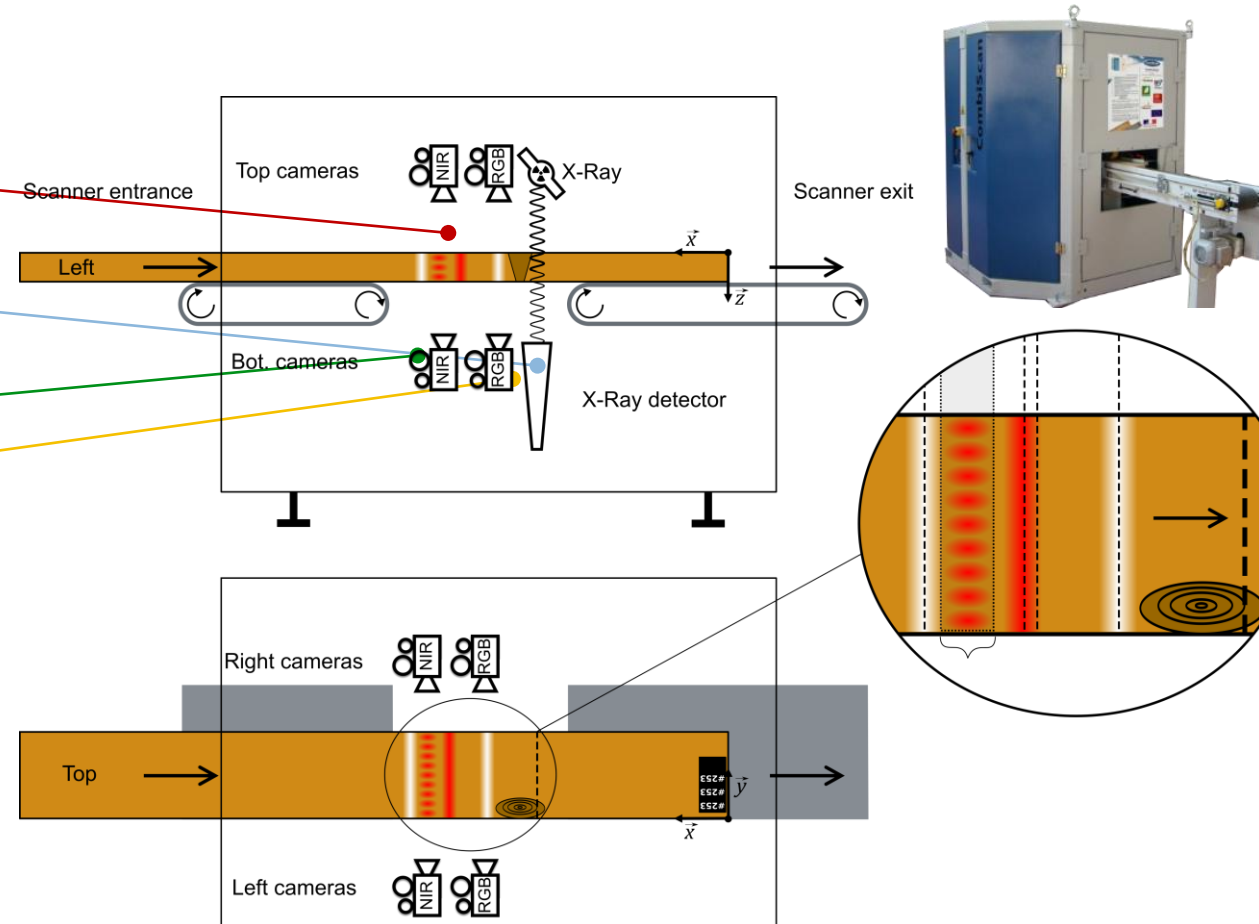
**WENART** = Wood dENsity and fiber Analyzer both in Reflection and Transmission



RÉGION  
BOURGOGNE  
FRANCHE  
COMTE

- zone de scan 800 x 800 mm<sup>2</sup>
- lent
- résolution customisable
- un seul point répétable

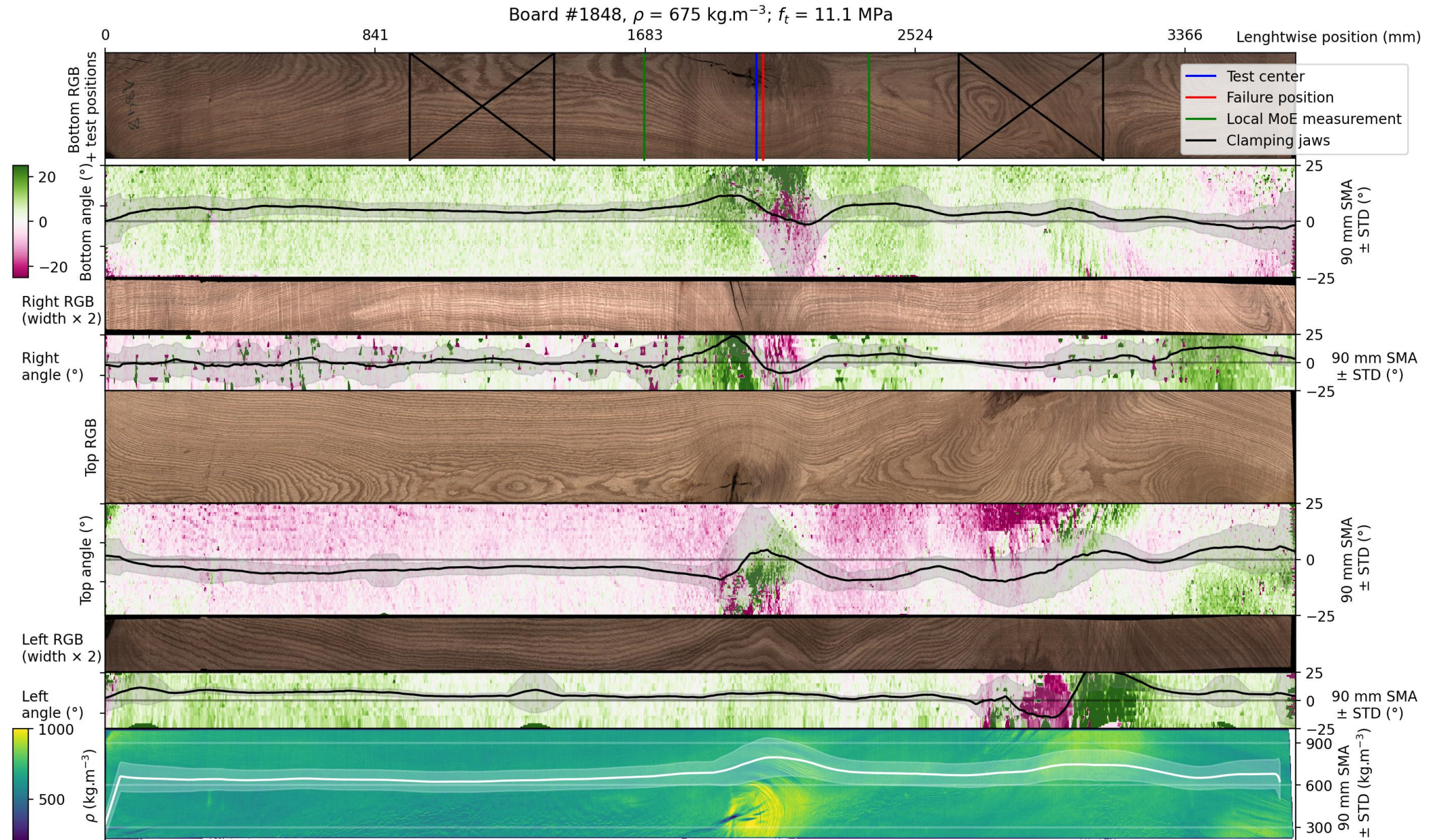
## Scanner industriel : multi-points



- adapté aux planches ~ largeur 310 mm max, et récemment plateaux
- rapide (200 – 300 m/min)
- résolution 1 mm (L) x 5 mm (Tr)
- variations d'intensité entre les points

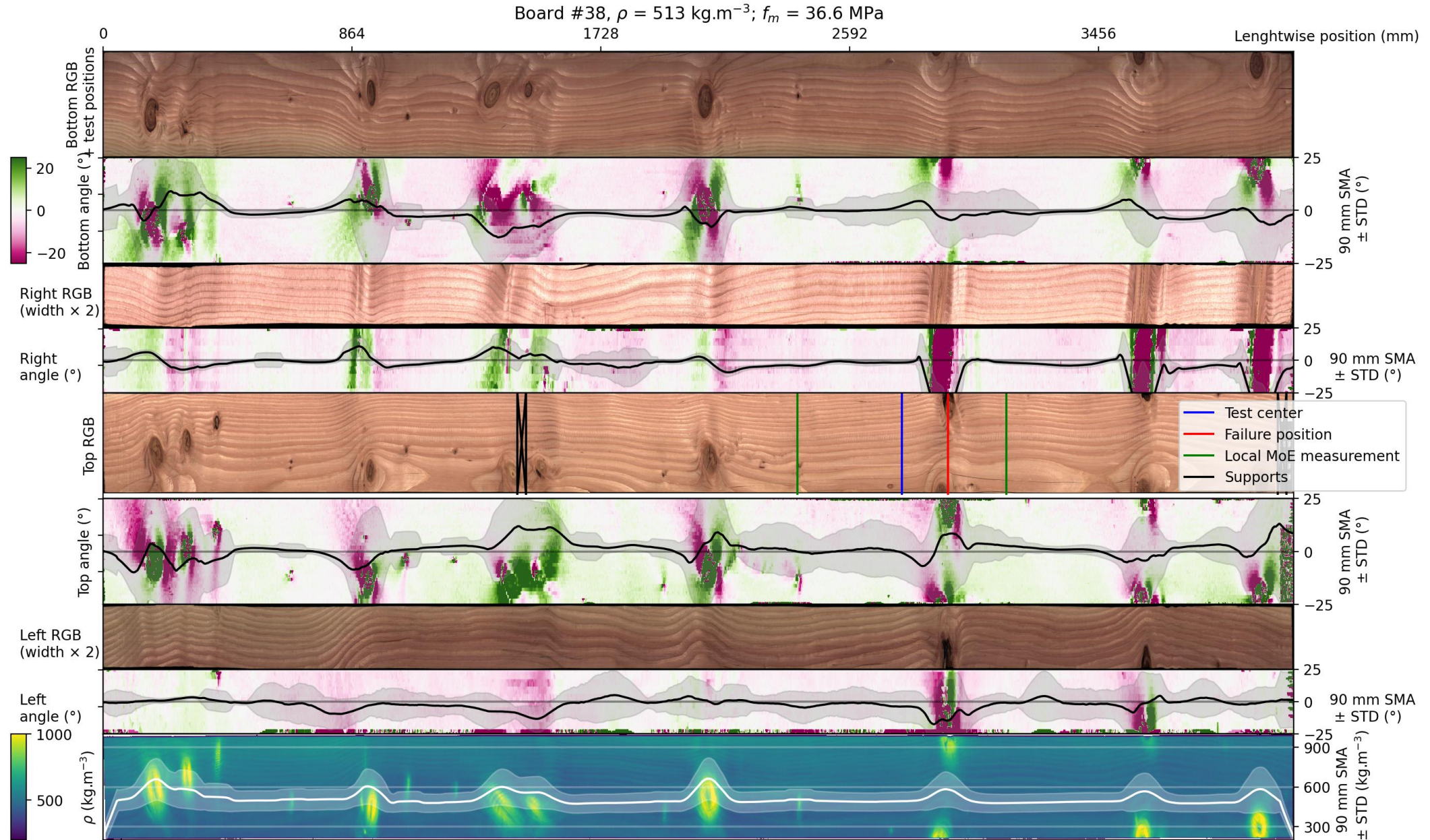


# Exemples de résultats : chêne





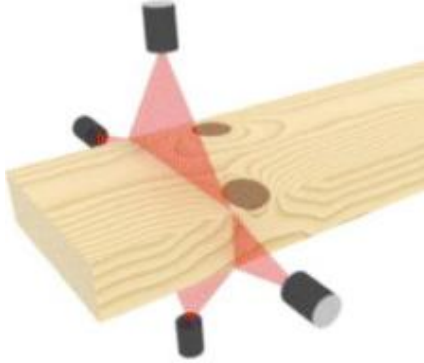
# Exemples de résultats : douglas





# Interpolation de l'OdF interne

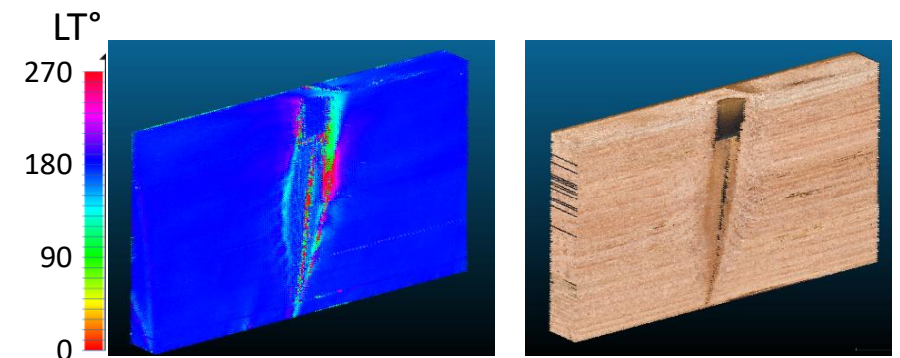
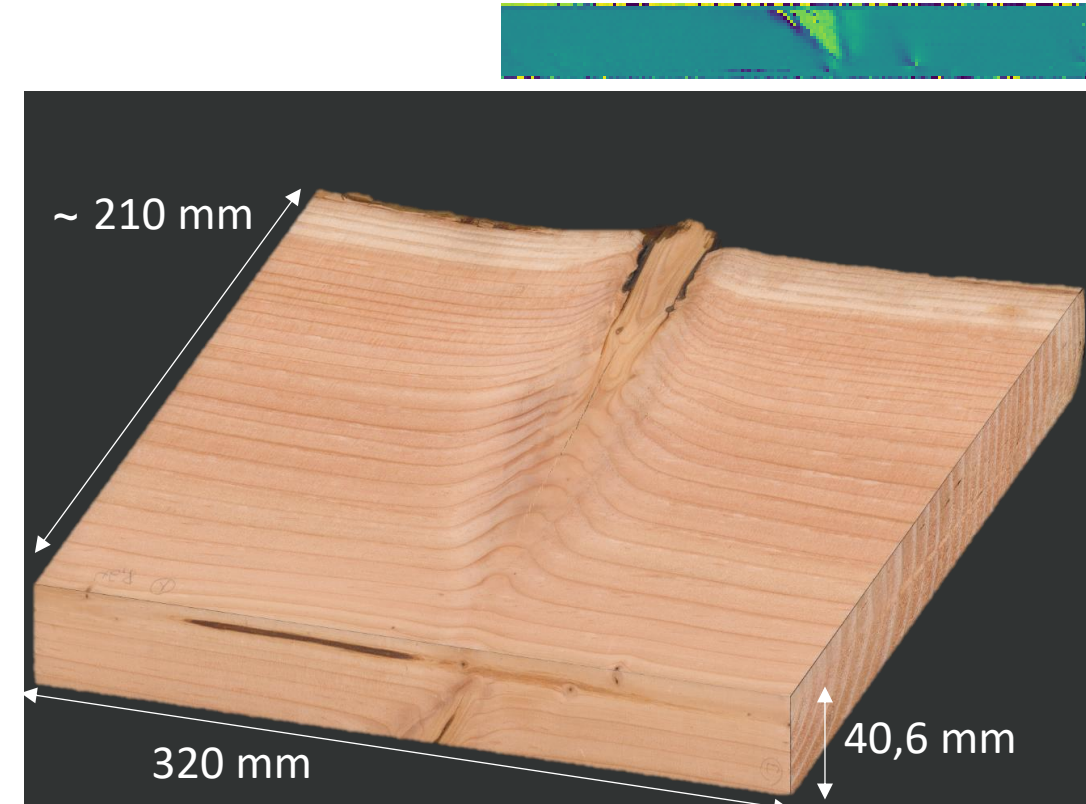
Problématique : mesure de l'angle projeté sur la surface → quelle OdF à l'intérieur du volume ?

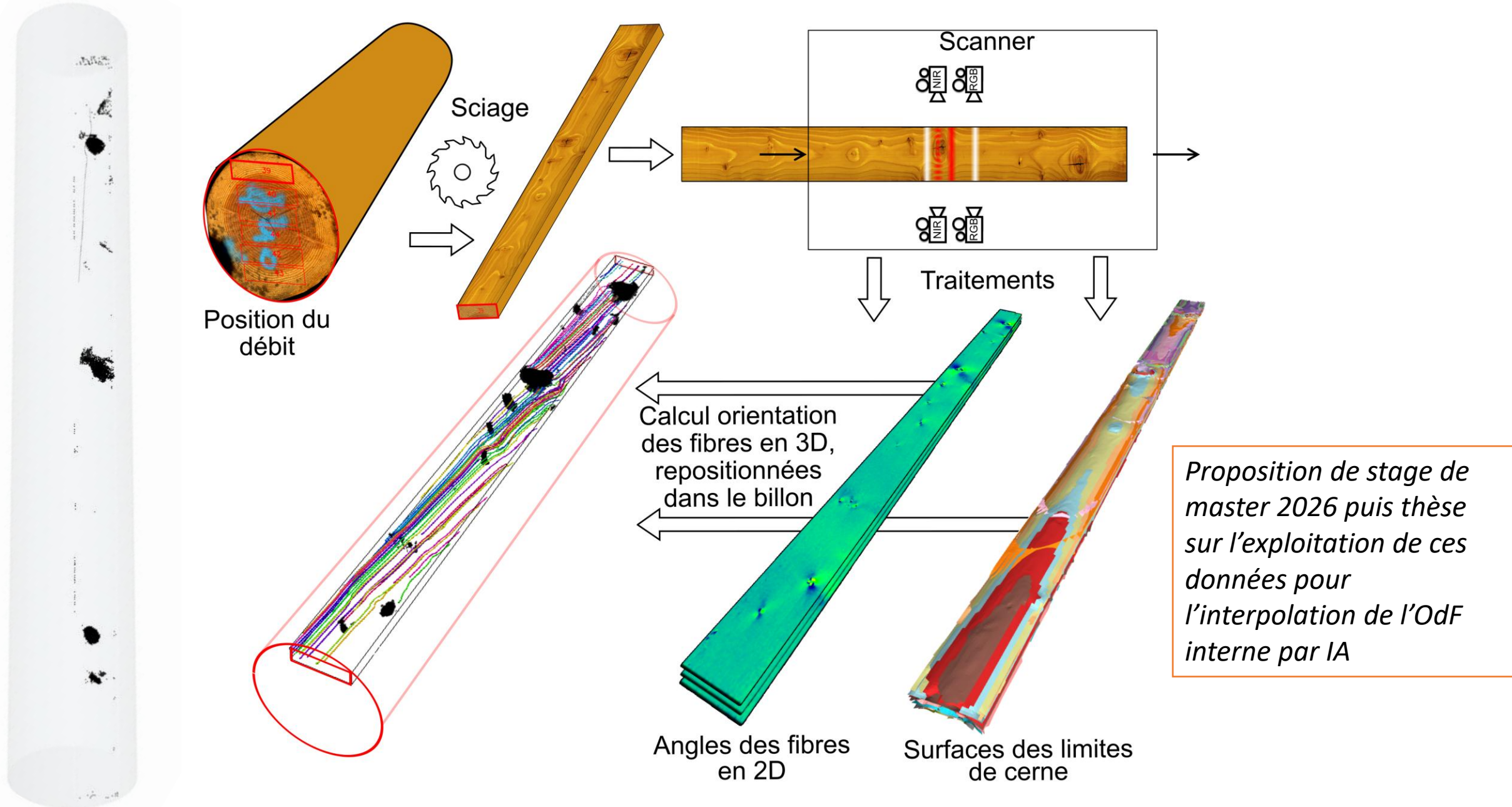


1A,roof	1A,radial	2A,nearest

Méthodes d'interpolation

Détermination de l'OdF en 3D par rabotages successifs, thèse Hélène Penvern, 8 décembre 2025 →





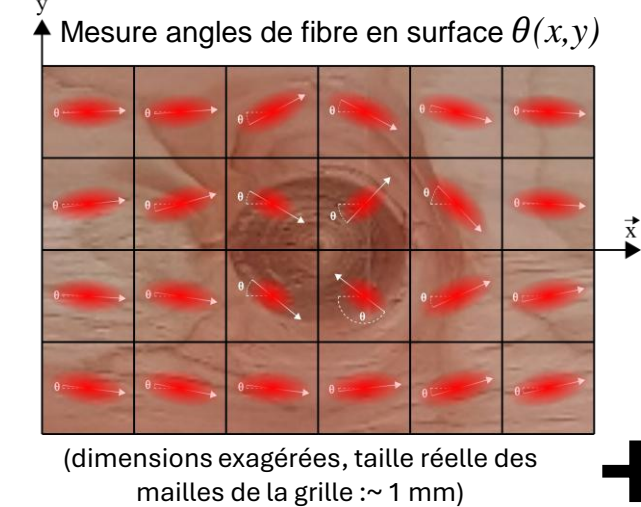


# Modélisations mécaniques à partir de données scanner

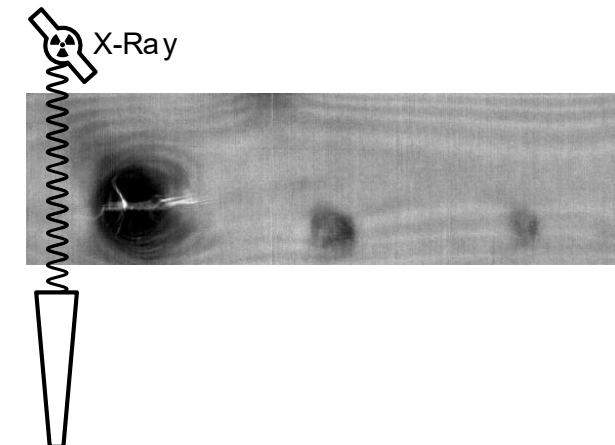
Des évolutions progressives : **2012** thèse A. Jehl (Cifre Luxscan) ; **2015** thèse J. Viguié (ANR ClaMeB) ; **2017** thèse Y. Faydi (Région + Carnot) ; **2020** thèse R. Frayssinhes (Région + Ministère Agri) ; **2021** thèse R. Duriot (Région) ; **2021** thèse B. Besseau (Cifre Ducerf) ; **2024** thèse L. Démoulin (RBFC i-site) ; **2024** Projet TreCEffiQuaS (Pot + Viguié, ADEME) ; **2025** thèse H. Penvern (ANR JCJC) ; **2028** thèse P. Kuffer (Cifre Ducerf)

Explication des propriétés mécaniques du bois :

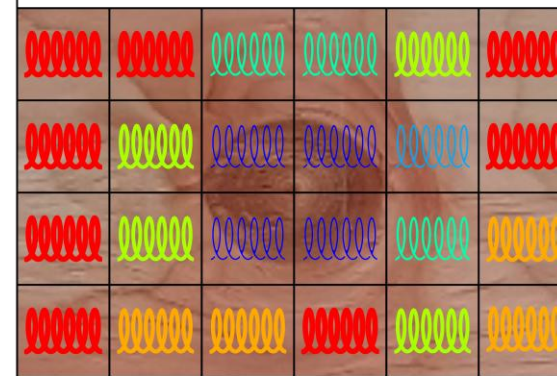
→ Niveau 1 : **OdF**



→ Niveau 2 : **Densité locale**



Modèle analytique

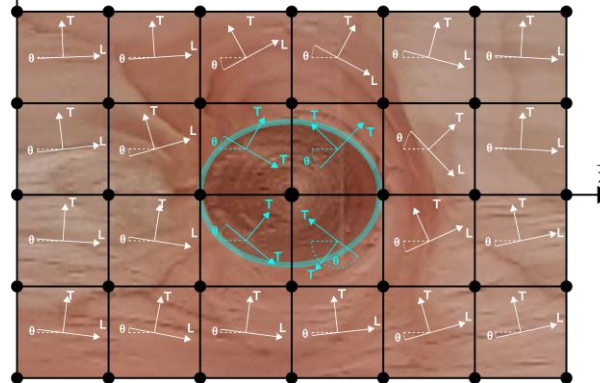


→ E. augmentant →

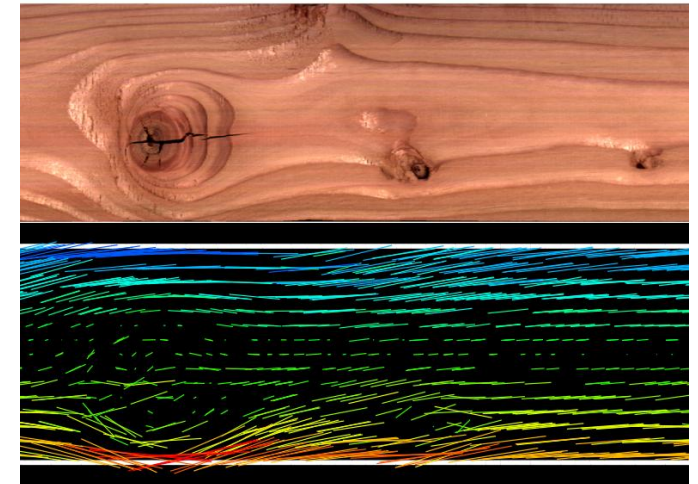
$$E_x(x, y) = \frac{E_L(\rho)}{\frac{E_L}{E_T} \sin^4(\theta) + \cos^4(\theta) + \left(\frac{E_L}{G_{TL}} - 2\nu_{LT}\right) \sin^2(\theta) \cos^2(\theta)}$$

$$E_{a,app,\delta} = \frac{\delta}{\sum_j \frac{1}{\sum_i E_x(x_i, y_j)}}$$

FEM orthotrope avec directions matériau variables



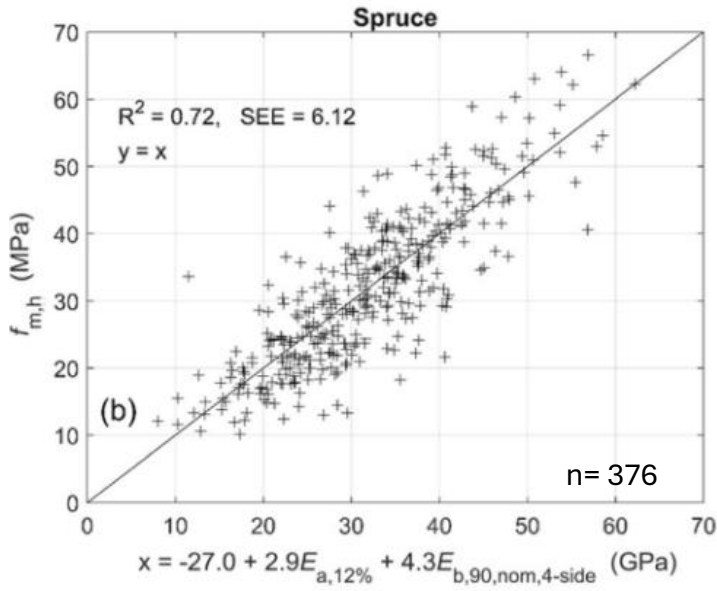
Duriot, 2021



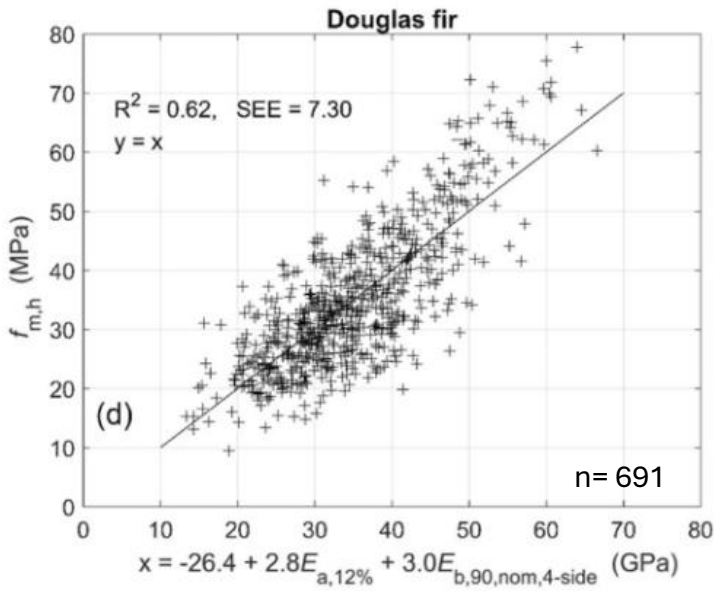
Exemple de direction et amplitude des contraintes principales en flexion pure obtenu par MEF



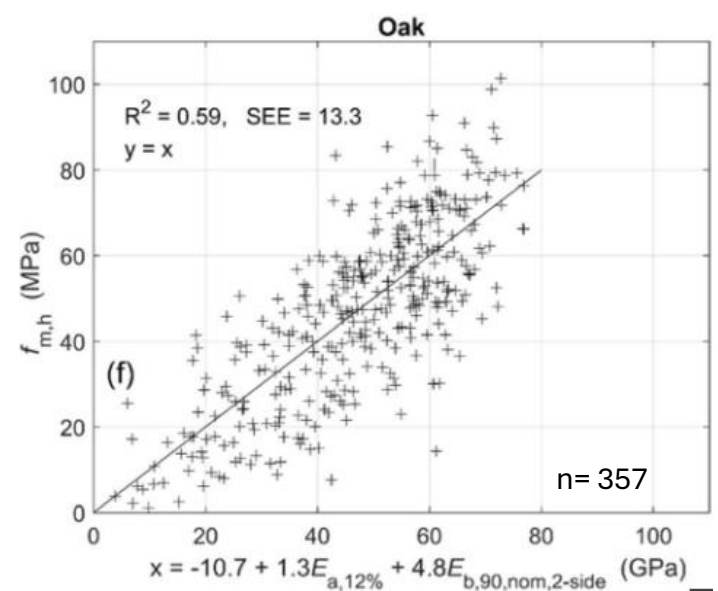
# Résultats de prédictions de résistance en flexion modèle analytique



Epicéa,  $R^2 = 0.72$





Douglas,  $R^2 = 0.62$



Chêne,  $R^2 = 0.59$

Modèle aux performances variables selon les essences

Justesse machine	En classement C24 / rejet ou D24 / rejet par rapport au classement optimal		
ODF + $E_{dyn}$ 	92 %	84 %	84 %
$E_{dyn}$ 	92 %	70 %	22 %

Viguier, 2015

Faydi, 2017

Olsson et al., 2018

Le classement machine basé sur l'orientation des fibres, **ça marche** sur ces échantillonnages

# Conclusion / perspectives

- Technologie abordable mais demandant un peu de savoir faire
- Déterminer les **angles de fibres en 3D**, préalable nécessaire pour :



- Modéliser les déformations/contraintes par la MEF = « vrai » comportement anisotrope



- Critères de résistance **anisotropes** (Hill)
- Mécanique de la **rupture**
- Etudier l'influence de tous les paramètres de la **loi de comportement** (identification inverse)

→ Meilleure prédiction de la résistance

- Une multitude d'applications possibles :
  - Mesure d'humidité (thèse C. Kachouh)
  - Qualité de l'usinage (ANR Propusibot 2025-2029)
  - Croissance des arbres, résistance des branches
  - Vos idées ?

