



Le bois de tige



Le bois provient toujours des arbres

Un arbre est une plante à ossature bois constitué de tiges emboîtées d'ordre 1 (tronc), 2 (branches principales), 3 (branches, 4 (rameaux) et 5 (brindilles).

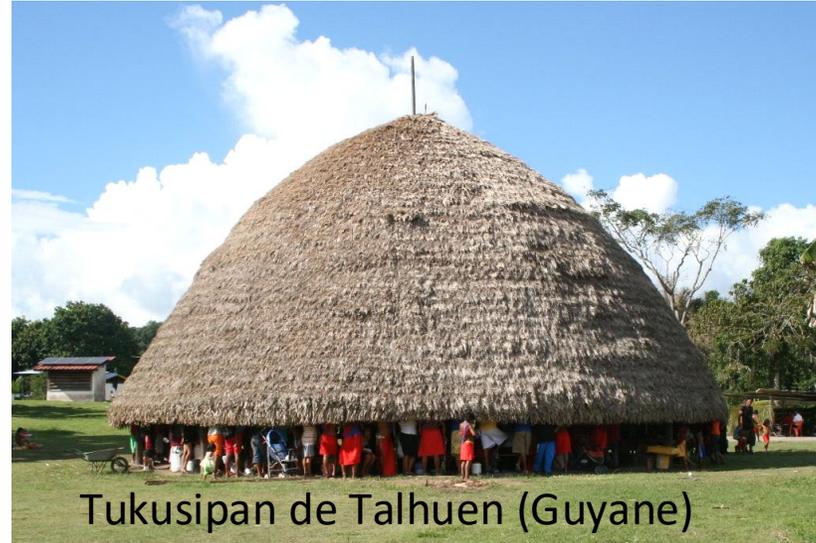
Toutes les tiges sont élancées et peuvent être considérées comme des poutres (généralement sinueuses) en résistance des matériaux.

La fabrication des arbres est optimisée depuis 300 millions d'années pour tenir la posture et résister aux efforts extérieurs de la gravité et du vent (sauf situation exceptionnelle).

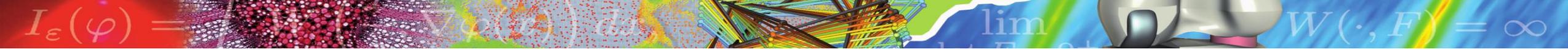
Une tige comporte des zones de jonction, avec des tiges de rang inférieur, séparées par des longues portions libres de jonctions. Les arbres sains ne cassent pas dans les zones de jonction complexes.

Les propriétés mécaniques intrinsèques du bois des tiges sont celles des portions entre les jonctions, on les appellera propriétés du bois de tige (ou sans défaut), mesurées sur des éprouvettes respectant l'organisation du bois dans ces tiges.

Utilisation de tiges dans les bâtiments de prestige

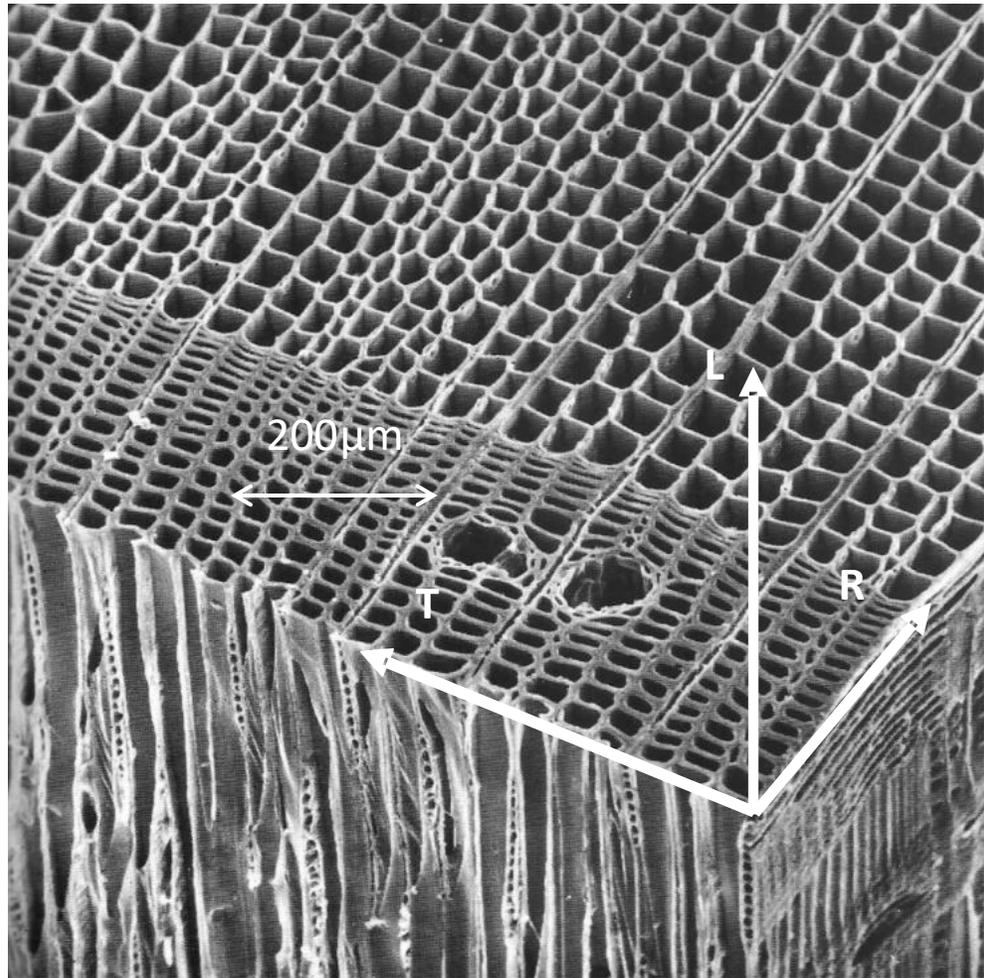


Le bois sans défaut est utilisé dans les applications mécaniques haut de gamme (violons, tonneaux ...)

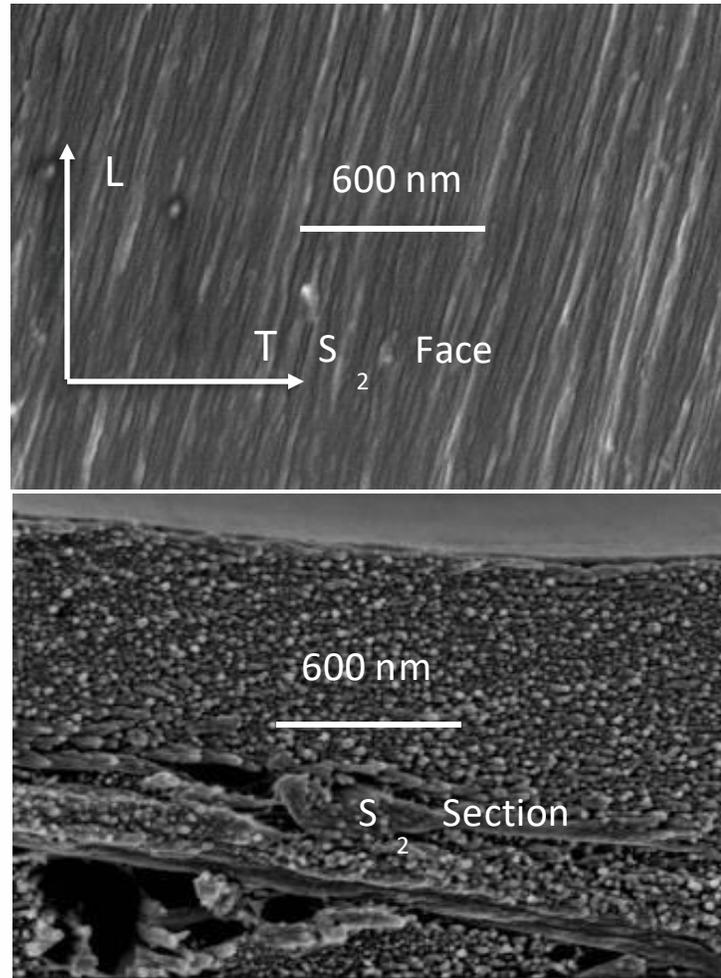


Structure et propriétés mécaniques du bois

Les deux échelles de structure du bois



Echelle anatomique: matériau cellulaire anisotrope de type nid d'abeille



Echelle de la paroi cellulaire: matériau composite à fibre

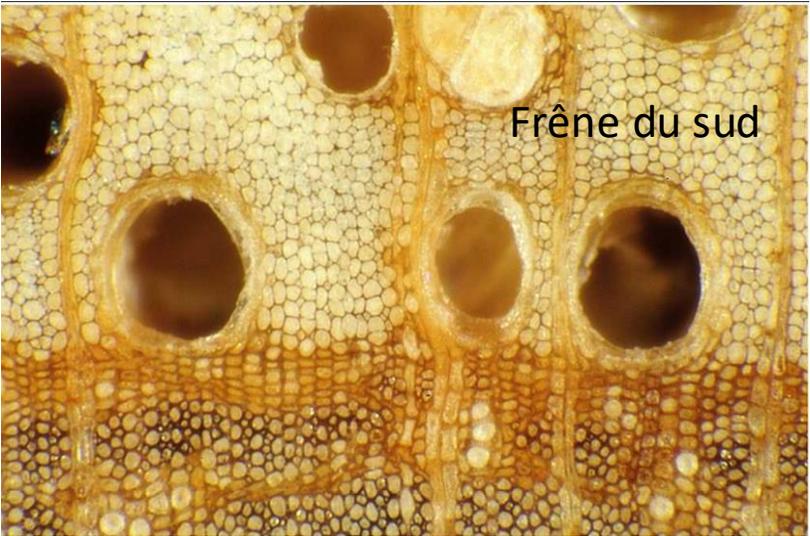
La direction L est appelée **fil du bois**.

C'est la direction de référence de la tige de bois, des fibres du bois et des micro-fibrilles de la paroi.

Le premier usage du bois dans l'arbre et en ingénierie est un rôle d'**ossature** (comportement en **flexion**)

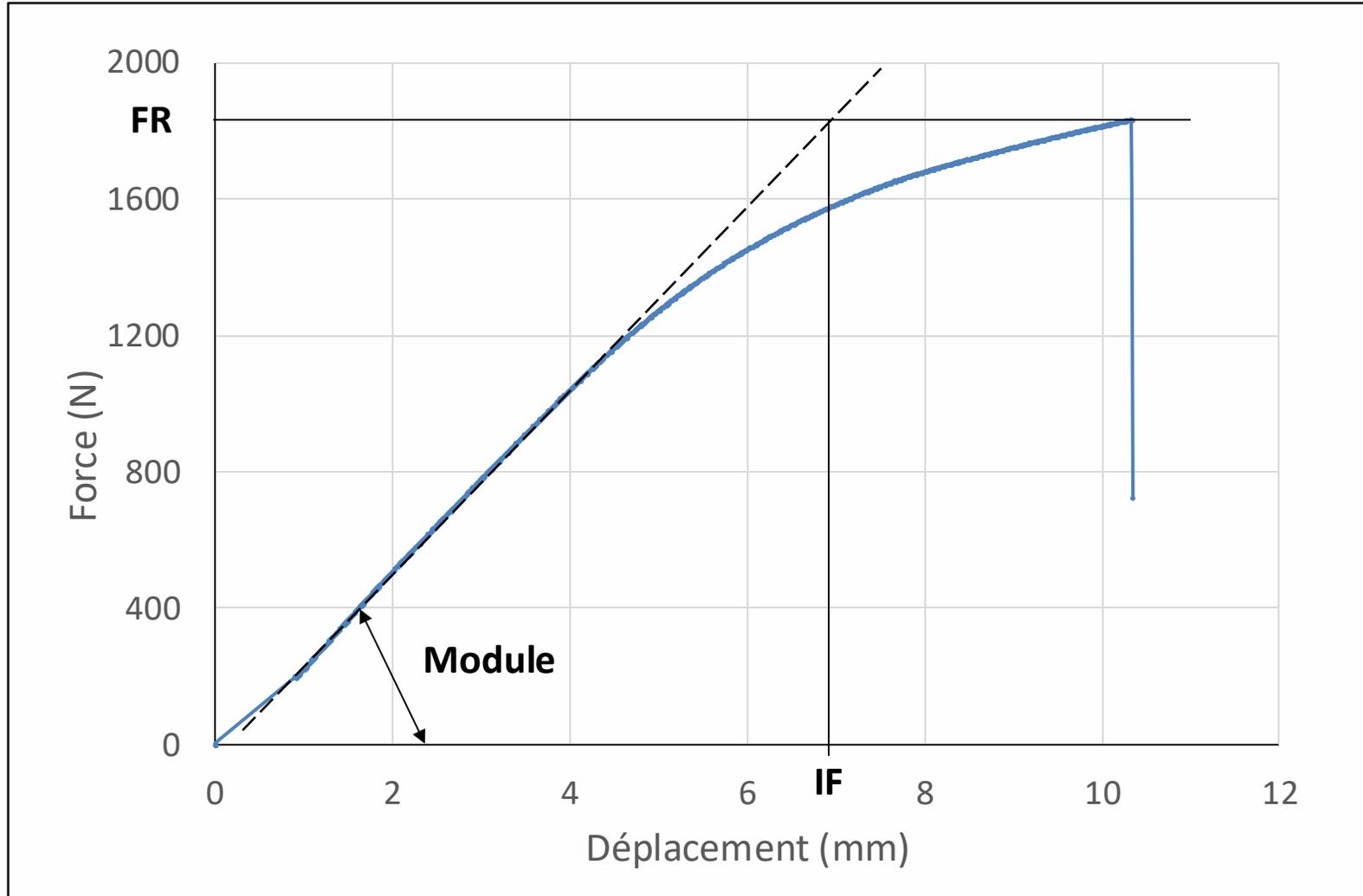
Le deuxième usage en ingénierie concerne le **support** des objets avec une fonction de résistance au choc et d'amortissement (comportement en **compression transverse**)

Diversité d'organisations cellulaires (plan RT, x90)



Cette diversité spécifique conditionne la densité et le comportement transverse en compression

Comportement en flexion



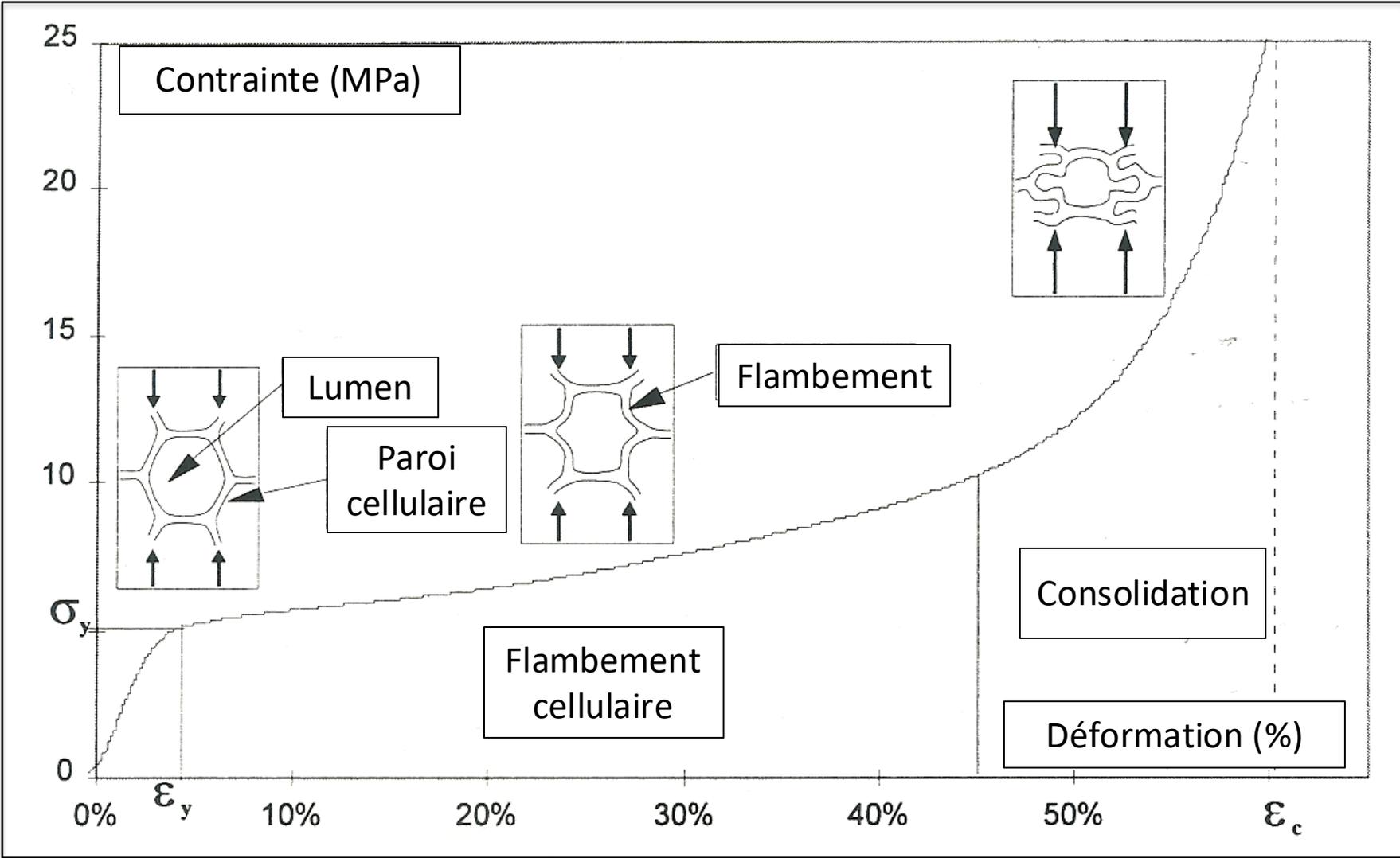
Module: pente au début de courbe, proportionnelle au module d'élasticité (**MOE**)

FR: force à la rupture proportionnelle à la contrainte à la rupture (**MOR**)

IF indicateur de flexibilité (flèche en mm), il est proportionnel au rapport **MOR/MOE** qui est une déformation de sécurité

La déformation à rupture est bien plus élevée que la valeur **MOR/MOE**

Comportement en compression transverse

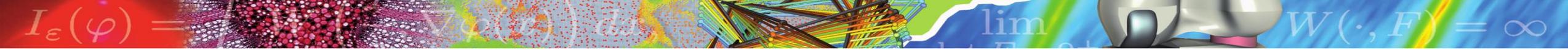


Pendant la zone de **flambement cellulaire** la contrainte (dureté) reste faible (comprise entre 5 et 8 Mpa dans ce cas).

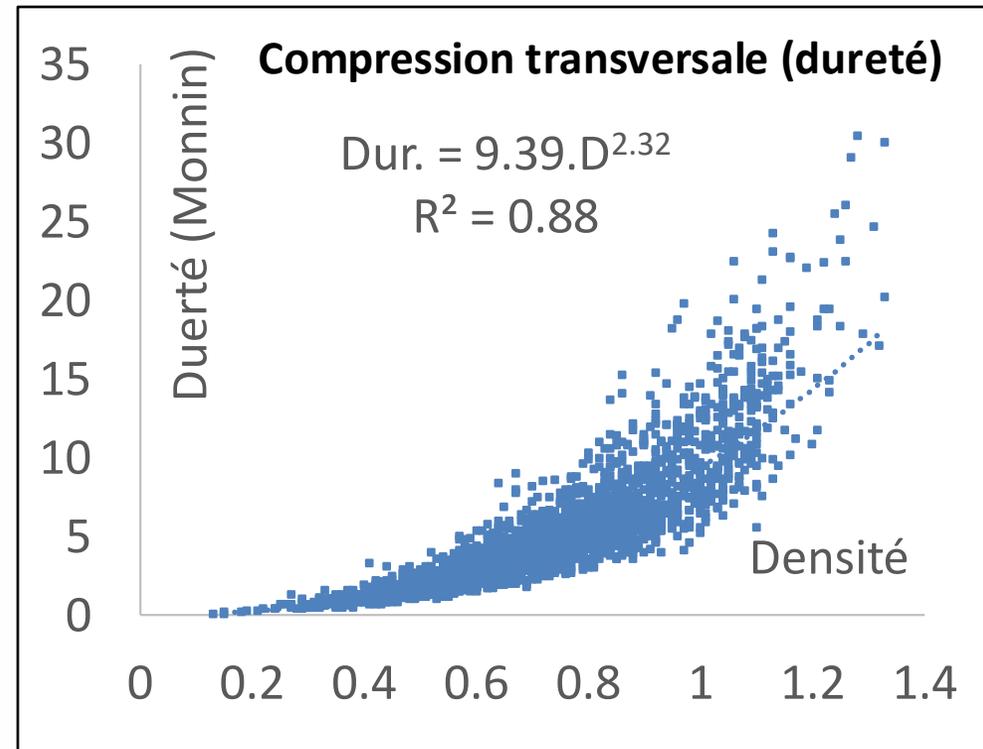
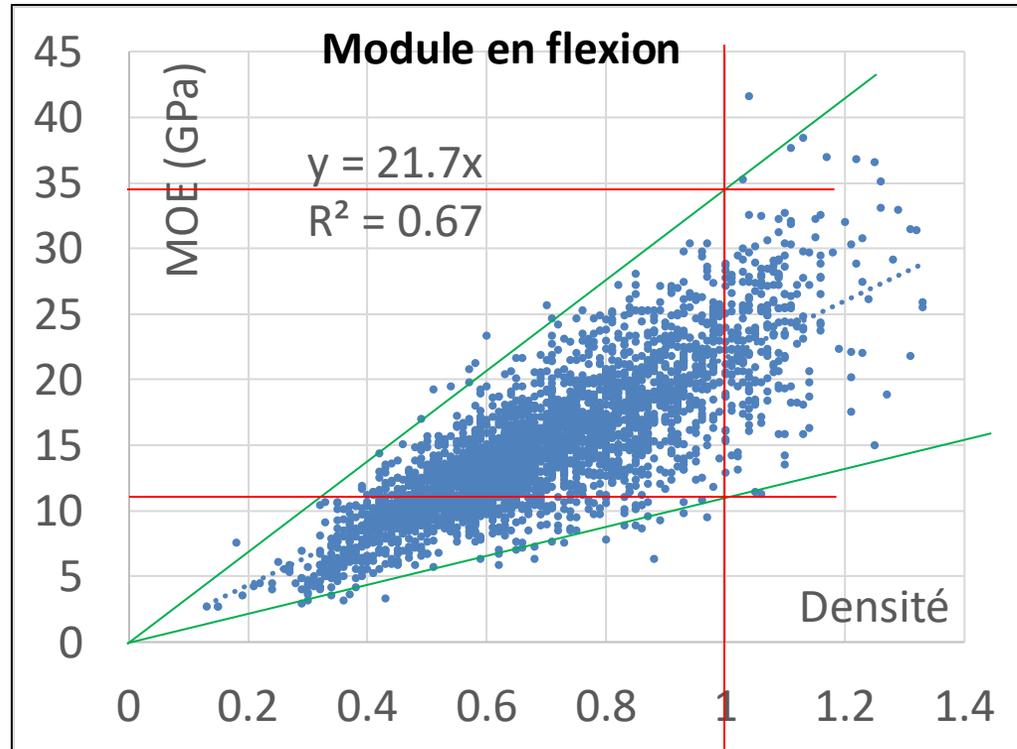
L'énergie dépensée dans cette phase est élevée.

C'est une situation favorable pour le support de produits fragiles (faible force de contact et fort amortissement du choc).

Les deux propriétés dépendent très fortement de la densité.



Matériau cellulaire et densité (moyennes pour 3106 arbres)



Un matériau cellulaire est caractérisé par sa proportion volumique de matière (parois): μ

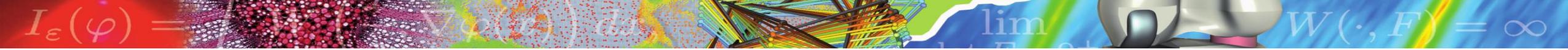
Si D_p est la densité de la paroi (1,5), alors la densité (D) du matériau est égale à: $\mu.D_p$

Si E_p est le module de la paroi, alors le module (MOE) du matériau est égal à: $\mu.E_p$

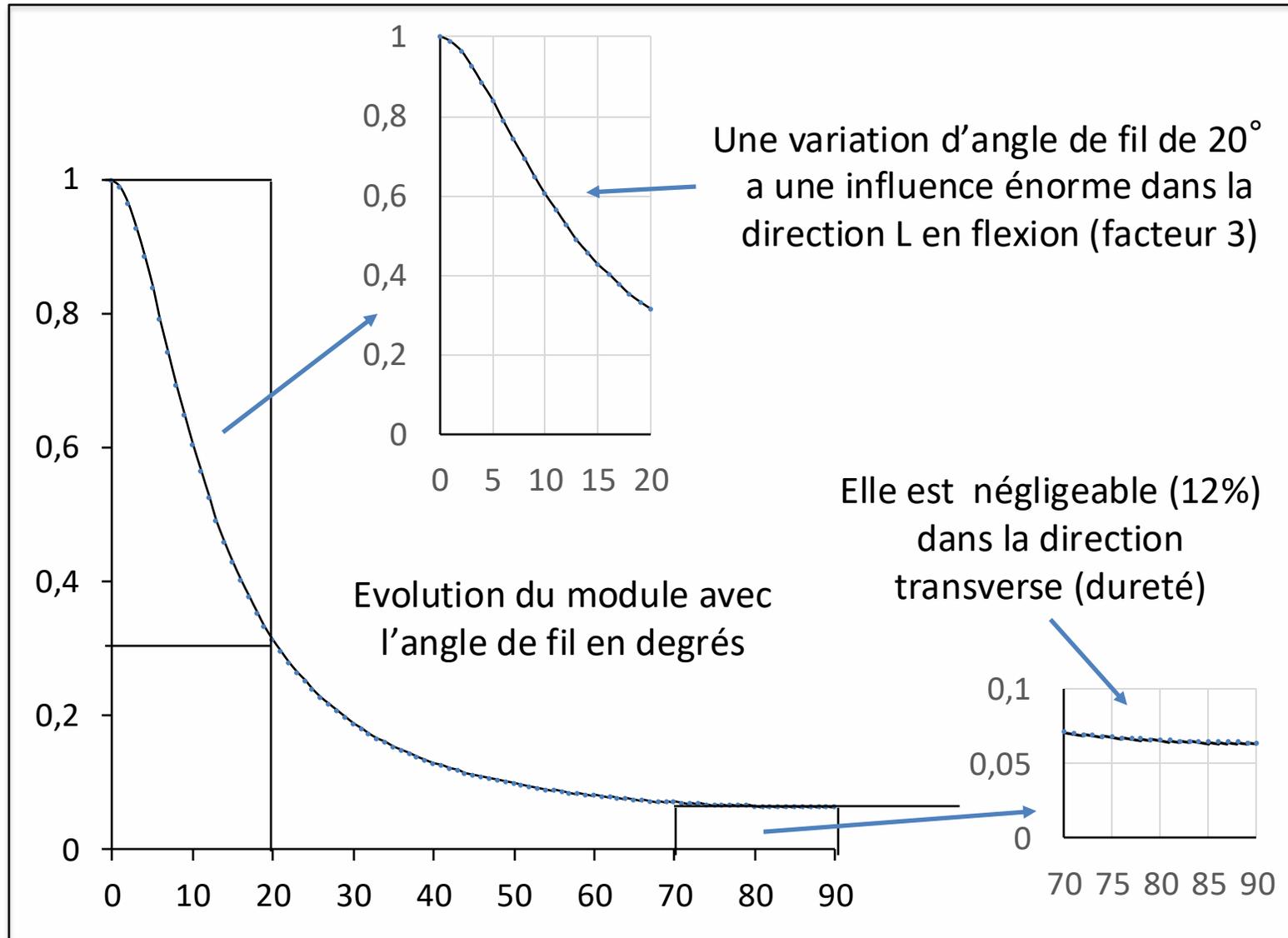
Le rapport module/densité (module spécifique, MS) est le même dans le matériau et dans la paroi

La densité du bois (D) caractérise le nid d'abeille, le module spécifique (MS) caractérise la paroi cellulaire

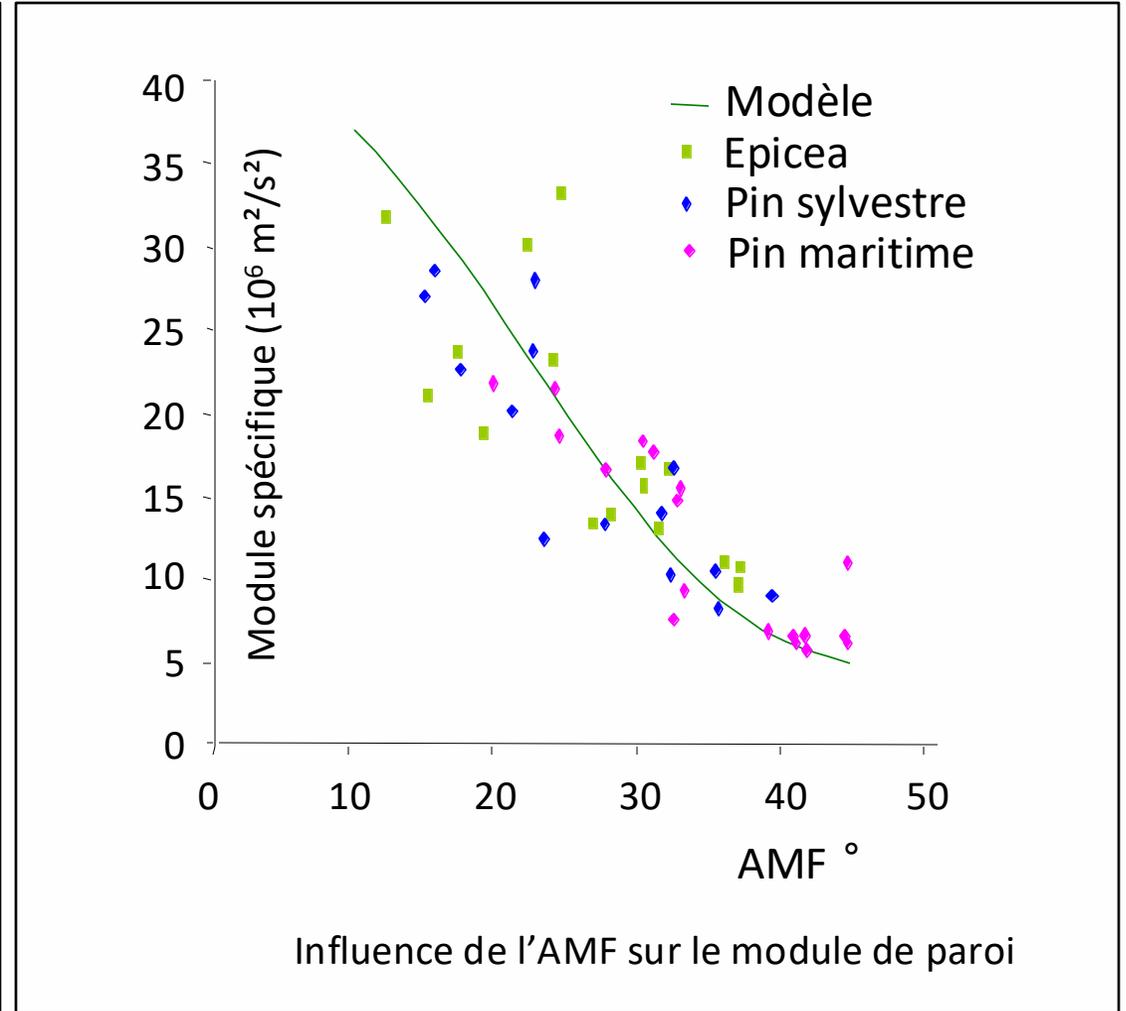
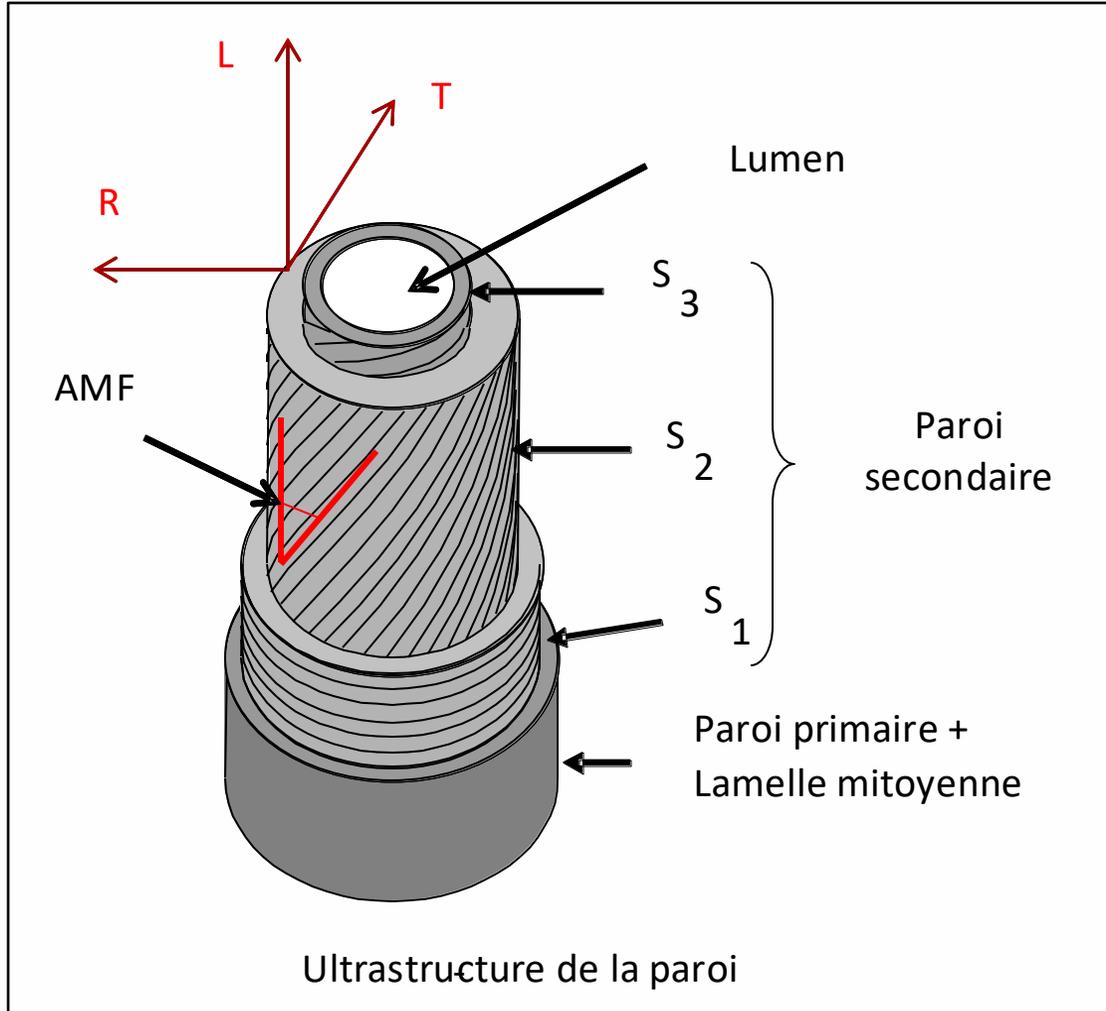
Le module d'élasticité du bois est le produit des deux indicateurs: **MOE = D x MS**



Influence de l'angle de fil (anisotropie du nid d'abeille)



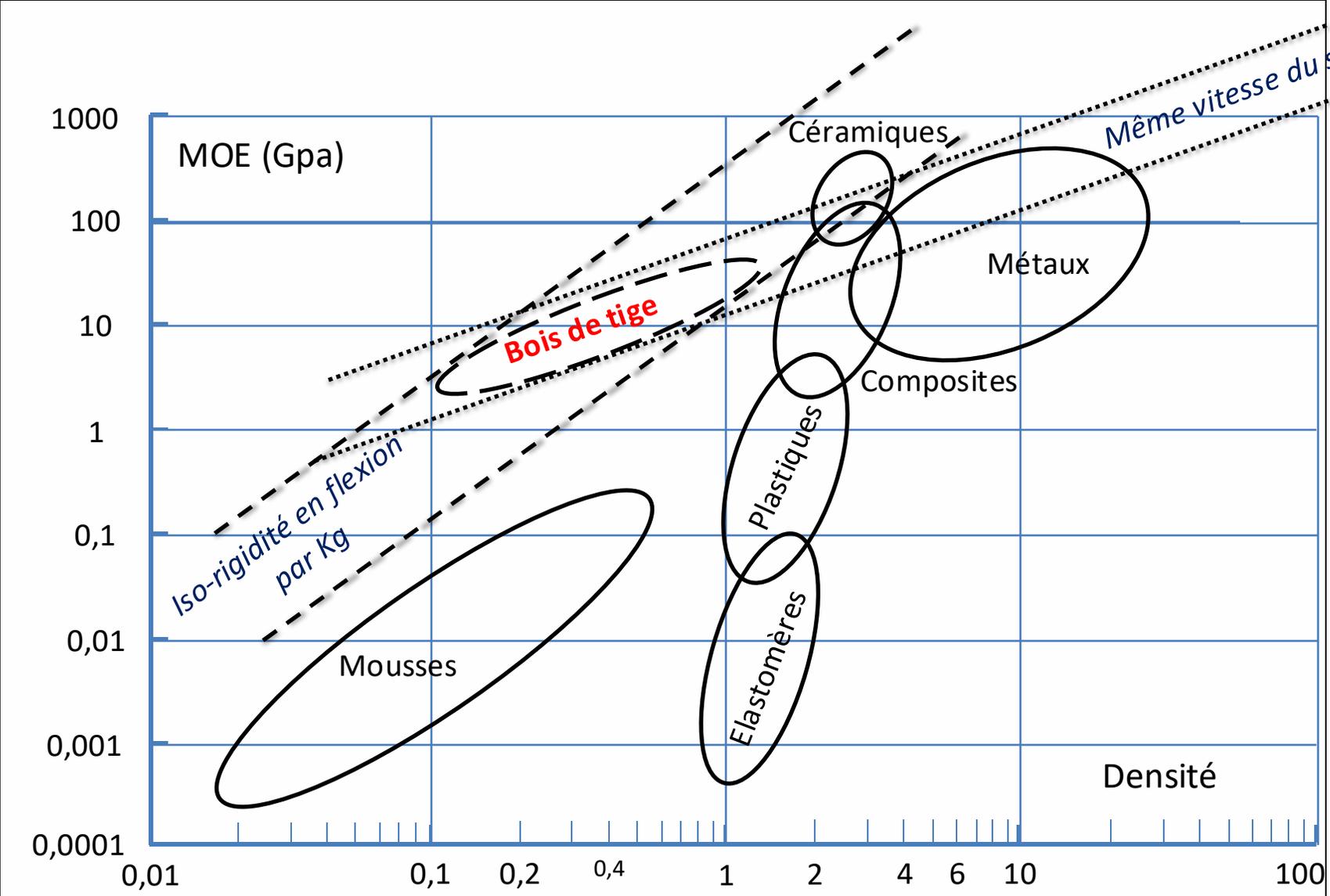
Influence de l'angle des miro-fibrilles (AMF) (anisotropie de la paroi)



Le module d'élasticité de la paroi peut varier de 1 à 6 dans un arbre (bois juvénile ou bois de compression)

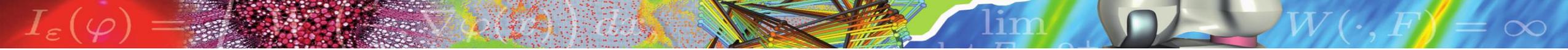


Efficacité en flexion des matériaux (d'après Ashby 2010)

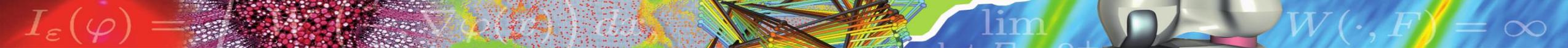


Le bois de tige est aussi performant en flexion que les meilleurs composites.

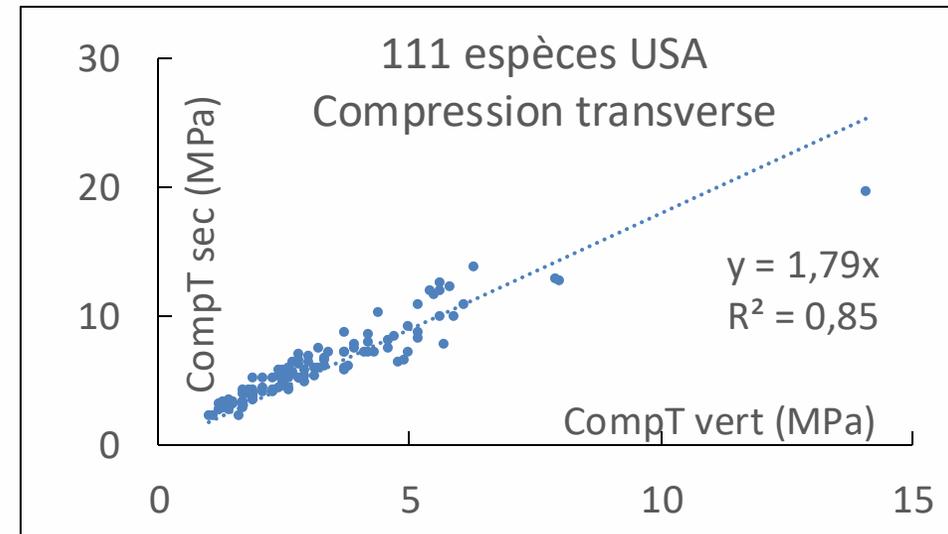
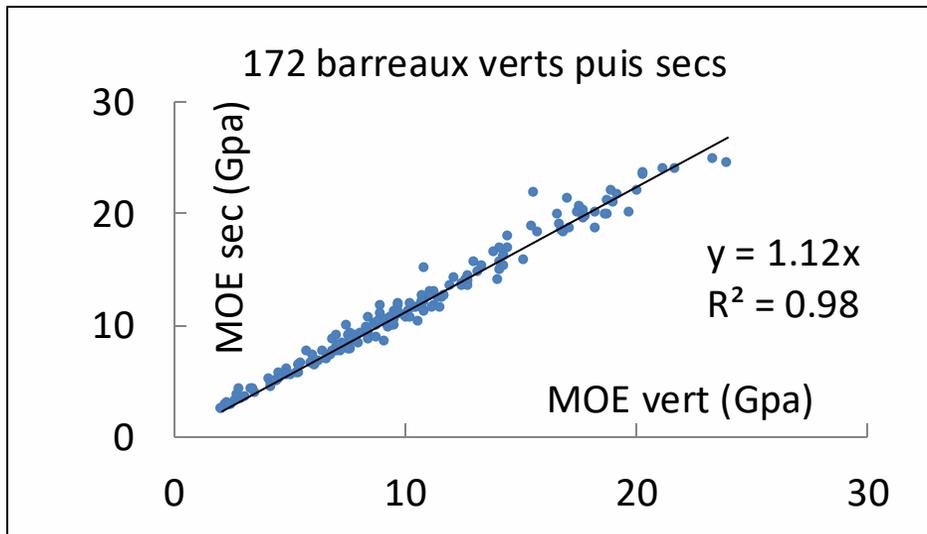
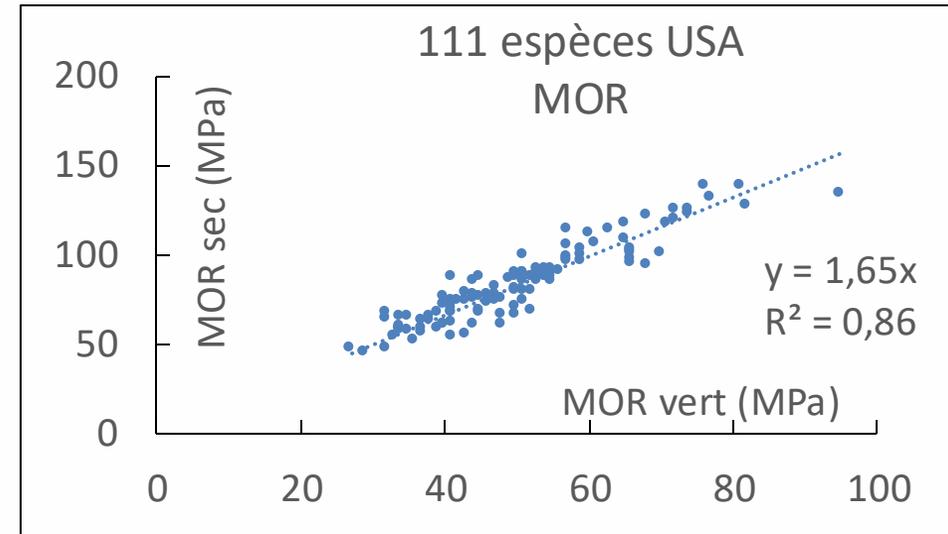
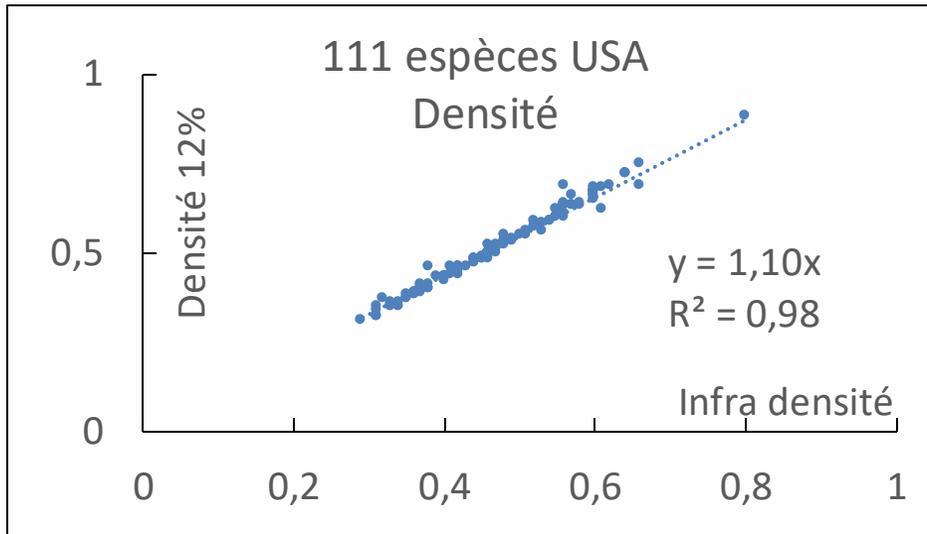
L'efficacité en flexion d'une tige de bois est aussi bonne que celle d'un profilé (IPN) en acier.



Influence de l'humidité du bois



Relations entre propriétés du bois vert et du bois sec à 12%



Il est très facile de passer des propriétés du bois vert à celles du bois sec

Variations de propriétés avec l'humidité (données du Wood handbook)

Propriété	Sec/Vert	12% / 16%	12% / 8%
MOR	1.70	1.16	0.86
MOE	1.25	1.07	0.94
Comp. L.	2.00	1.22	0.82
Comp. T.	2.00	1.22	0.82
Cisail. L.	1.45	1.11	0.90
Traction. P.	1.20	1.05	0.95
Densité		0.99	1.01

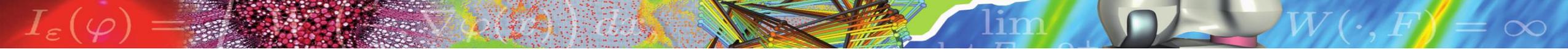
Facteurs de conversion hygroscopique pour une propriété

Sec/vert : de l'état vert à l'état sec à 12%; 12% / 16% : de 16% à 12% d'humidité;

12% / 8% : de 8% à 12% d'humidité

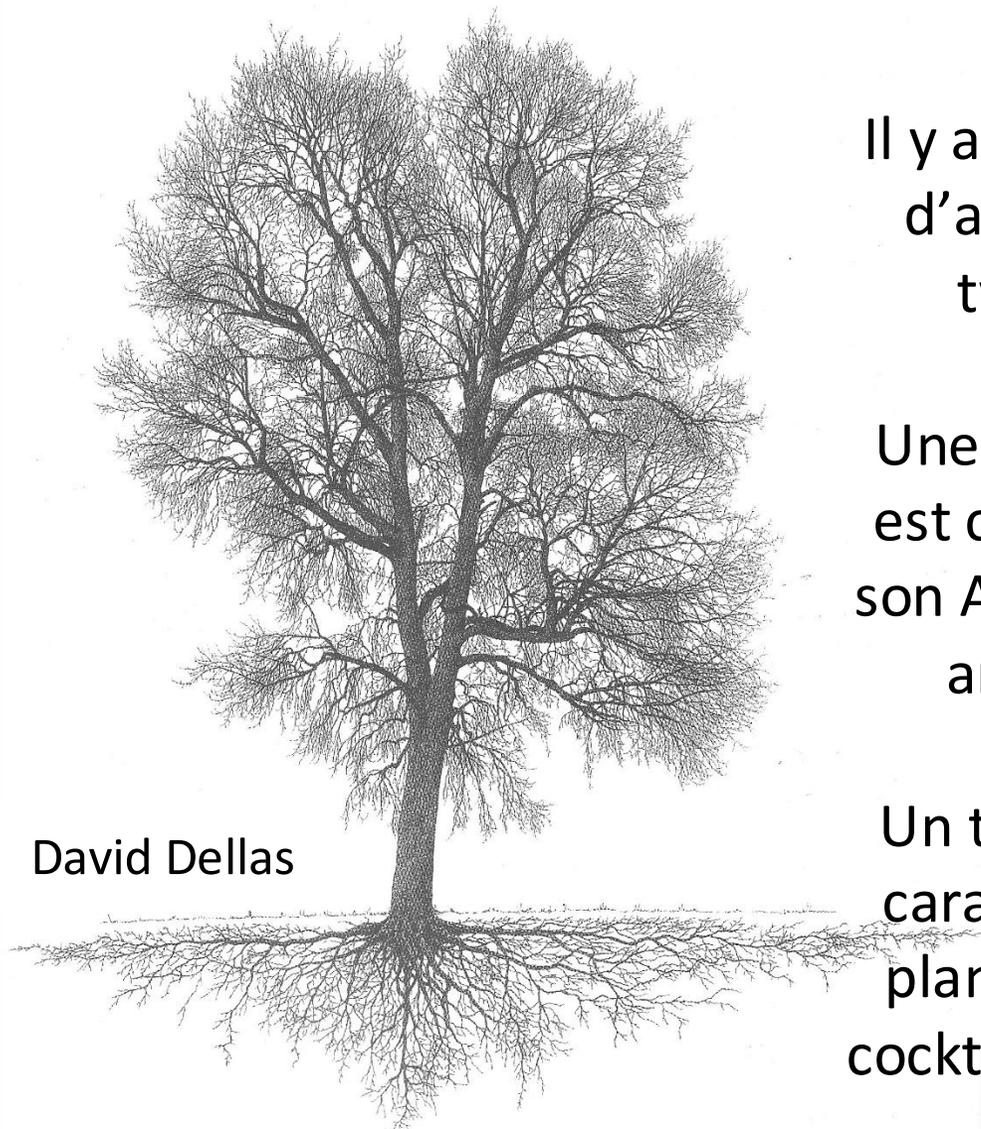
Entre le bois vert et le bois sec à l'air les propriétés varient de un à deux au plus.

Une variation de 4%, en plus ou en moins, autour de 12%, modifie peu les propriétés.



Origine biologique de la variabilité

Diversité des arbres et diversité des bois (diversité génétique)



David Dellas

Orme champêtre (*Ulmus campestris*)

Il y a 60 000 espèces d'arbre et 60 000 types de bois

Une espèce d'arbre est caractérisée par son ADN et son unité architecturale

Un type de bois est caractérisé par son plan ligneux et son cocktail d'extractibles



Orme champêtre (*Ulmus campestris*)

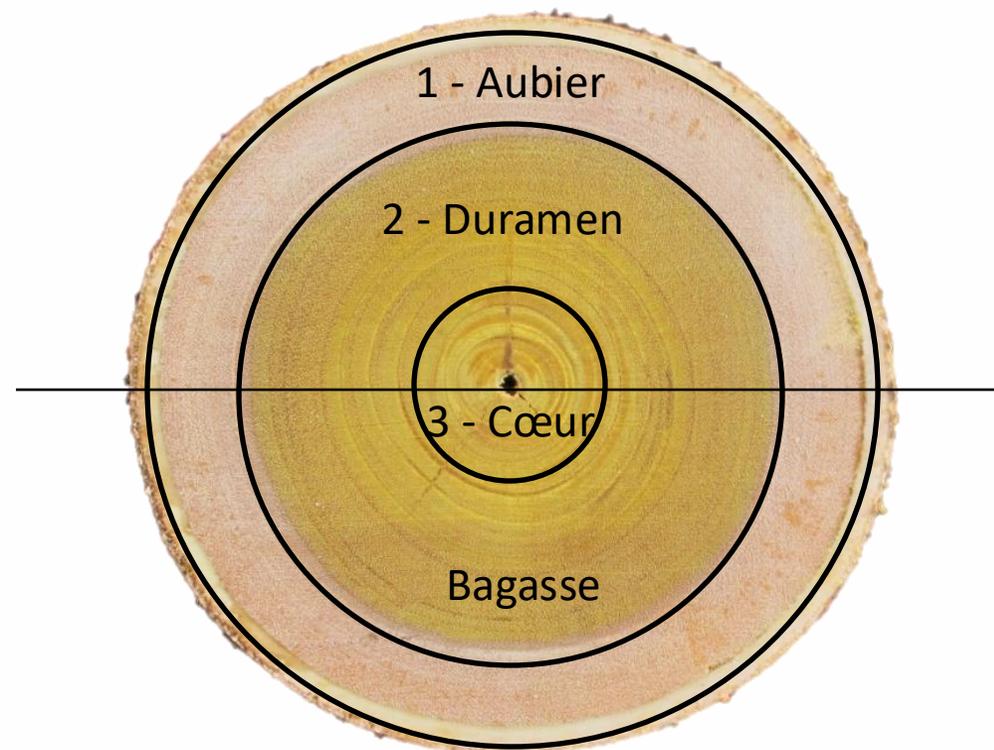
x 10



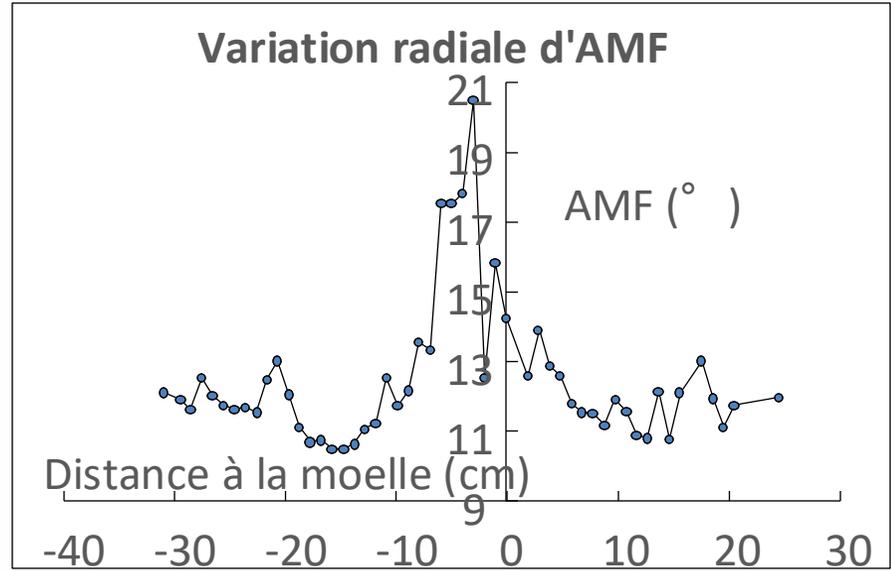
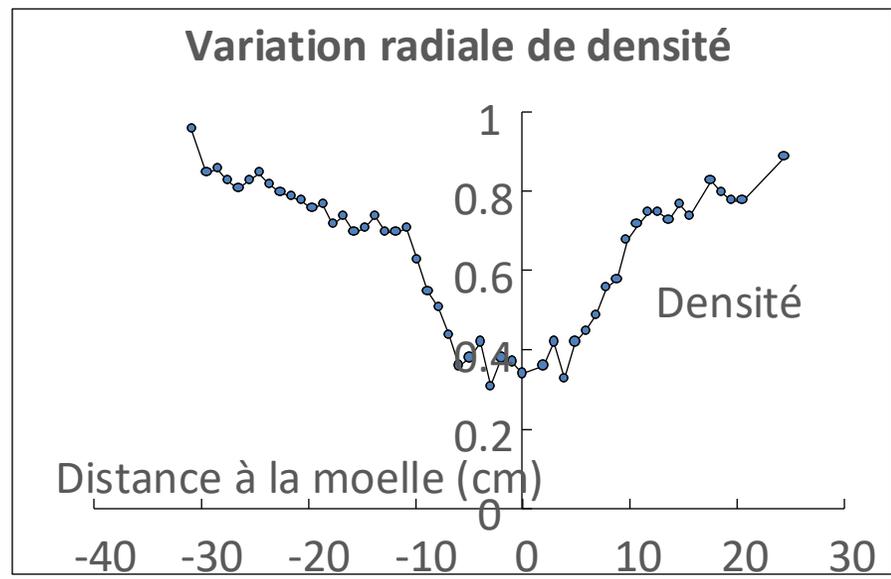
Orme champêtre (*Ulmus campestris*)

X 50

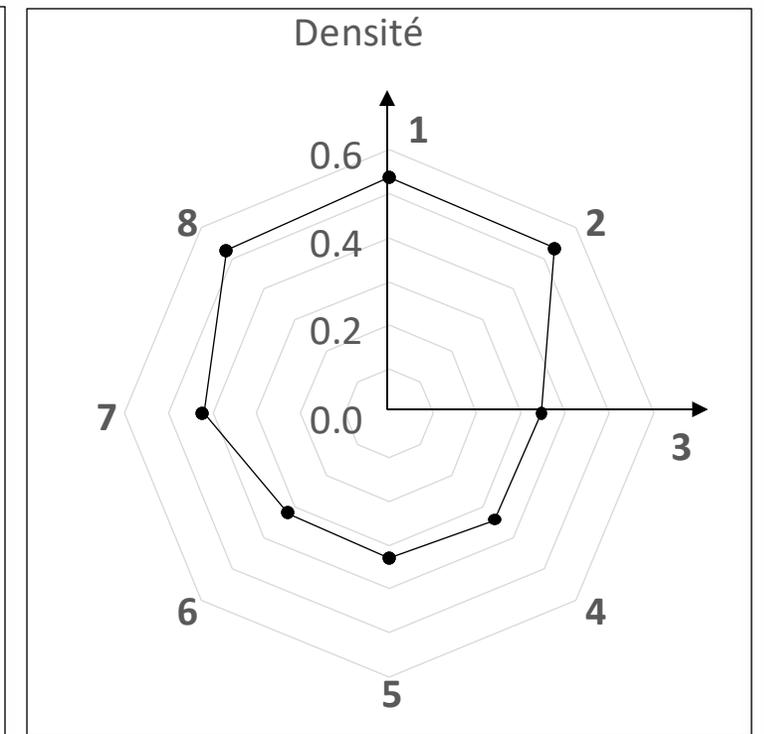
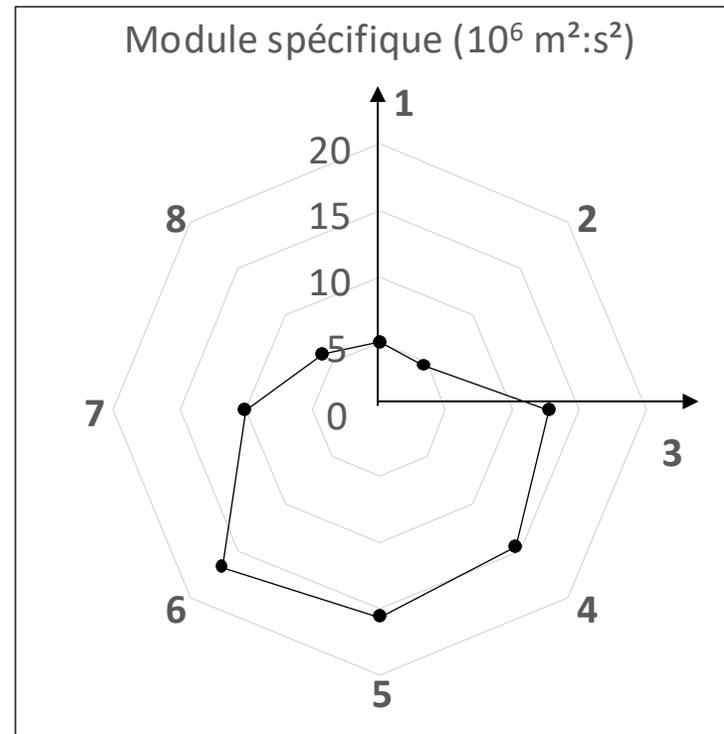
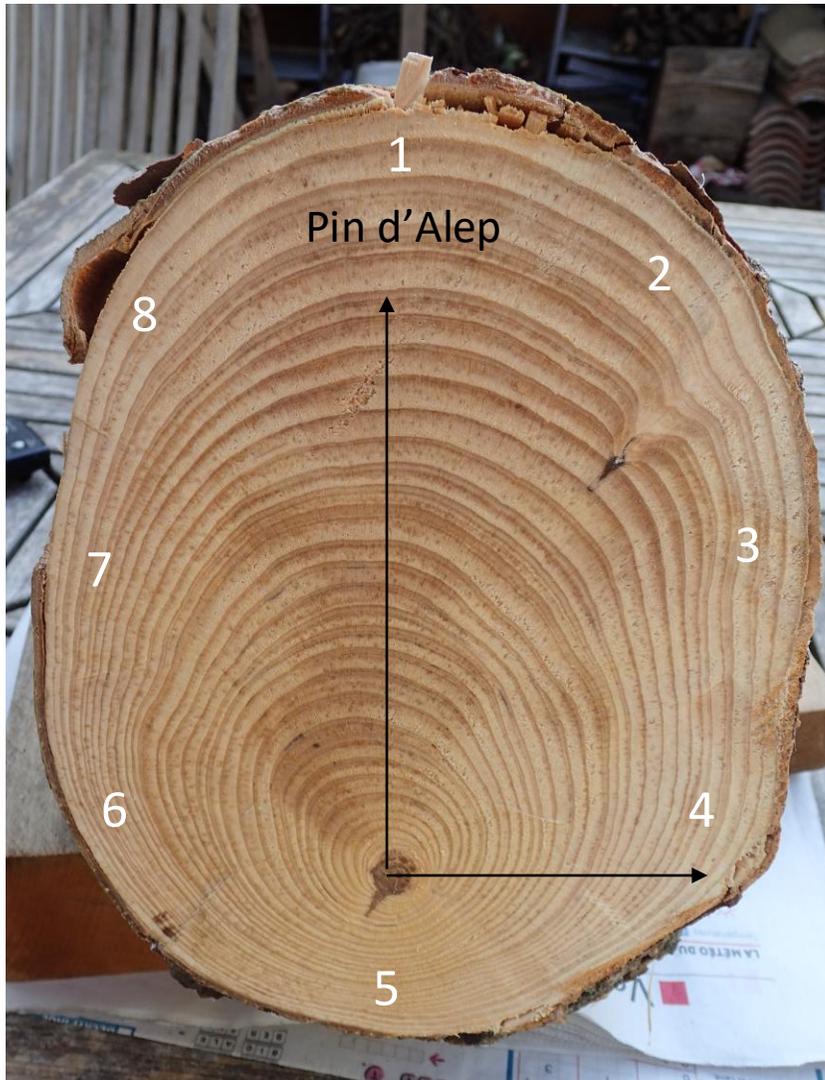
Adaptation radiale de la croissance du bois (effet âge)



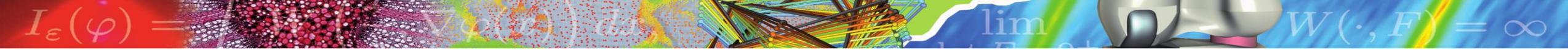
La croissance s'adapte aux contraintes mécaniques de la fabrication de l'arbre en ajustant les propriétés du bois au cours du temps (juvénilité)



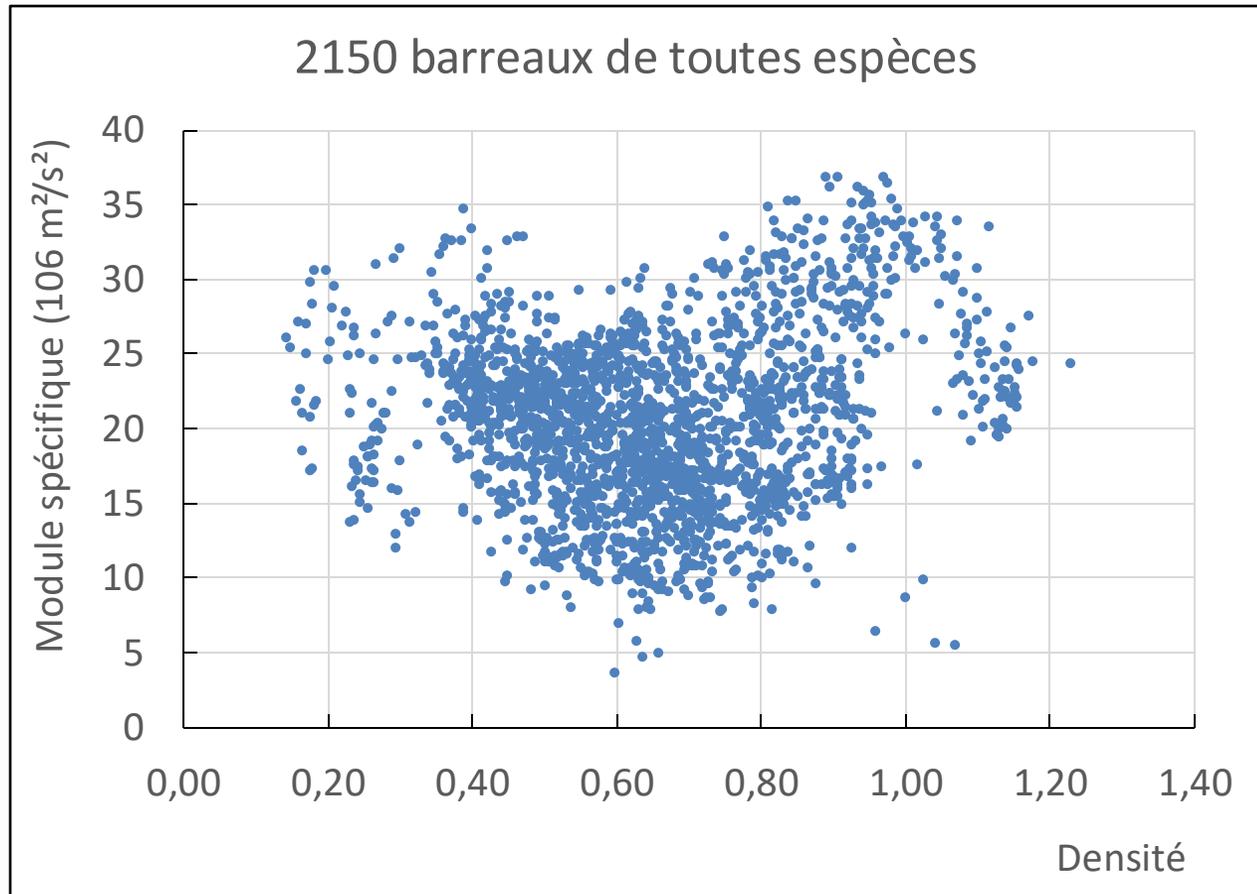
Adaptation circonférentielle de la croissance (contrôle de posture)



La croissance s'adapte au besoin du contrôle de posture de l'arbre en ajustant localement les propriétés du bois (bois de réaction).



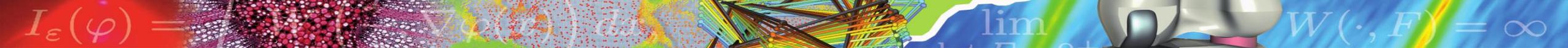
Variabilité des deux indicateurs (D et MS) pour des pièces de bois



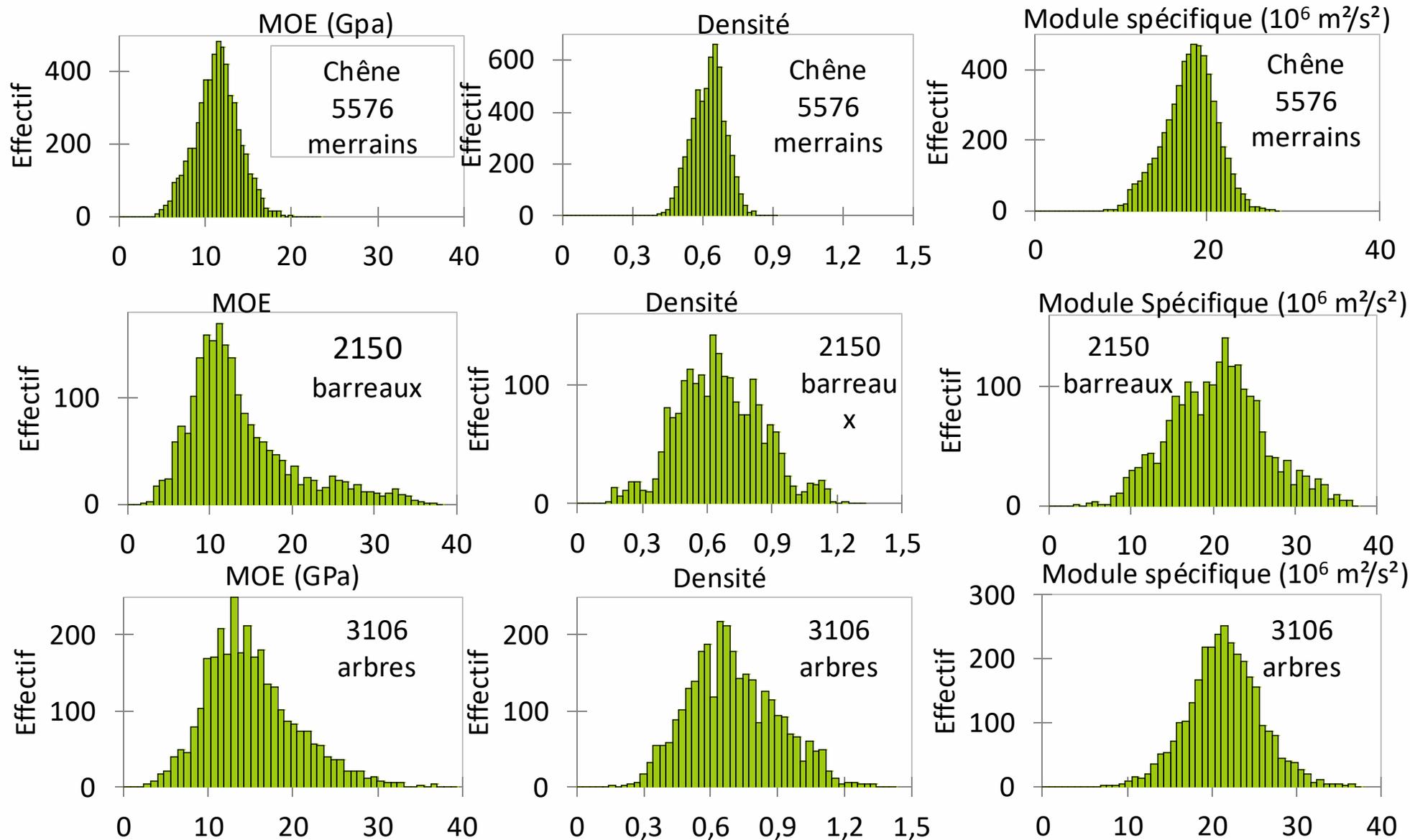
2150 barreaux	Minimum	Maximum	Moyenne	CV
Densité	0.147	1.231	0.656	29.7%
MS ($106 \text{ m}^2/\text{s}^2$)	3.53	36.70	20.58	27.5%
MOE (GPa)	2.12	37.36	13.65	47.2%

La variabilité des valeurs de densité et de module spécifique dans des pièces de bois provenant de nombreux arbres de beaucoup d'espèces est très grande, avec des variations de l'ordre de 1 à 10 pour les deux indicateurs (presque de 1 à 20 pour le module d'élasticité).

Les deux indicateurs apparaissent comme indépendants, ce qui signifie que l'adaptation au niveau de la paroi (module spécifique) et au niveau du nid d'abeille (densité) ne sont pas forcément liées entre elles



La diversité du bois est la somme des diversités génétique et adaptative.



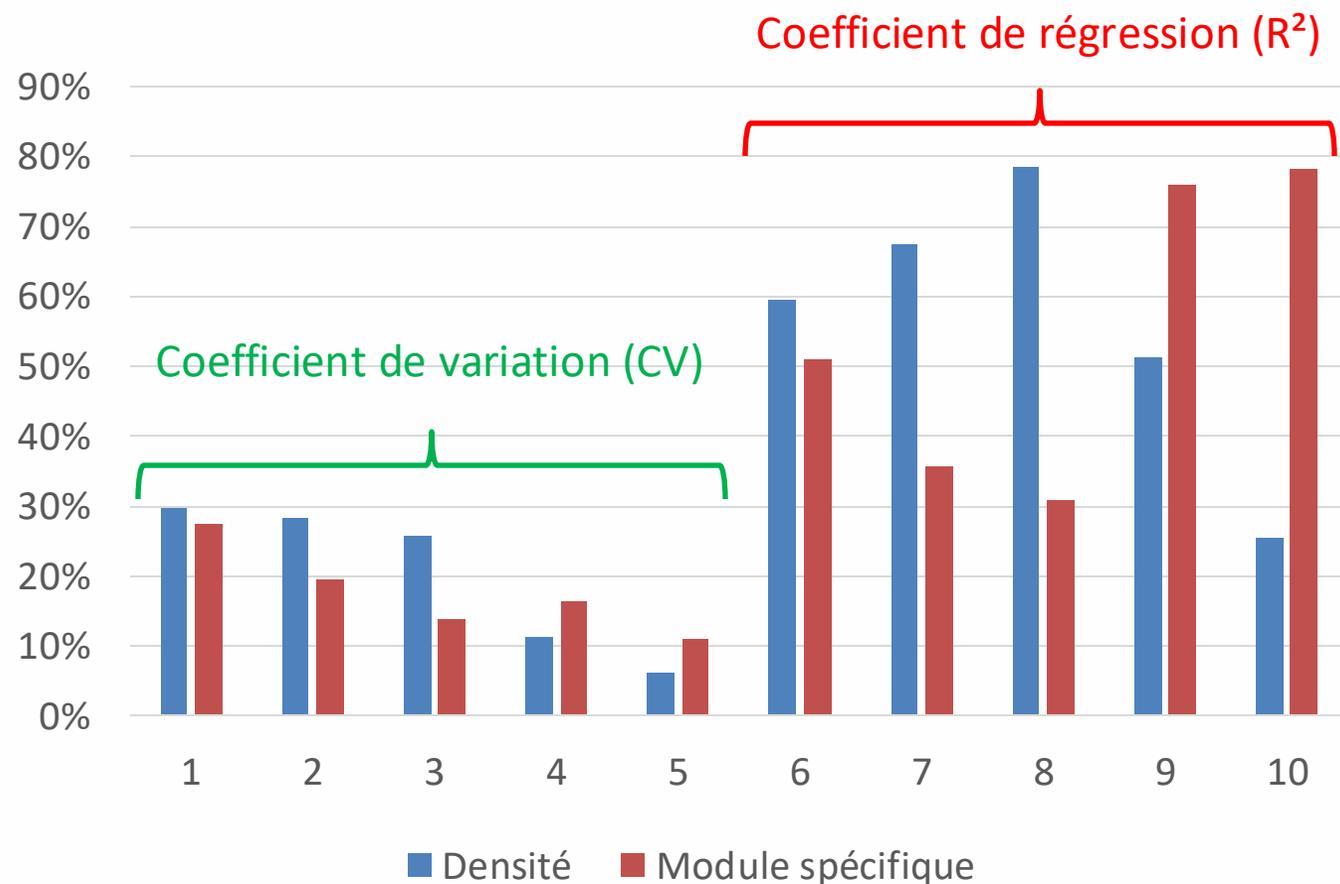
Les pièces cumulent la diversité entre espèces, entre arbres d'une espèce et entre parties d'un tronc.

Dans une espèce donnée il n'y a plus de diversité génétique spécifique (densité).

Dans les moyennes d'arbres il n'y a plus la diversité adaptative intra arbre (MS), mais il reste la diversité adaptative inter arbres (élancement)

Variabilité et poids de D et MS vis-à-vis de MOE

Variabilité et poids de D et MS vs. MOE



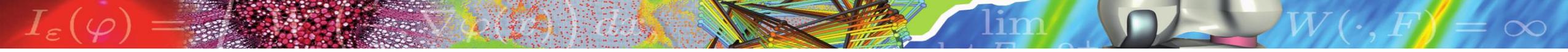
- 1 & 6: 2150 barreaux toutes espèces
- 2 & 7: 3106 moyennes par arbres
- 3 & 8: 190 moyennes par espèces
- 4 & 9: 5576 merrains chêne
- 5 & 10: 1259 barreaux hêtre

MOE est le produit de D et MS

Pour des pièces de bois issues de nombreux arbres de toutes les espèces, la variabilité (CV) et le poids dans la régression (R^2) de la densité et du module spécifique sont semblables.

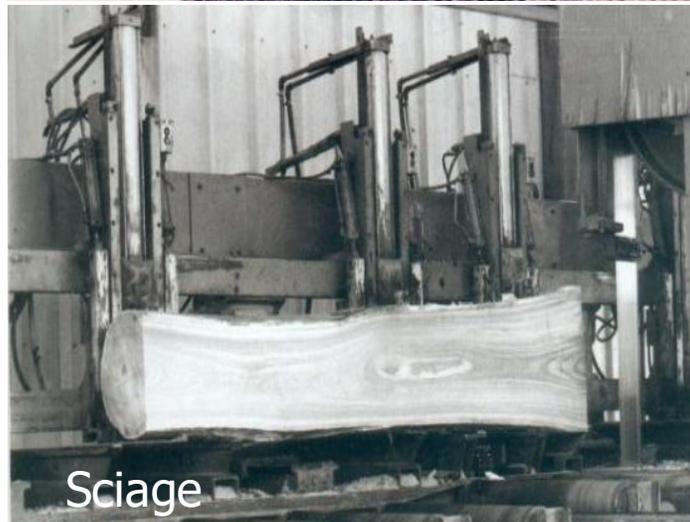
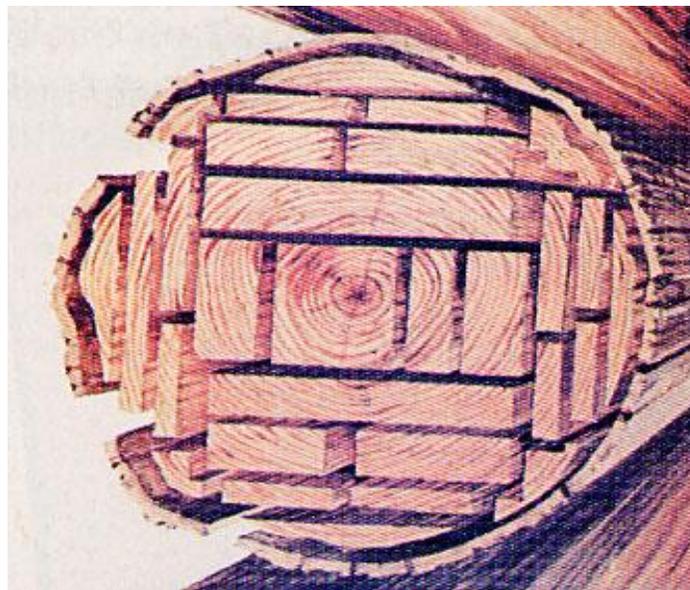
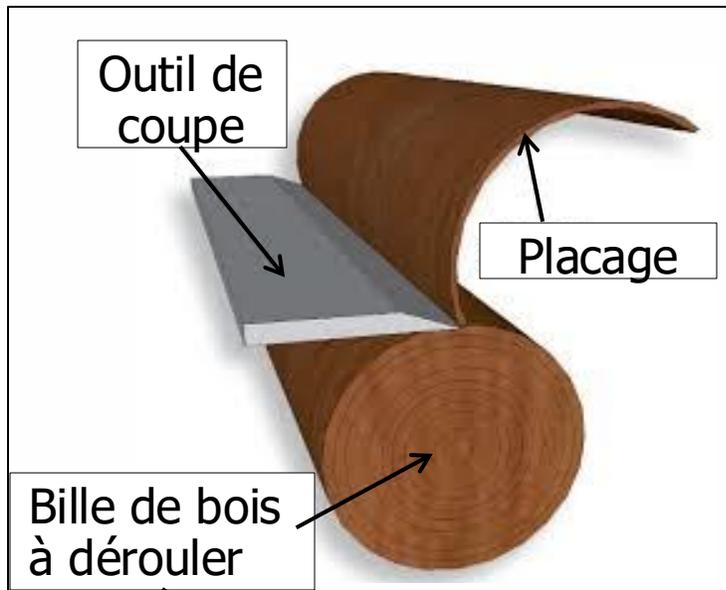
Pour des moyennes dans de nombreux arbres de toutes espèces ou des moyennes d'espèces avec au moins 5 arbres par espèce, le CV et R^2 sont plus élevés pour la densité.

Pour des pièces issues d'arbres d'une même espèce, les CV sont plus faibles mais c'est le CV et le R^2 du module spécifique qui sont les plus élevés



Le passage de la tige au bois scié, la création des défauts

Il faut un premier débit pour passer de la tige au matériau



Déroulage

Sciage

Fendage

Un nœud est une jonction vitale pour l'arbre, un défaut pour la planche



Nœud de chêne fendu - vis à vis

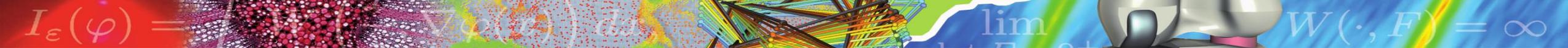


Fente qui suit le fil

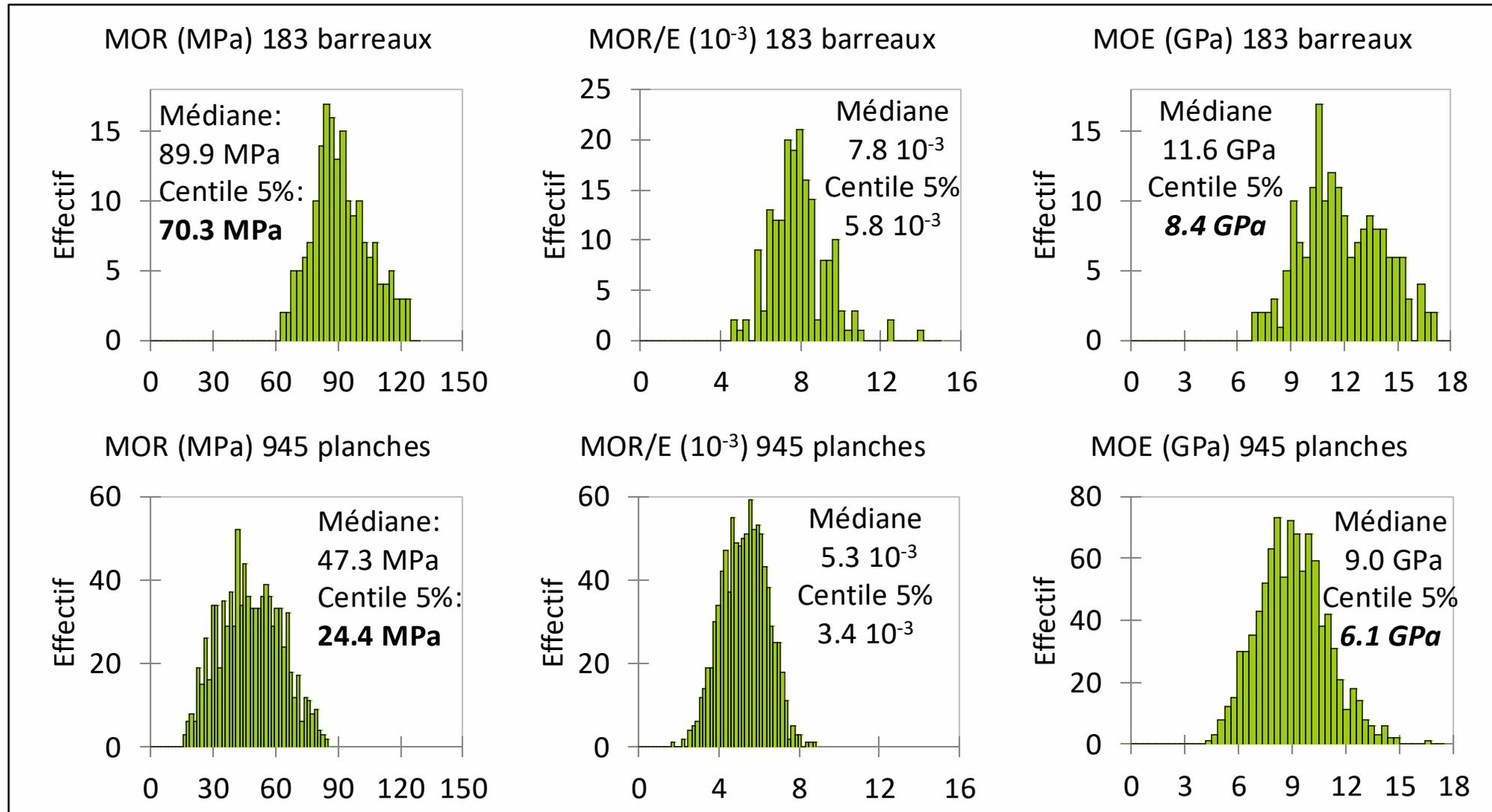
La très grande résistance des zones de jonction, résulte du procédé de fabrication de l'arbre de type impression 3D.

Elle est parfois utilisée pour des pièces nécessitant ce type de jonction cylindre/cylindre très résistante (charpente de marine)

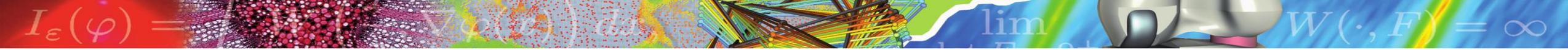
Après sciage le nœud devient un défaut pour la planche car la cohérence 3D de la jonction est perdue et le fil du bois est localement incliné



Comparaison bois de tige / bois de planche (Pin à crochet)



Il y a un décalage vers les faibles valeurs surtout pour MOR et la rupture est plus fragile



Petite conclusion

La fabrication du bois dans une tige est très organisée et finalement prédictible quant aux propriétés en flexion (ou compression), en utilisant uniquement la densité et le module spécifique, quelle que soit l'espèce de bois concernée.

Pour ces bois la déformation à rupture est très élevée, bien au-delà des tolérances dimensionnelles de la conception mécanique usuelle. C'est le module qui pilote le dimensionnement et il est facile à estimer sur chaque pièce.

Le débit du bois en planche détruit plus ou moins, selon le schéma de débit, l'organisation optimum du bois dans le tige. La résistance à la rupture est très fortement diminuée par le débit (divisée par 2 en médiane et par 3 pour le centile 5%).

Cette perte globale peut-être atténuée par des actions de tri sur les défauts d'une part, par la fabrication de produits comme le lamellé collé qui réduit la dispersion de la résistance à la rupture.

Merci de votre attention

