

Diversité des comportements

Quelques aspects du comportement physico-mécanique du bois

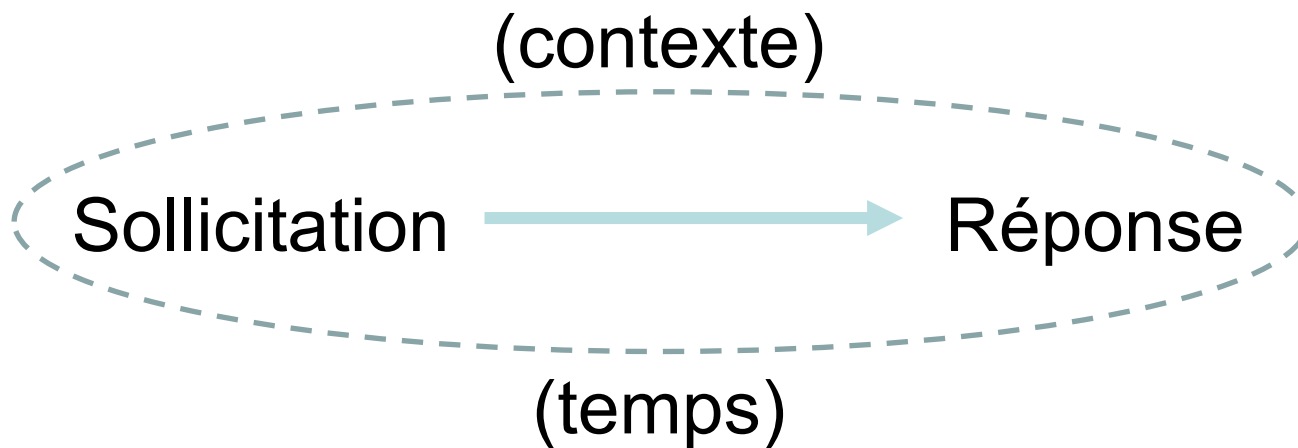
Joseph GRIL, Directeur de recherche CNRS
Institut Pascal et PIAF, Clermont Ferrand



- *Intro*
- *Anisotropie et hygro-élasticité*
- *Dépendance du temps et (hygro)thermoactivation*
- *Couplages hygromécanique*
- *Mise en forme*

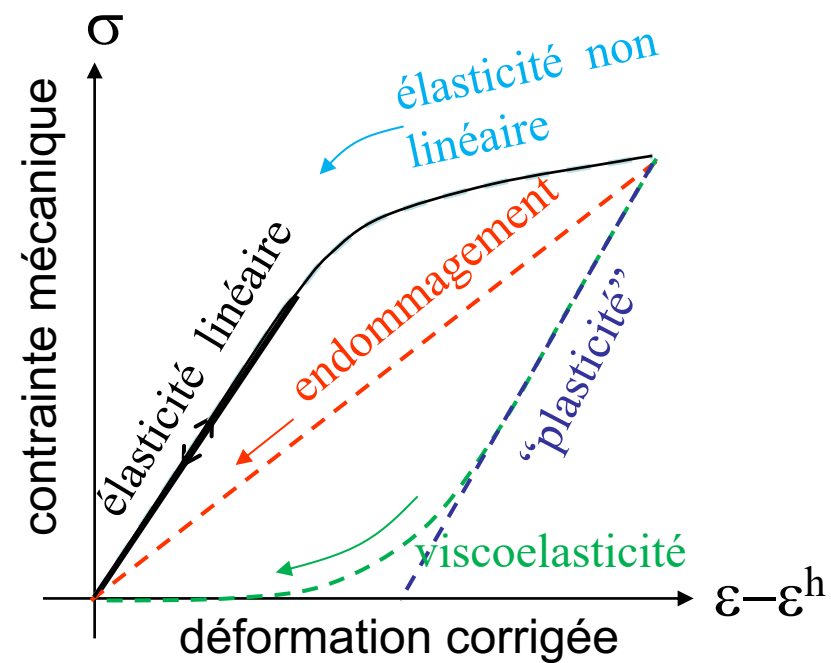
Comportement

« Manière dont quelque chose fonctionne, marche, évolue dans certaines circonstances »



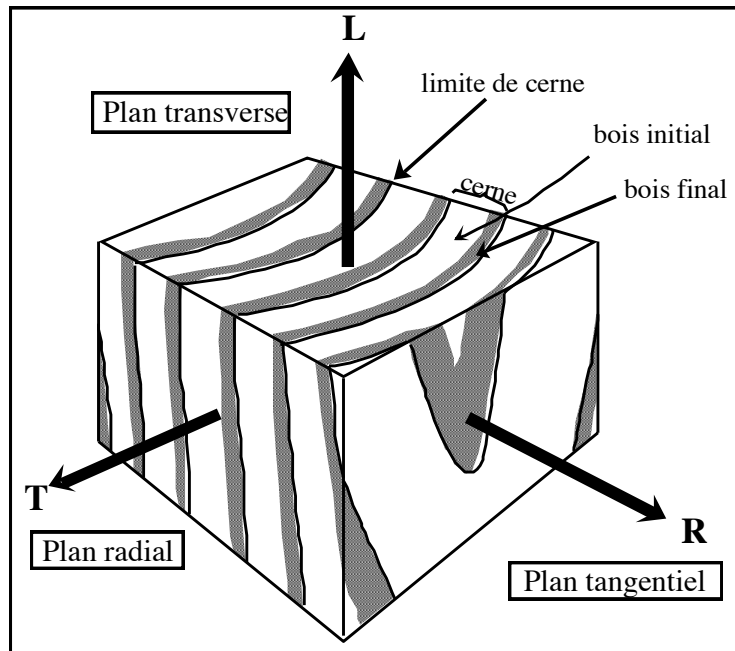
Le comportement rhéologique du bois

- La rhéologie étudie les déformations des matériaux
 - elle fait partie de la mécanique des solides comme le bois
 - complémentaire de la mécanique des structures
- Aspects principaux de la rhéologie
 - viscoélasticité (bois = polymère)
 - endommagement (bois = composite)
 - “plasticité” (bois = solide cellulaire)
- Et aussi:
 - hygroscopicité: sorption, diffusion
 - (origine biologique: variabilité, contraintes de croissance...)

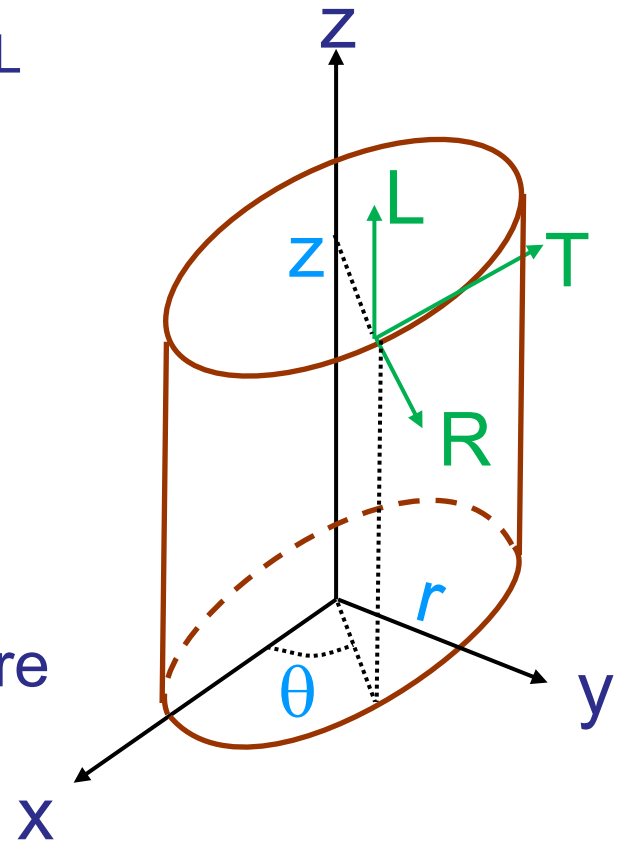


Anisotropie et hygro-élasticité

Anisotropie: le modèle orthotrope cylindrique du bois 'idéal'



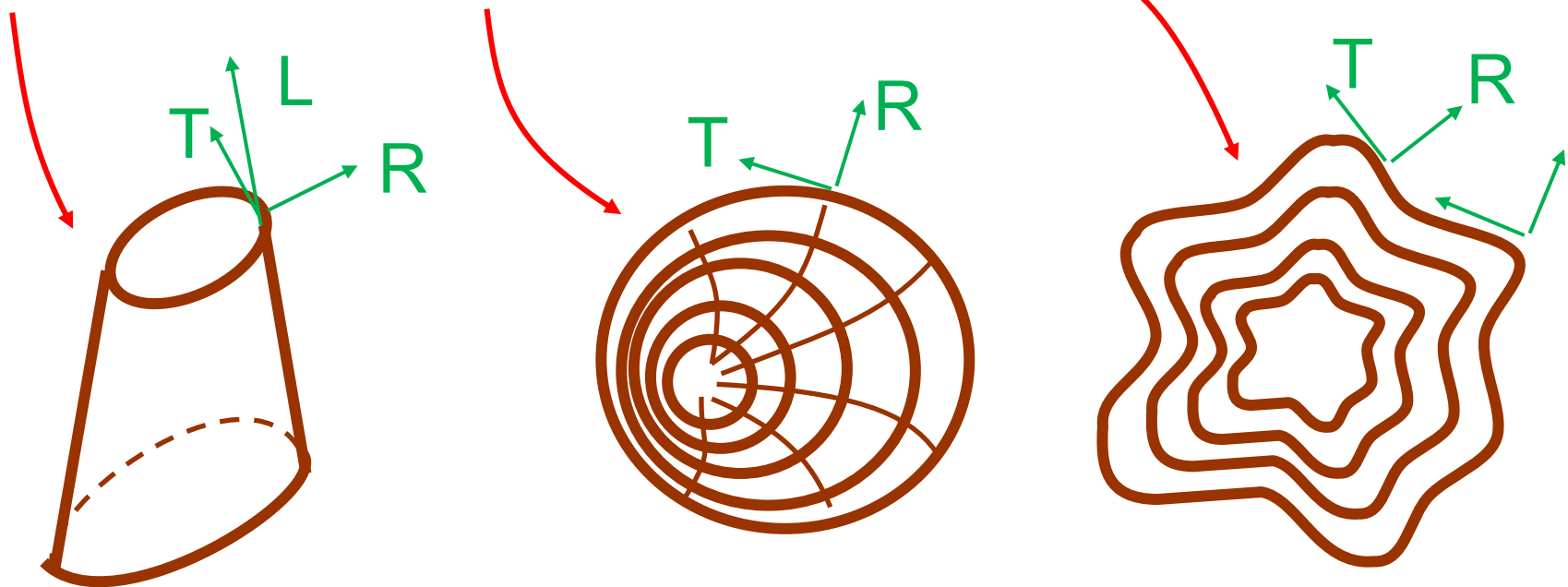
- **Orthotropie locale**
= 2 plans de symétrie matérielle :
 - plan transverse RT
 - plan radial RL



- **Orthotropie globale cylindrique**
= le repère d'orthotropie (R,T,L)
coïncide en tout point avec le repère
cylindrique (e_r, e_θ, z)

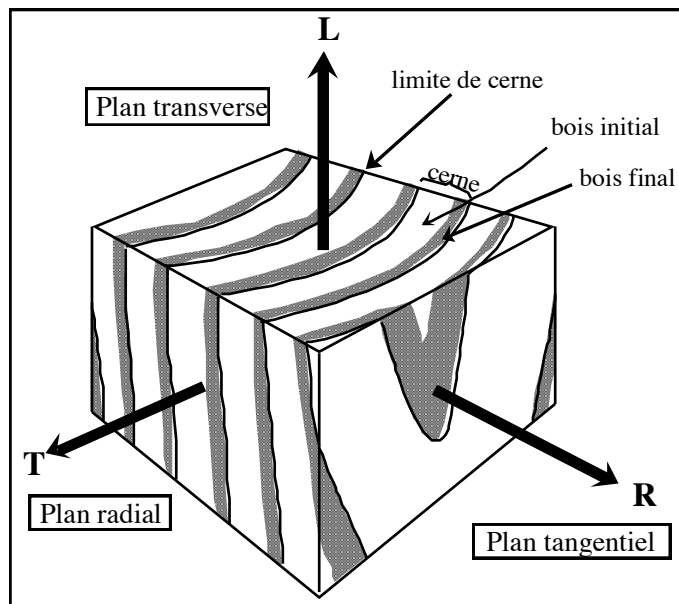
Ecarts au modèle orthotrope cylindrique

- Mise en défaut...
 - de l'orthotropie locale: déviation des rayons, des alignements de vaisseaux...
 - de l'orthotropie globale cylindrique: conicité du tronc, excentricité, cernes flexueux...

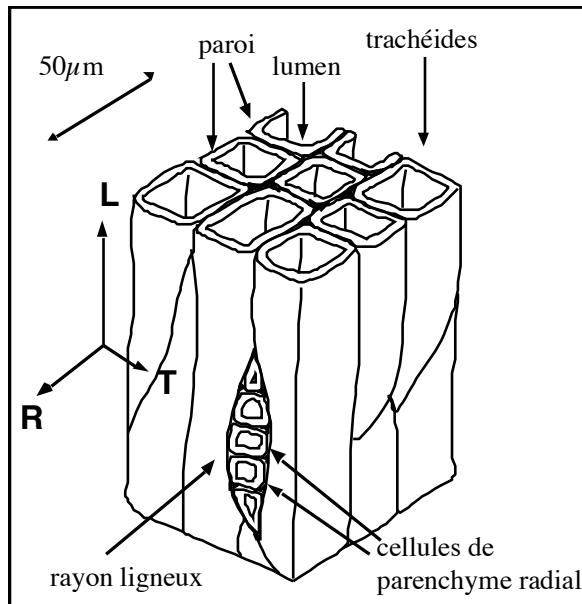


Anisotropie mécanique : contribution imbriquée des échelles

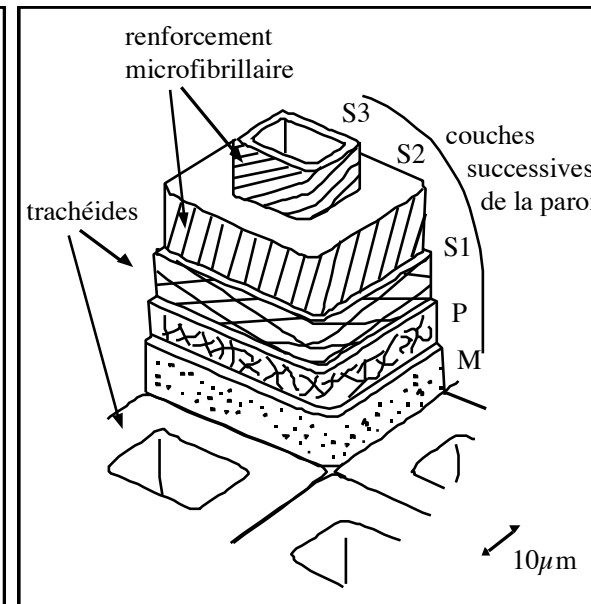
d'après Norimoto et Gril (1989)



cernes: $L \text{ et } T > R$



tissu: $L > R \text{ et } T$
 $R > T$



paroi: $L > R \text{ et } T$

- L'anisotropie du bois résulte de la contribution de plusieurs échelles:
 - la rigidité de la direction L est favorisée par toutes les échelles $L \gg R \text{ et } T$
 - situation plus complexe pour les directions transverses, globalement $R > T$

Le modèle hygro-élastique du bois idéal

$$\varepsilon^h = \alpha \cdot \Delta h \quad \sigma = C \cdot (\varepsilon - \alpha \cdot \Delta h) \Leftrightarrow \varepsilon = S \cdot \sigma + \alpha \cdot \Delta h$$

$$\begin{array}{c}
 \varepsilon_R \\
 \varepsilon_T \\
 \varepsilon_L \\
 \gamma_{LT} \\
 \gamma_{RL} \\
 \gamma_{RT}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{ccc}
 \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & -\frac{\nu_{LR}}{E_L} \\
 -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} \\
 -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} \\
 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} \\
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0
 \end{array}
 \cdot
 \begin{array}{c}
 \sigma_R \\
 \sigma_T \\
 \sigma_L \\
 \sigma_{LT} \\
 \sigma_{RL} \\
 \sigma_{RT}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{c}
 \alpha_R \\
 \alpha_T \\
 \alpha_L \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{array}
 \cdot \Delta h$$

modules élastiques = modules d'Young: $E_T < E_R \ll E_L$

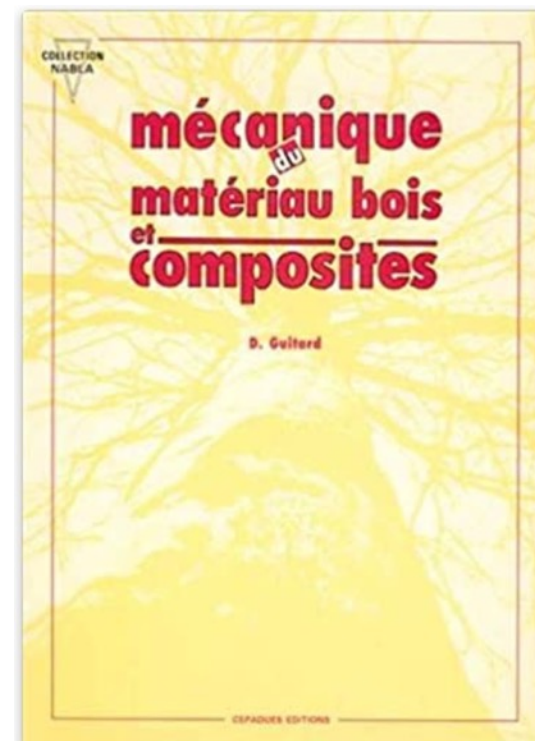
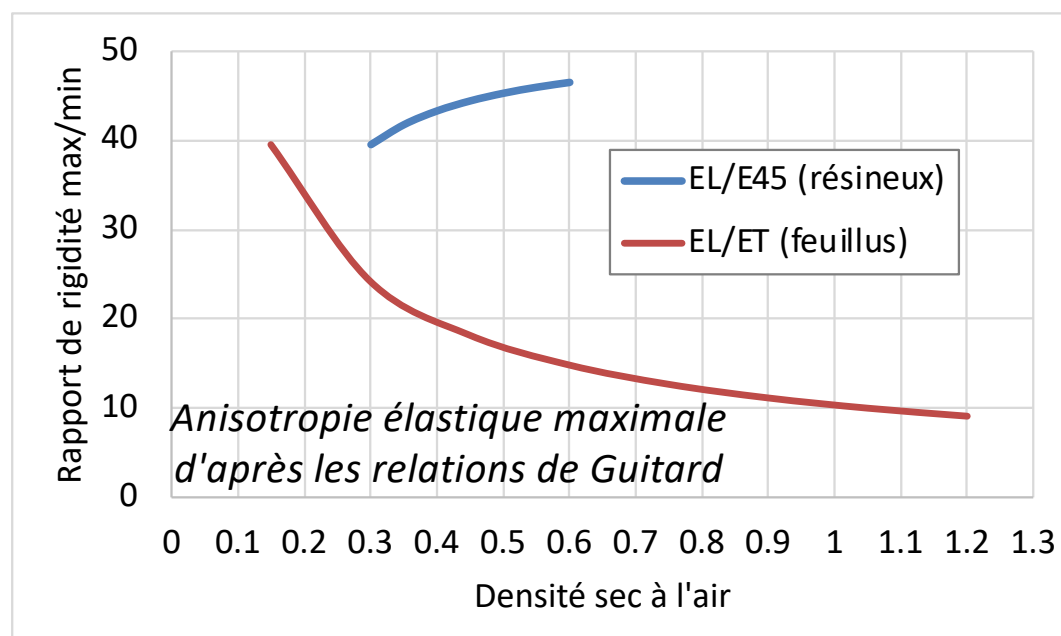
modules de cisaillement: $G_{RT} < G_{TL} \sim G_{RL}$

coefficients de Poisson: $\nu_{RL}, \nu_{TL} \ll 1 \dots$

coefficients d'expansion: $\alpha_L \ll \alpha_R < \alpha_T$

Corrélations avec la densité (Guitard 1987)

- Relations statistiques entre rigidités et densité à 12%
 - lois puissance $X = a.(d/0.65)^b$ pour feuillus
 - lois affines $X = a.(d - 0.45) + b$ pour résineux
- Rend bien compte des tendances inter-espèces

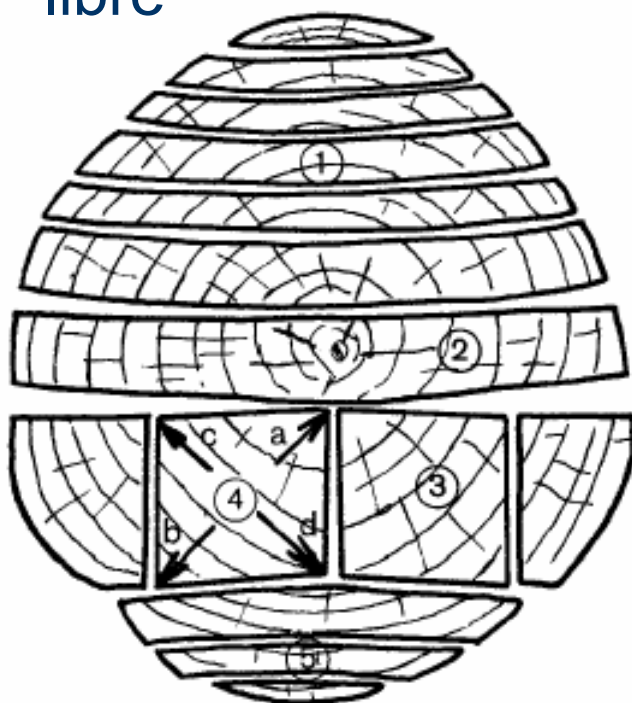


<http://mecabois.over-blog.com/tag/mecanique%20du%20bois/>

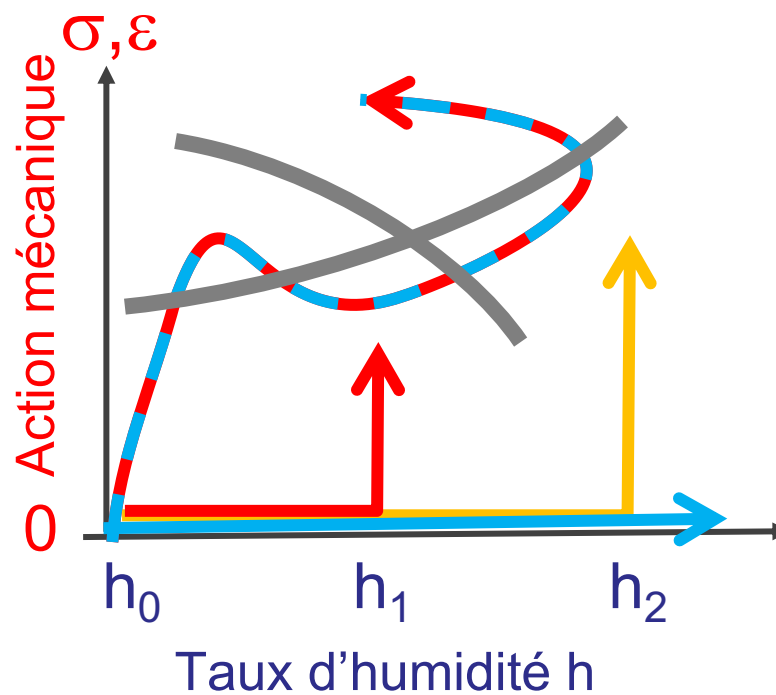
Validité de l'hygro-élasticité

$$\varepsilon = S \cdot \sigma + \alpha \cdot \Delta h$$

- Contrainte σ nulle :
expansion hydrique
libre



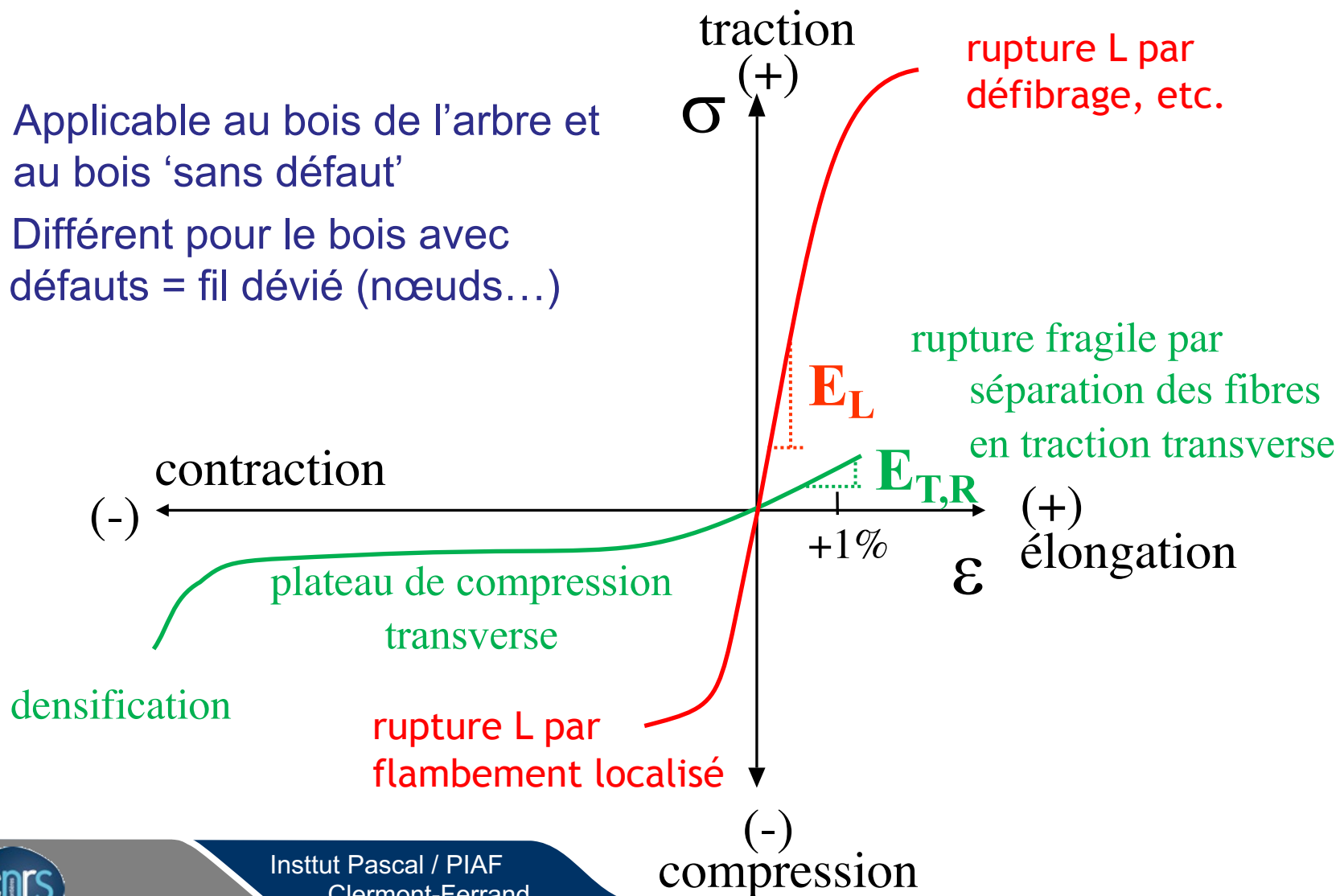
DEFORMATIONS DUES AU RETRAIT
DU BOIS AU COURS DU SECHAGE



- Action mécanique à taux
d'humidité constant

Les limites du comportement élastique du bois

- Applicable au bois de l'arbre et au bois 'sans défaut'
- Différent pour le bois avec défauts = fil dévié (nœuds...)



*Dépendance du temps et
(hygro)thermo-activation du comportement*

Comportement “dépendant du temps”

- $t \in$ comportement:
- Les propriétés du matériau ne changent pas, mais font intervenir le temps:
 - effet de l’environnement (si réversible)
 - viscoélasticité
 - vieillissement physique
- Comportement (t):
- Les propriétés du matériau changent dans le temps, à cause:
 - des conditions environnementales (température, humidité...)
 - du chargement mécanique (endommagement...)
 - d’un processus chimique interne (dégradation, recristallisation, vieillissement chimique...)
 - ou tout couplage entre ces facteurs

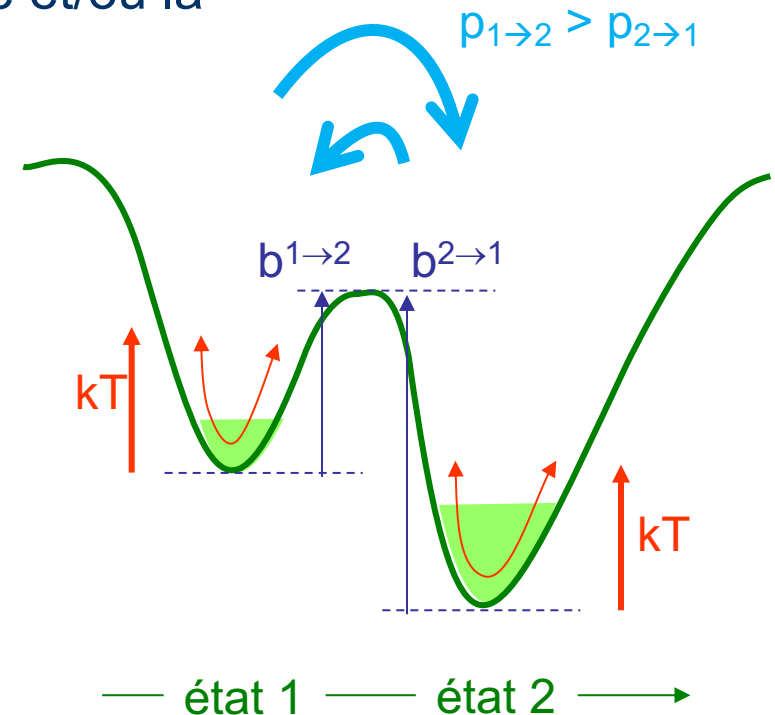
≈ réversibilité

! irréversibilité

Interprétation moléculaire d'un processus cinétique

- Répartition statistique entre des configurations représentées par des puits de potentiel énergétique
- Pour passer d'un puit à l'autre les particules doivent franchir des barrières énergétique (b)
- La probabilité de franchissement est d'autant plus grande que la température est plus élevée et/ou la barrière plus basse

$$\begin{aligned}
 p_{1 \rightarrow 2} &\propto \exp\left[-\frac{b^{1 \rightarrow 2}}{kT}\right] \\
 &= \exp\left[-\frac{N \times b^{1 \rightarrow 2}}{N \times kT}\right] = \exp\left[-\frac{B^{1 \rightarrow 2}}{RT}\right]
 \end{aligned}$$



Conseils pour l'analyse de processus cinétiques (1/2)

- Sorption, fluage ou relaxation, réaction chimique, etc. sont des phénomènes de migration progressive d'un état vers un autre. On a besoin de connaître le **temps caractéristique** du processus, et l'**état d'équilibre** vers lequel le système tend
- Erreur classique: « un échantillon mis à sécher est pesé *chaque jour* jusqu'à stabilisation du poids = quand la mesure de la balance est la même que celle *du jour précédent* »
- Il faut raisonner en **logarithme** du temps et non en temps: la mesure à t doit être comparée à celle à t/a ($a=2, 3, 10\dots$) et non à $t-\Delta t$.

Conseils pour l'analyse de processus cinétiques (2/2)

- On ne s'approche de l'équilibre que si le temps caractéristique du processus a été dépassé, c'est-à-dire:

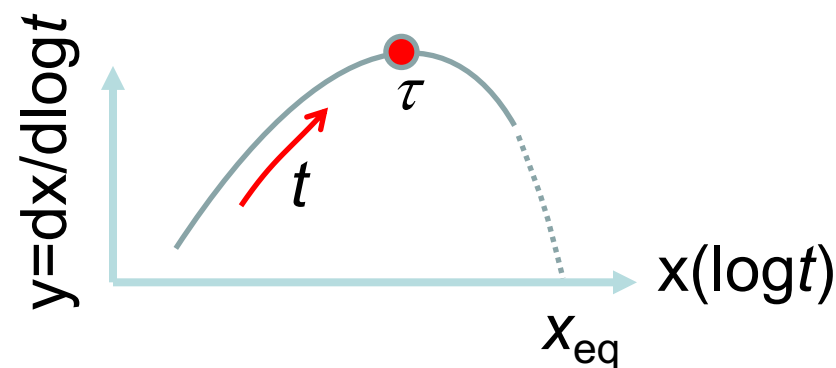
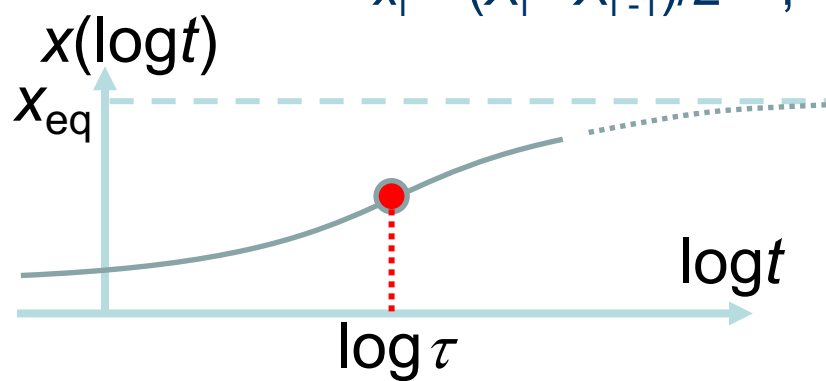
$$X_{i+1} - X_i < X_i - X_{i-1}$$

où les mesures X_i ont été prises à des instants t_i uniformément répartis sur une échelle log, par exemple:

$$t_1=1\text{h}, t_2=3\text{h}, t_3=8\text{h}, t_4=1\text{j}, t_5=3\text{j}, t_6=10\text{j}, t_7=1\text{ mois}\dots$$

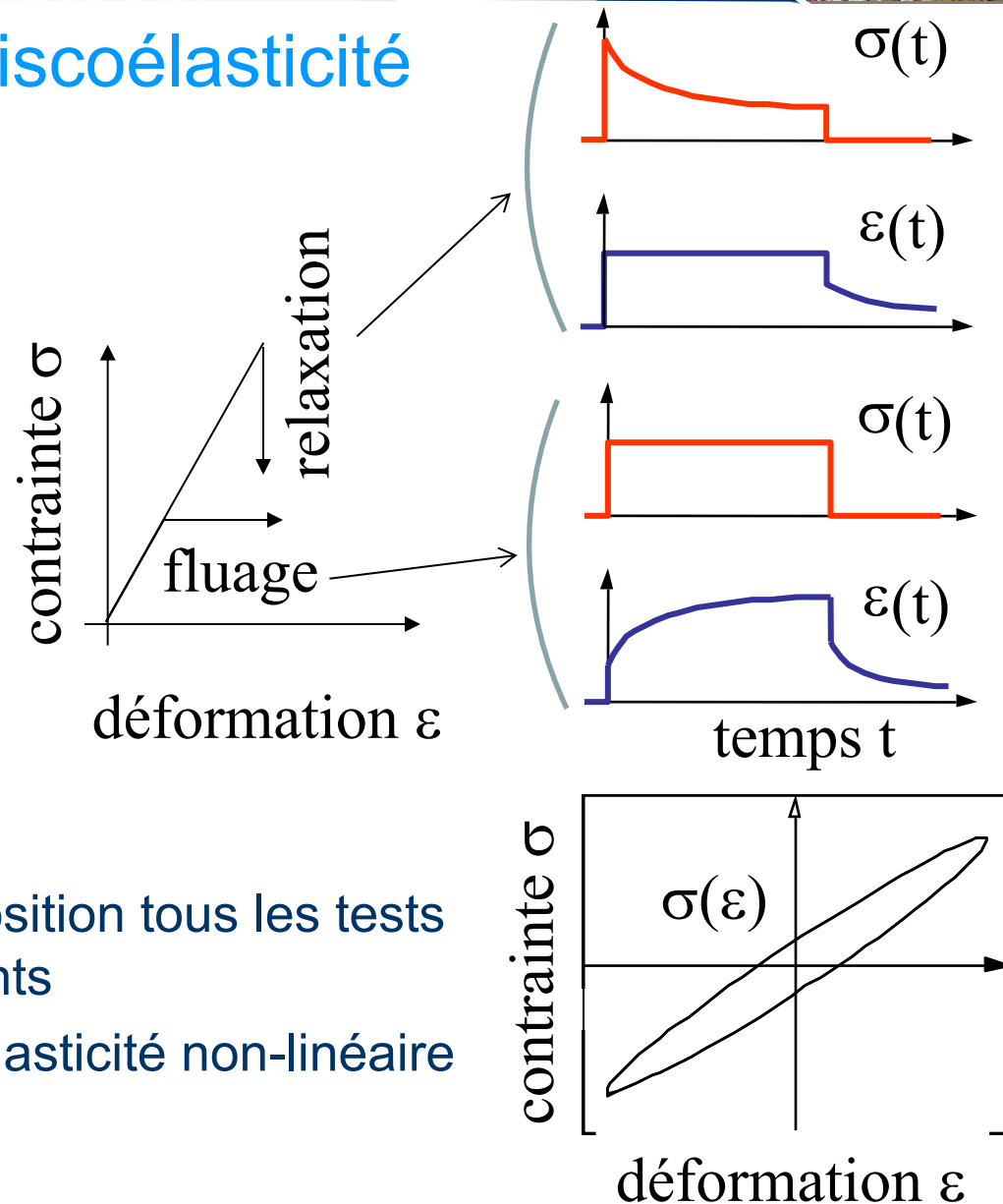
- Le tracé d'un **diagramme de phase** permet d'estimer temps caractéristique τ et valeur d'équilibre x_{eq} :

$$x_i = (X_i + X_{i-1})/2 \quad ; \quad y_i = (X_i - X_{i-1})/(\log t_i - \log t_{i-1})$$

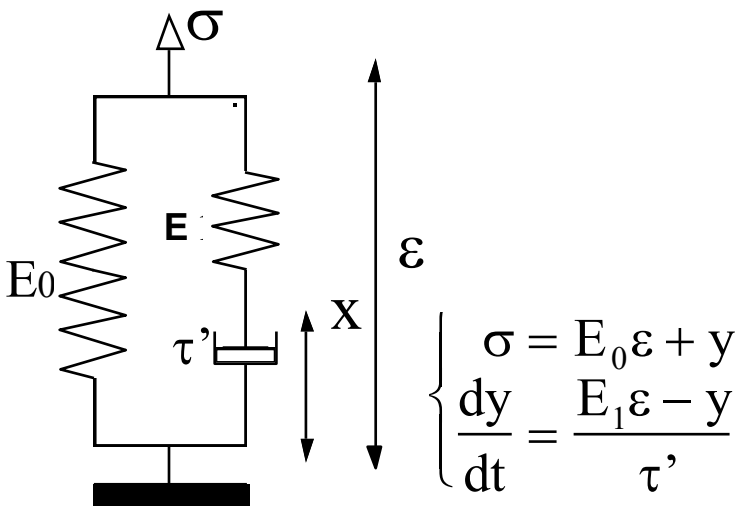
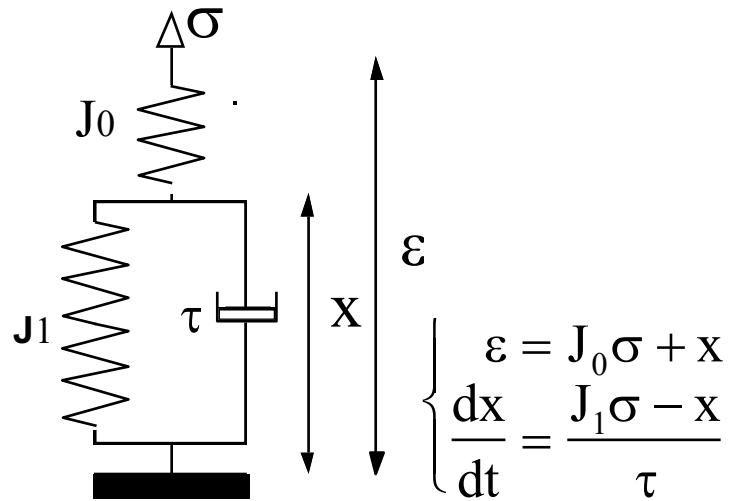


Phénoménologie de la viscoélasticité

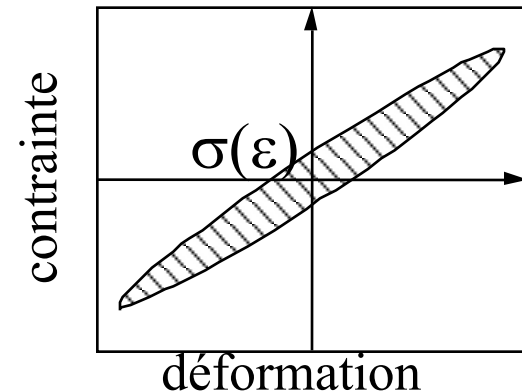
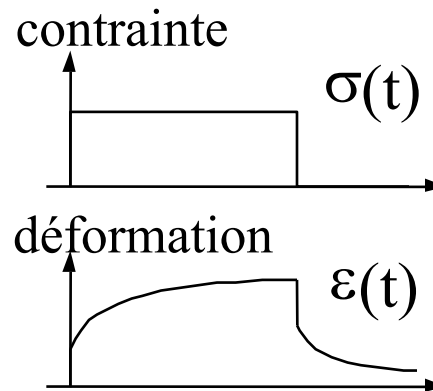
- Forme de comportement dépendant du temps
- Caractérisation expérimentale
 - statique: fluage, relaxation, recouvrance...
 - chargement cyclique
- Viscoélasticité “linéaire”
 - grâce au principe de superposition tous les tests sont théoriquement équivalents
 - cela n’est plus vrai en viscoélasticité non-linéaire



Représentations analogiques de la viscoélasticité



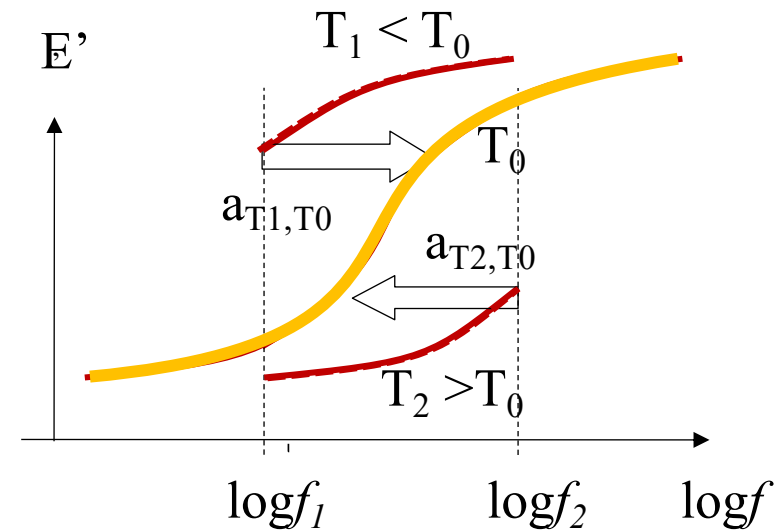
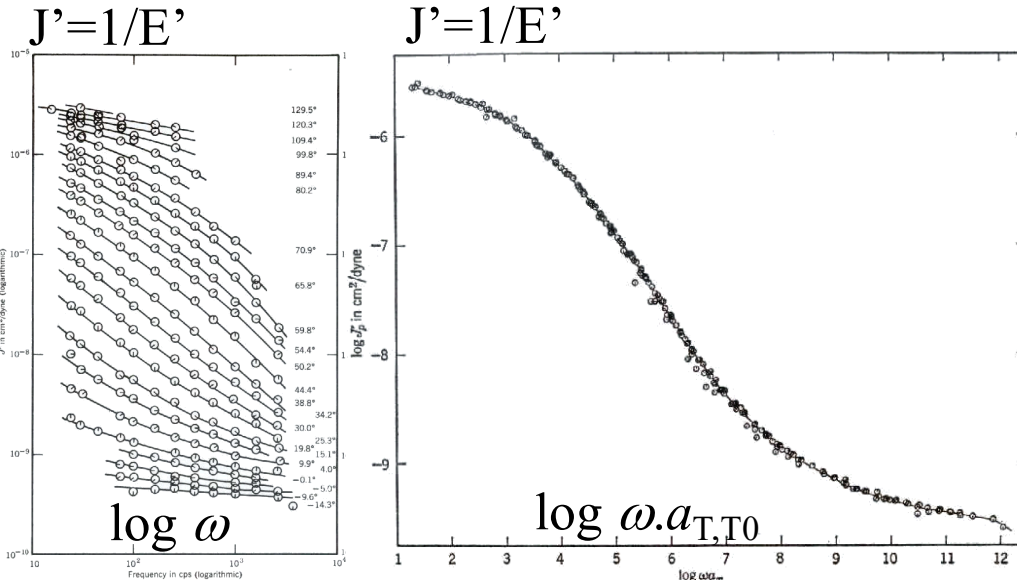
- “Modèle de Zener solide”
 - contient un unique processus viscoélastique du premier ordre
 - Le modèle le plus simple pour décrire un comportement viscoélastique solide
- Suffit à représenter :
 - complaisance/rigidité/recouvrance instantanée/différée ...
 - hystérésis lors d'un chargement cyclique



Viscoelasticité (hygro)thermo-activée

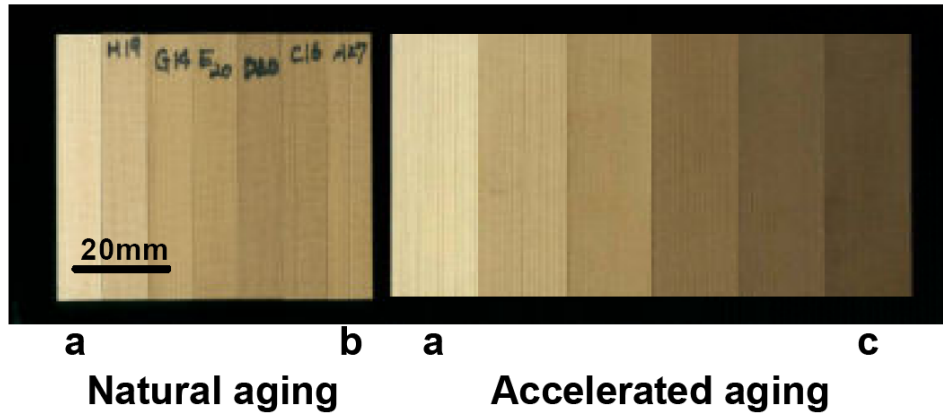
- Equivalence temps-température:
 - la glace coule lentement (glaciers)
 - *temps + long* \Leftrightarrow *+ chaud*
 - l'eau devient comme la neige (ski nautique)
 - *temps + court* \Leftrightarrow *+ froid*

- Dans un matériau polymérique, cette équivalence est utilisée pour élargir la “fenêtre expérimentale”

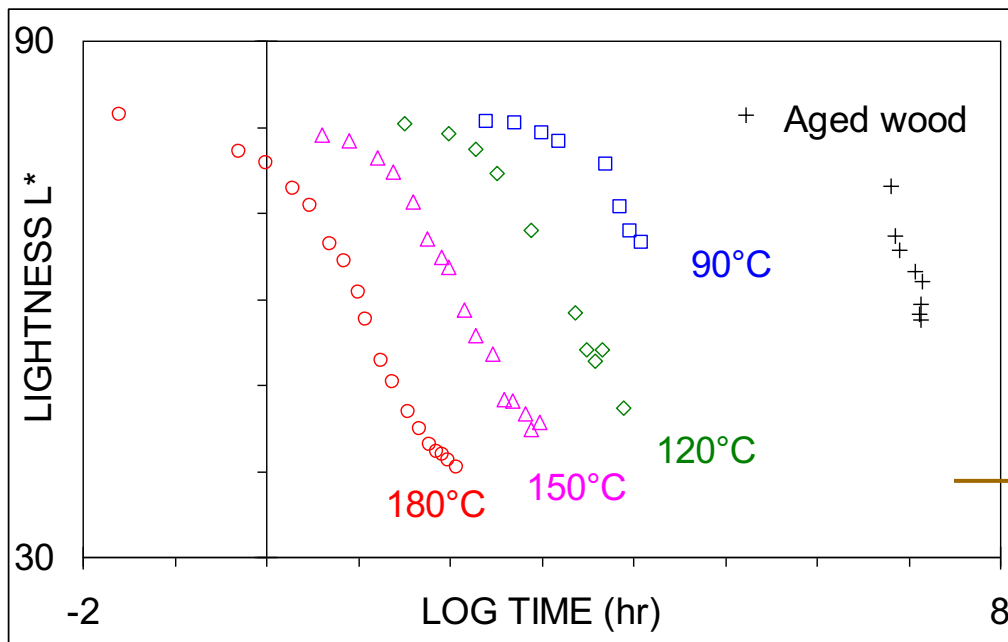


- une “courbe maîtresse” peut être construite par une série de translations horizontales

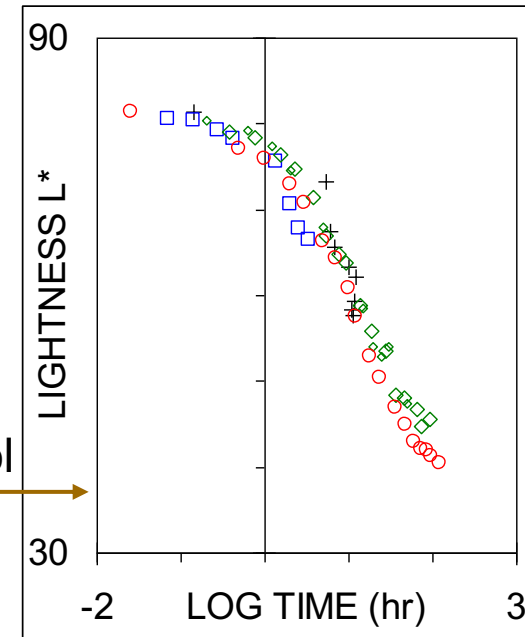
Effect of artificial / natural aging on colour



- a: control
- b: 1580 years natural aging
- c: 120hrs at 180° C



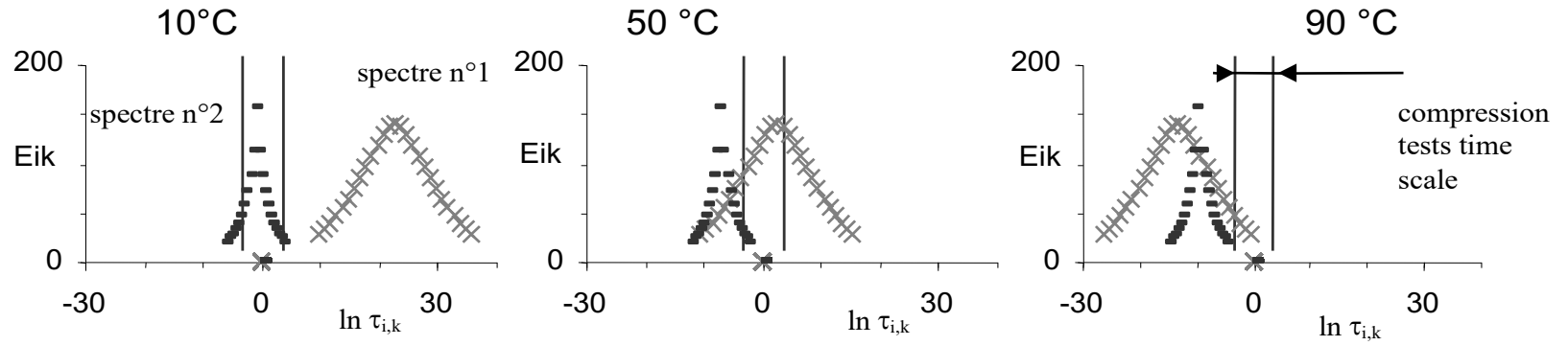
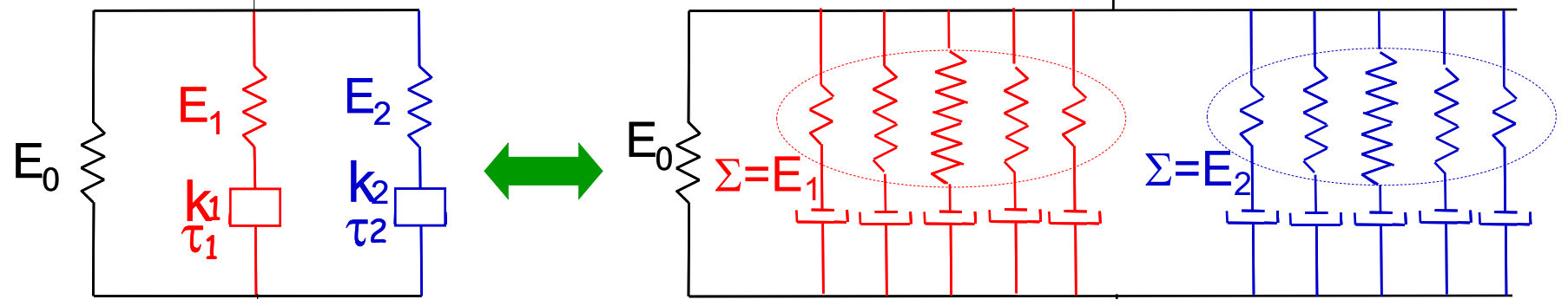
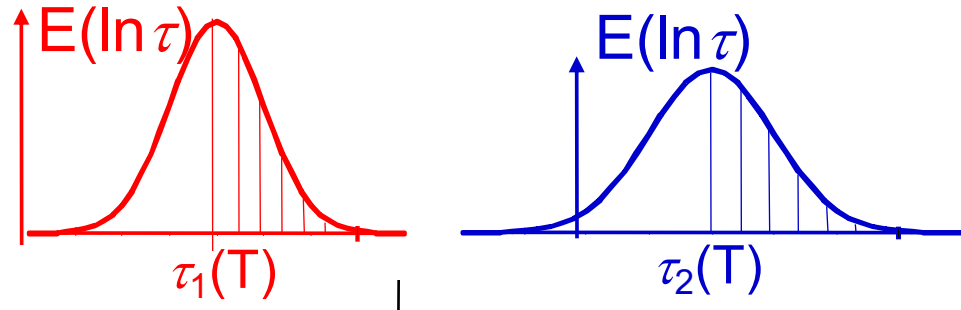
$E_a = 125 \text{ kJ/mol}$



- Time-temperature equivalence through kinetic analysis
 1500 years aging \approx 12 hrs 180°C \approx 1 week 150°C \approx 3 months 120°C

Multi-parabolic models

Both parabolic links have been replaced by equivalent generalized Maxwell, moving differently with temperature according to an Arrhenius law

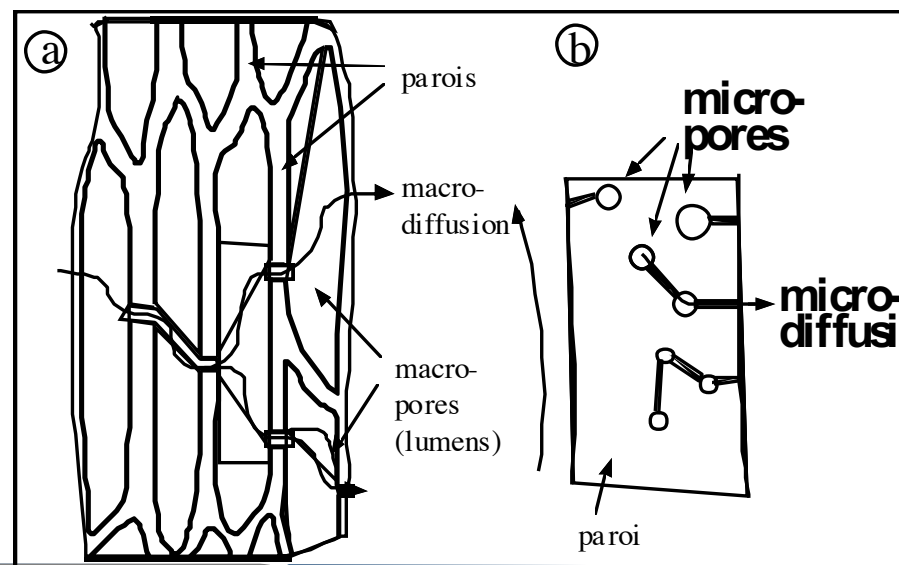


- Within the experimental window, overlapping of the relaxation spectra occurs at some temperatures

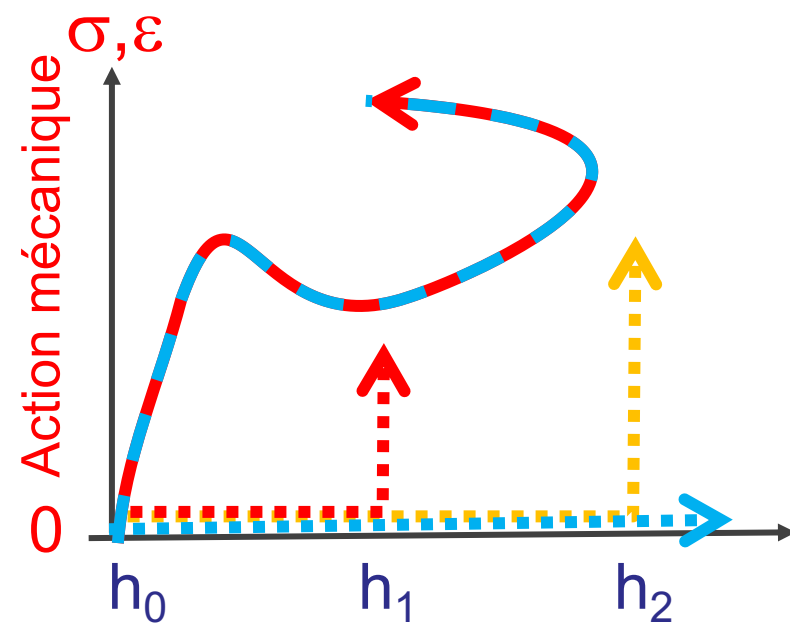
Couplage hygromécanique

Le couplage mécanosorptif

- mobilité moléculaire induite par la sorption
- expansion hydrique contrariée des constituants de la paroi
- lié à la micro-diffusion



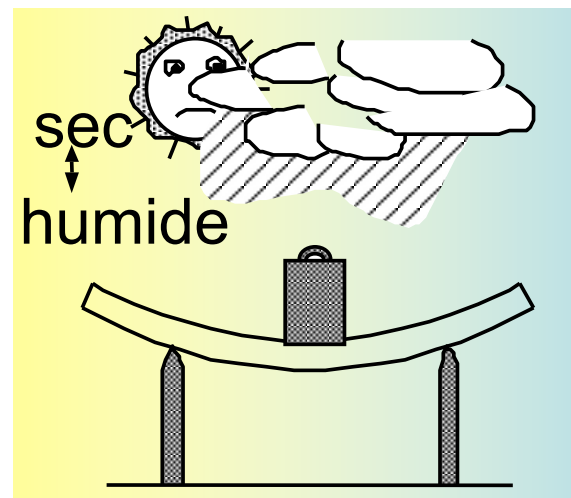
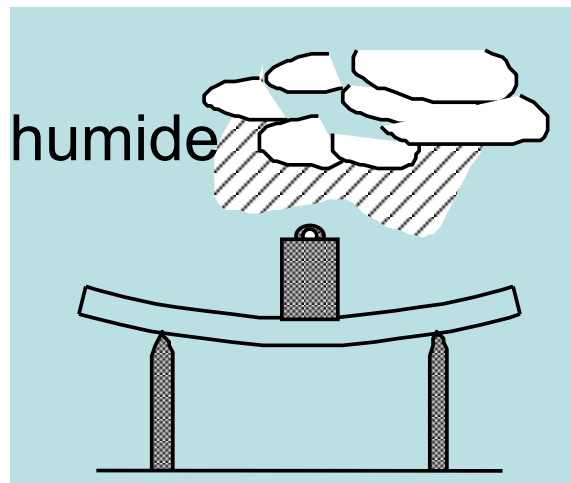
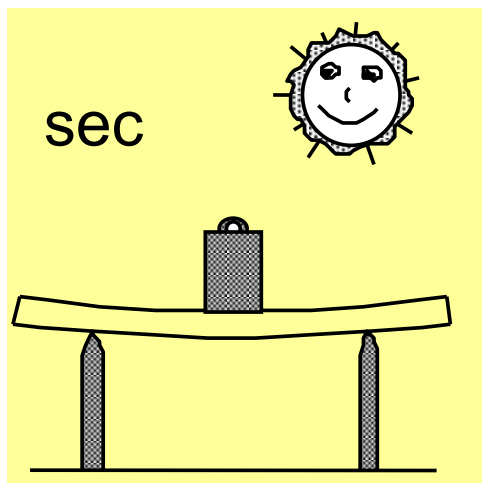
$$\varepsilon = S \cdot \sigma + \alpha \cdot \Delta h + \text{????}$$



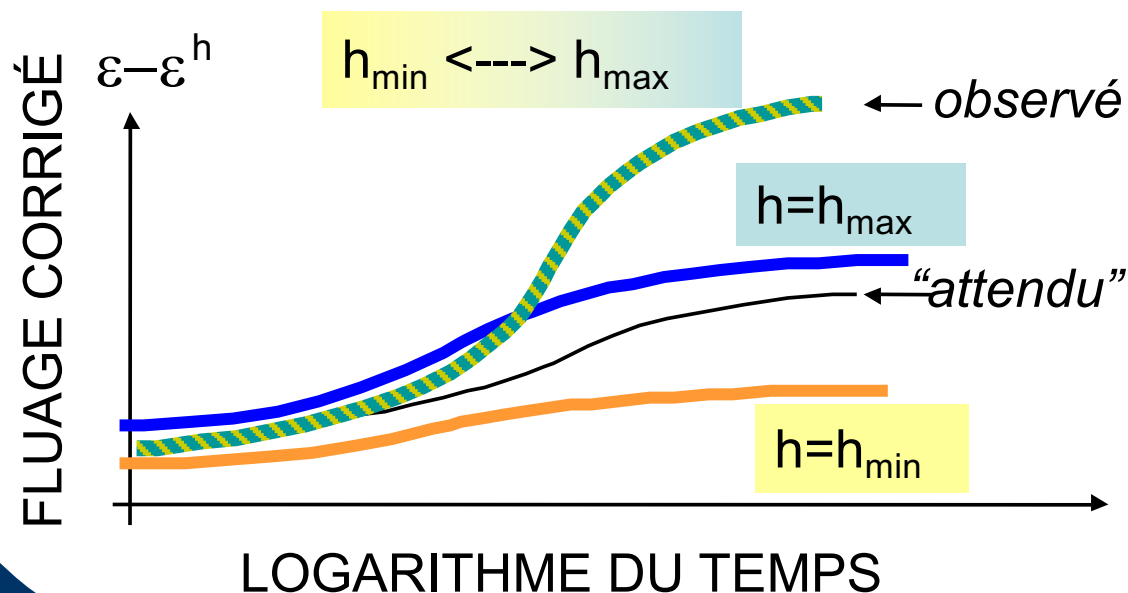
Taux d'humidité h

- Action mécanique à taux d'humidité variable
- Expansion hydrique modifiée par l'action mécanique

Fluage mécanosorptif

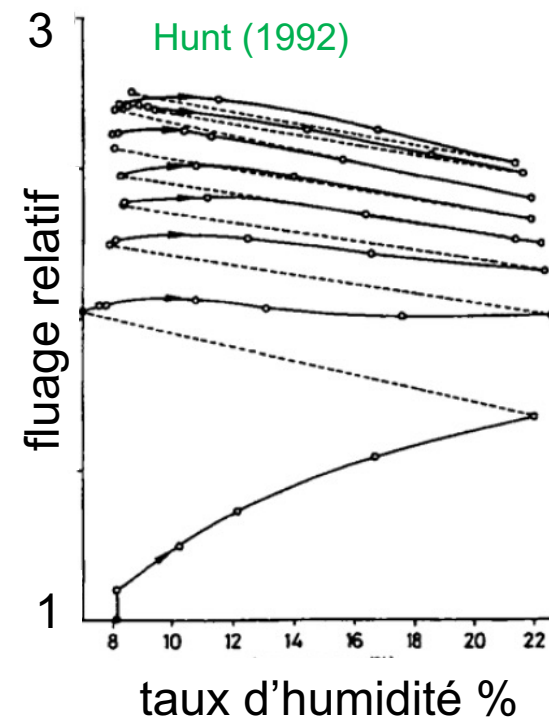
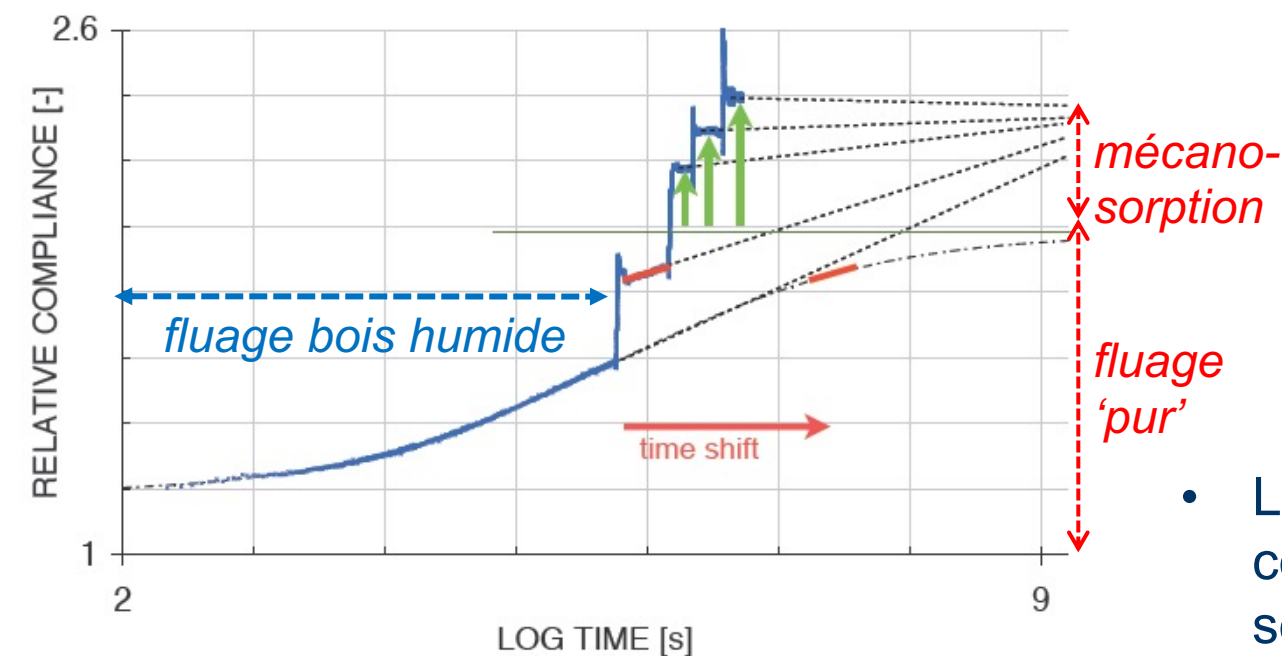


- Réponse mécanosorptive = différence entre réponse observée et 'attendue' d'après un calcul
- Les modèles **hygro-verrous** permettent de calculer cette réponse attendue



Réponse stationnaire et prédiction long-terme

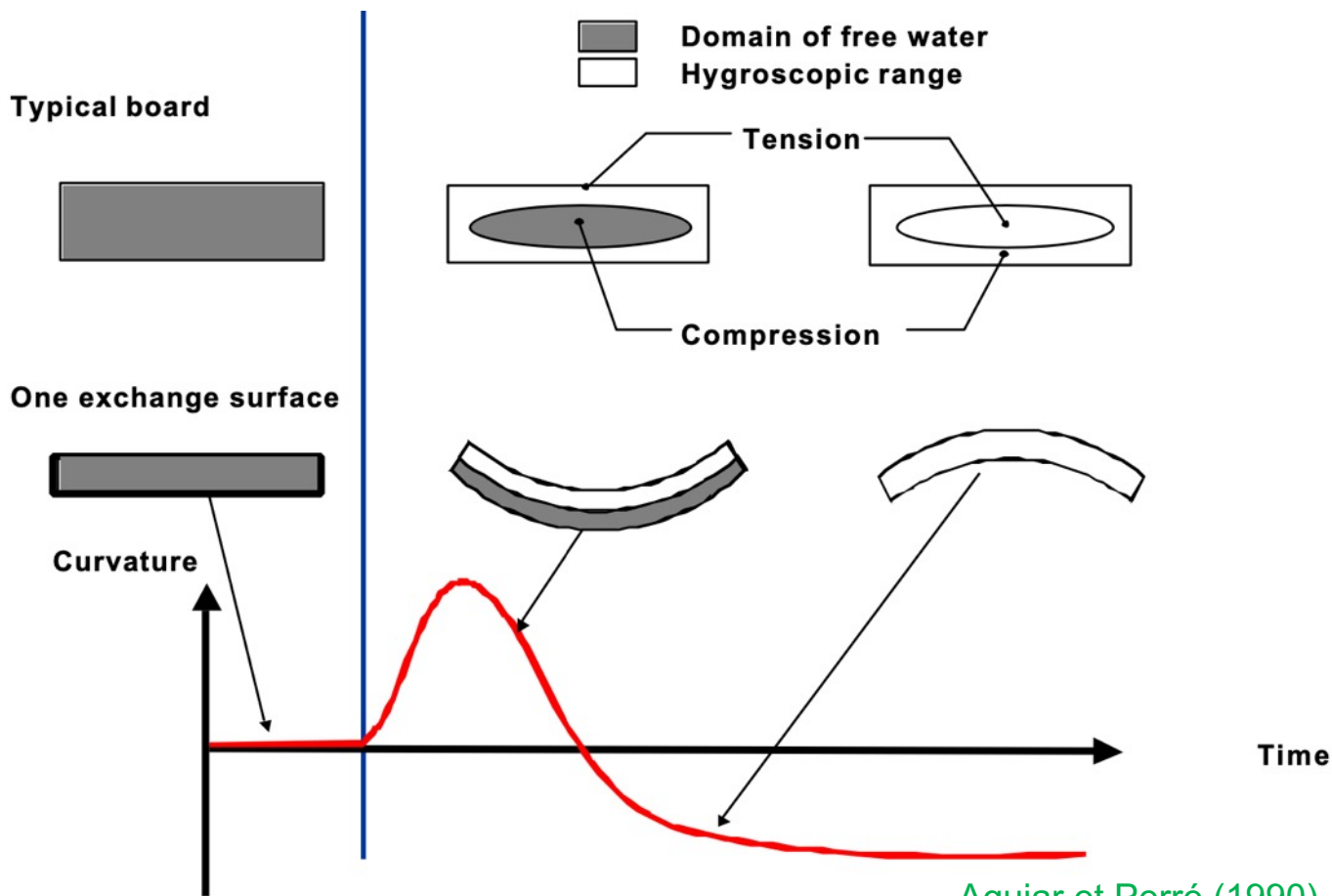
- Sous l'effet de cycles hydriques, la réponse en fluage converge vers une réponse réversible
- l'apparente décroissance du fluage ou « pseudo fluage » est expliquée par une modification du coefficient de gonflement



- L'estimation de la composante mécano-sorptive dépend de l'extrapolation du fluage

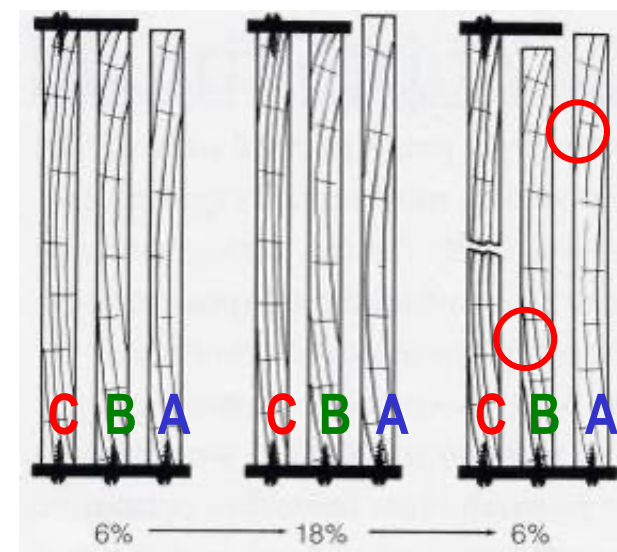
'Flying wood': inversion des contraintes au séchage

Séchage
symétrique
ou asymétrique
d'une planche



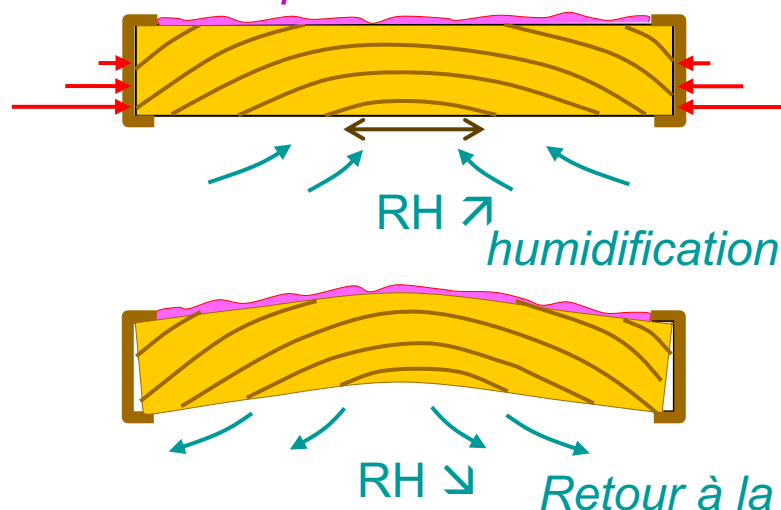
Tuilage des panneaux peints sur une seule face: fixation de la contraction (*compression set*)

- blocage en compression dans la direction transverse aux fibres (Hoadley 1995)



SEC → HUMIDE → SEC

reprise d'eau plus lente par la face peinte

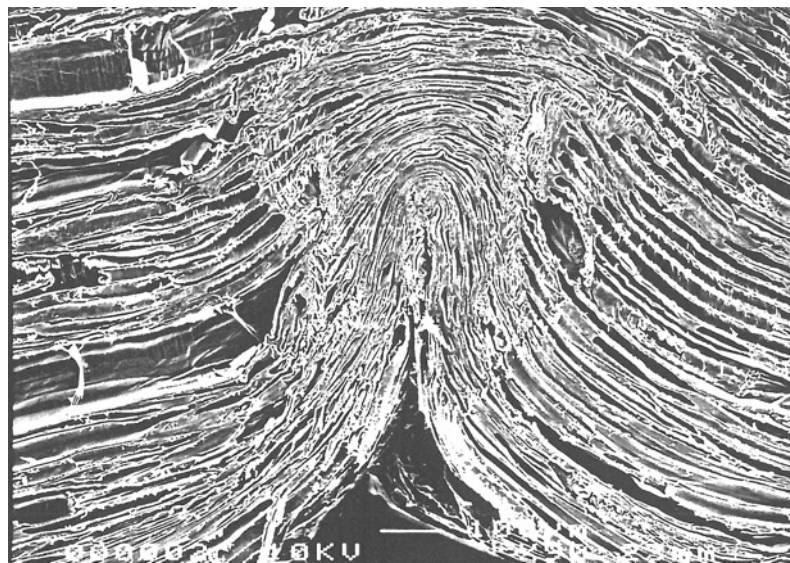


Gonflement empêché au revers
→ contrainte de compression
→ fixation de la contraction

Gradient de contraction fixée d'où tuilage permanent

- Dans un panneau peint:
 - L'asymétrie des mouvements du bois provoque un tuilage
 - La fixation de la contraction au revers induit le tuilage *permanent*
 - La restreinte partielle du cadre et des traverses peuvent provoquer des fentes

Mise en forme

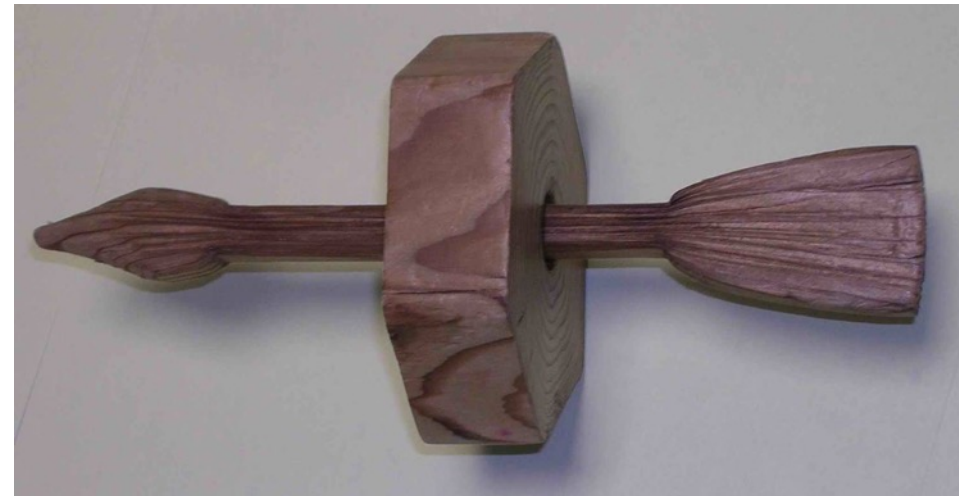


Pliage d'un placage – DEA E.Badel (1994)

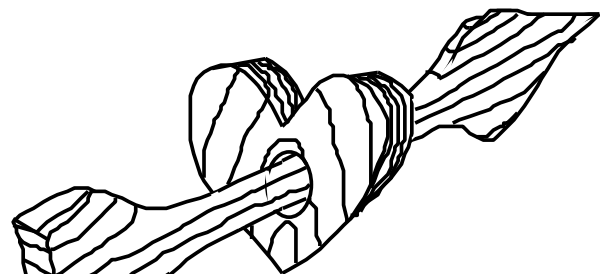
La mémoire du bois: les flèches de Cupidon



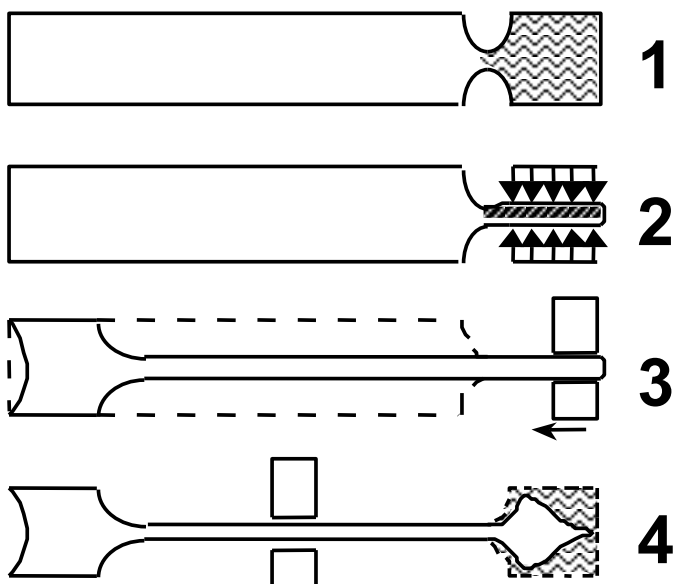
- 1ère génération - Inoue (1982)
 - 2 pièces de bois orientées différemment, pas de collage: seule la rhéologie du bois est impliquée → comment la flèche est-elle passée par le cœur ?
- 2ème génération - Tanahashi (2001)
 - sans enlèvement de bois dans la partie centrale
 - plus sophistiqué, car mettant en jeu de la modification chimique



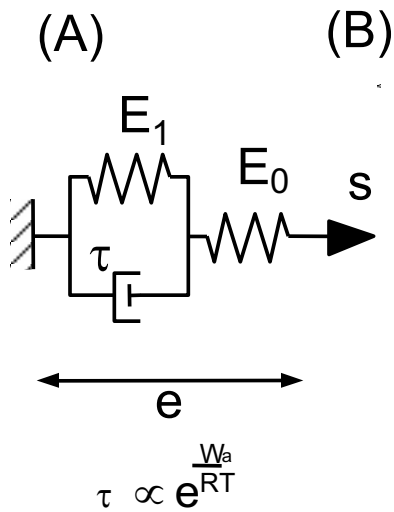
Recouvrance et réversibilité



Cupido's Arrow: Inoue et al. (1982)



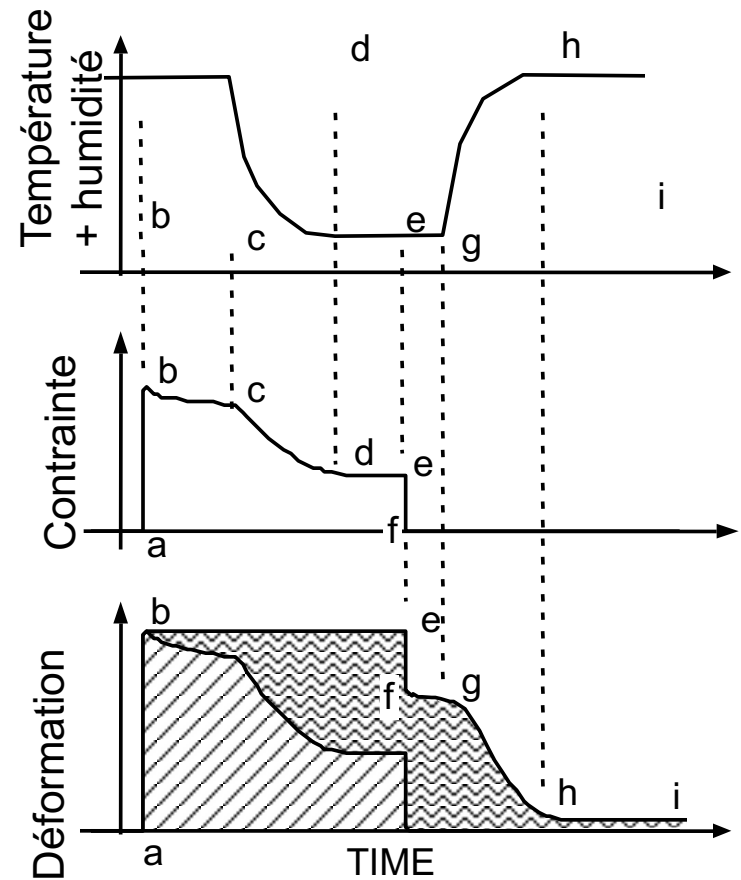
- Interpretation qualitative



$$\tau \propto e^{\frac{W_a}{RT}}$$

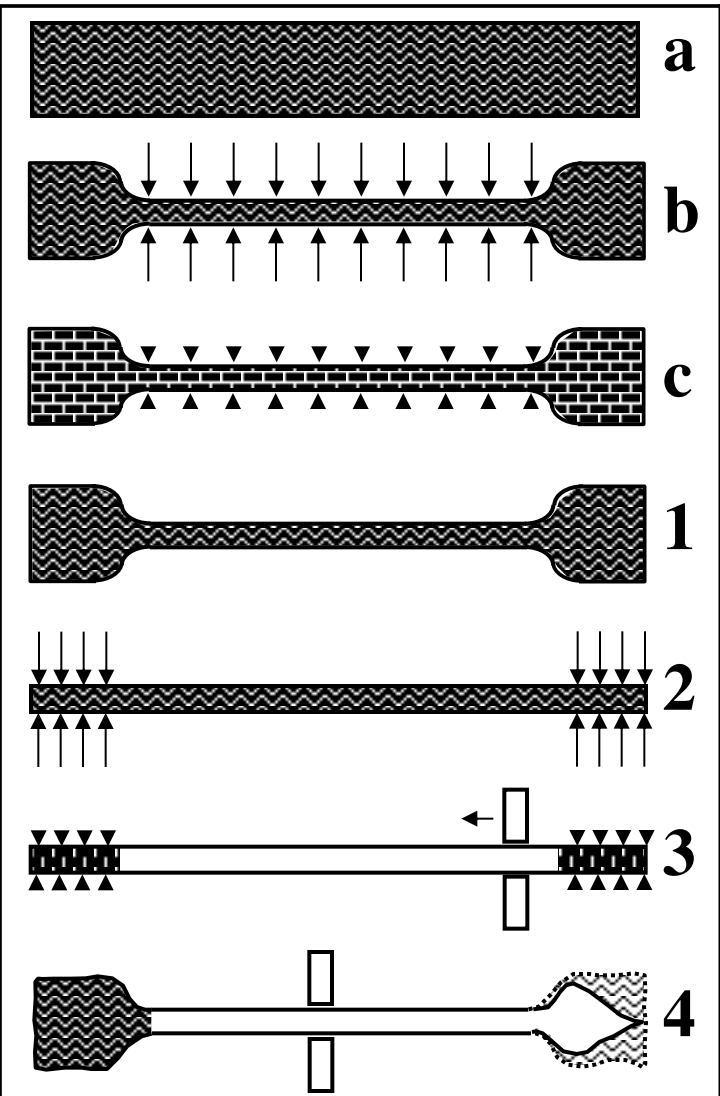
décomposition de la déformation :

- Elastique
- Viscoélastique



Traitements thermique et irréversibilité

Arrow, new style: Tanahashi (2001), Lausanne ESWM1 Conference



softening (wet, 100°C)

shaping

permanent (?) shape fixation by high-temperature hygrothermal treatment under restraint

softening (wet, 100°C)

shaping

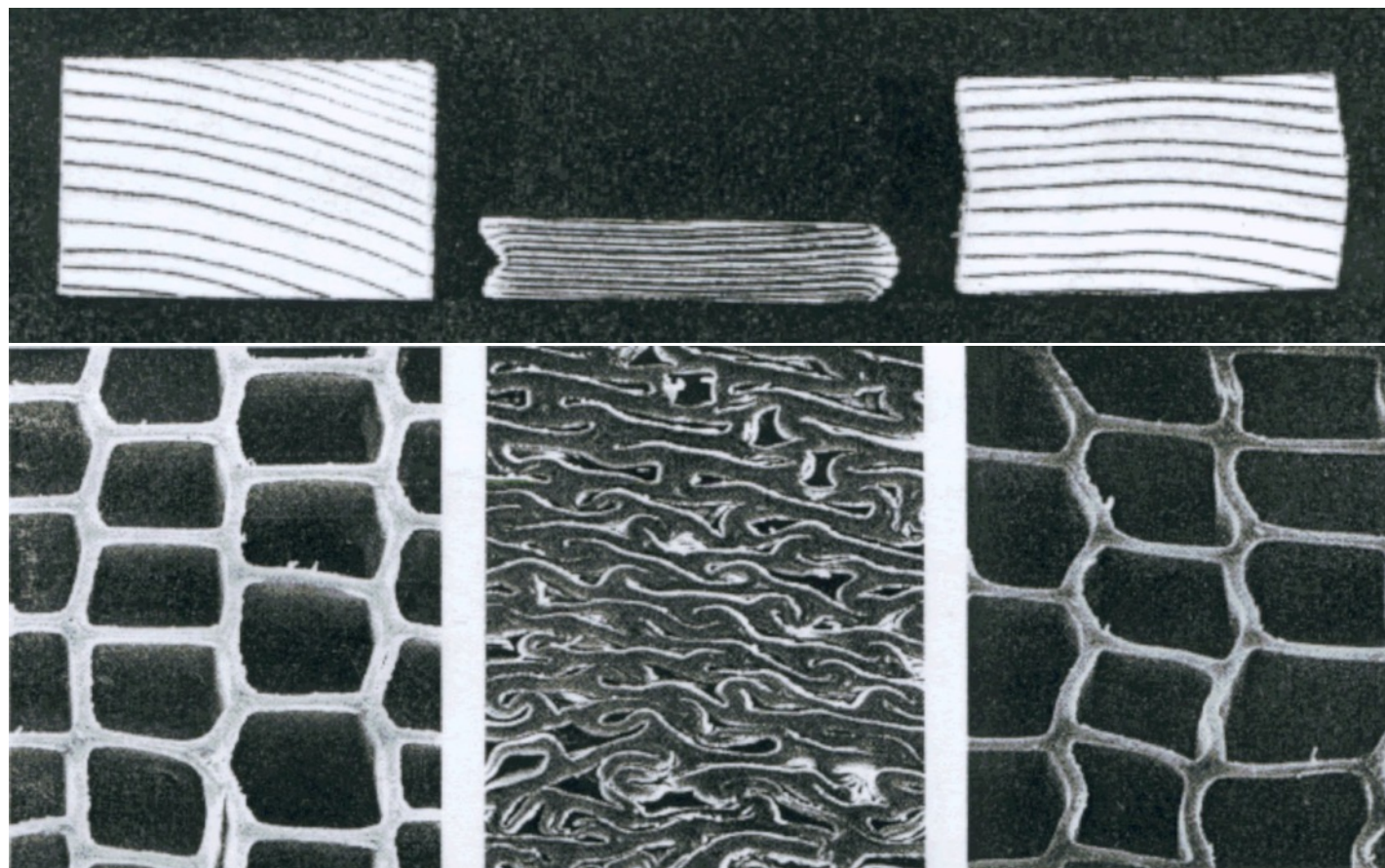
temporary shape fixation by over-drying (105°C) under restraint

hygrothermal recovery of temporary fixed portions

pretreatment

same as conventional wood shaping

Mise en forme et recouvrance



- à l'échelle du matériau

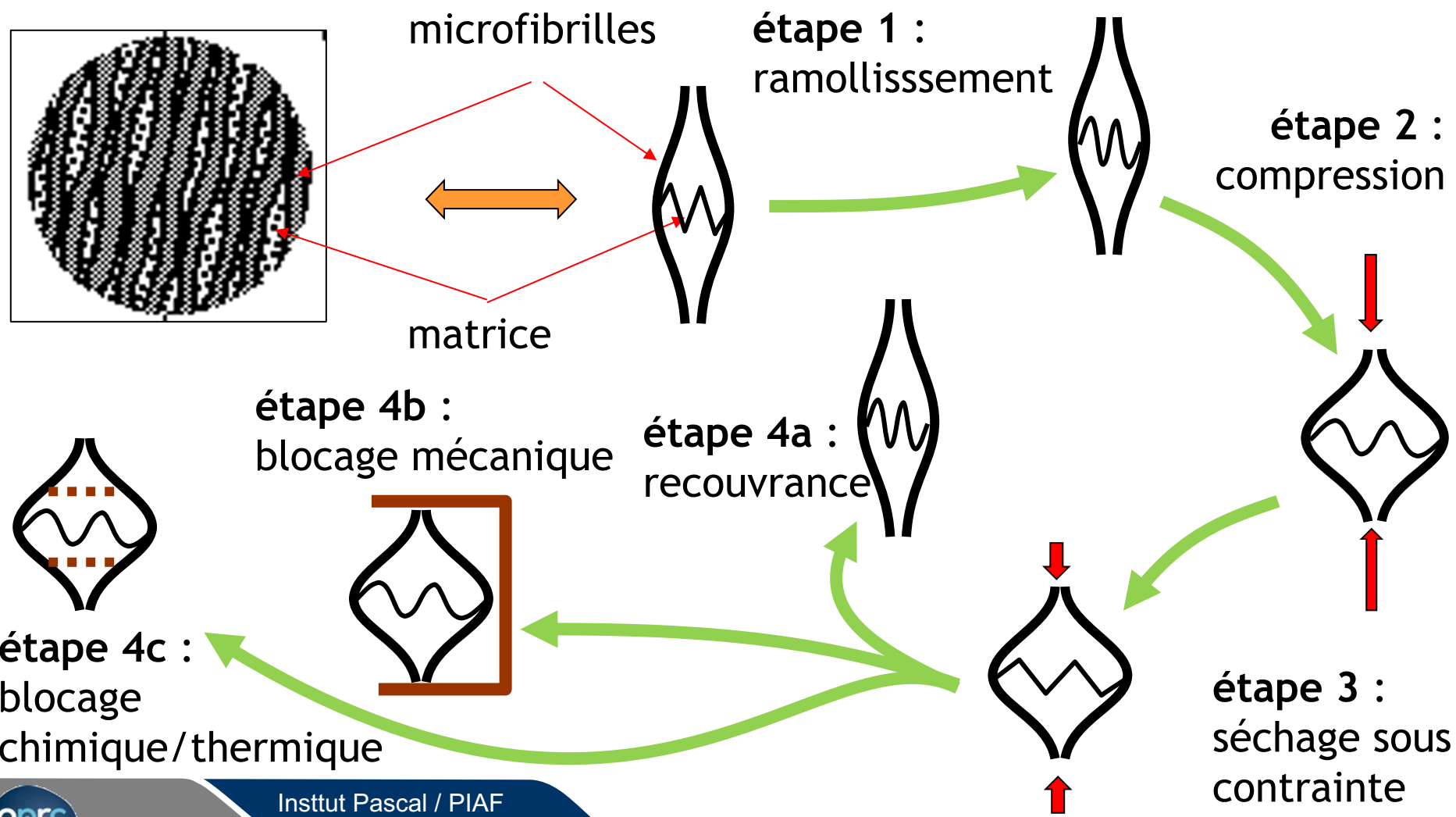
- à l'échelle du tissu

Initial

après compression
(chaud + humide)

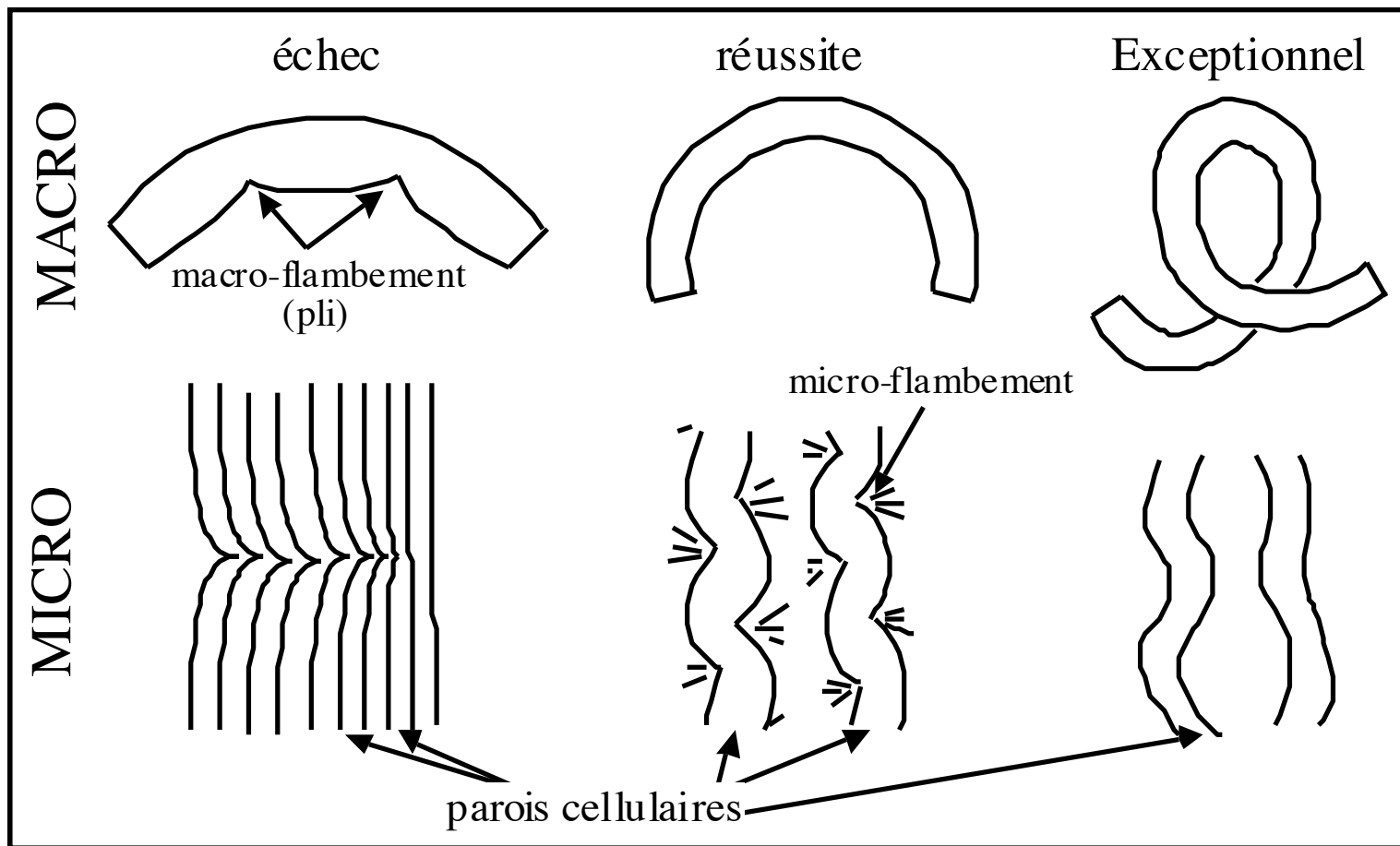
après recouvrance
(dommage +
contraction résiduelle)

Les étapes de la mise en forme à l'échelle moléculaire



Le cintrage

- comment courber un barreau en respectant le fil du bois?



Conclusion

- Pour appréhender le comportement multiphysique du bois, il faut tenir compte de toutes les échelles structurelles impliquées
- L'hygro-élasticité est suffisante pour interpréter de nombreuses situations: humidité à peu près constante ou contrainte mécanique faible
- Les processus cinétiques (sorption, viscoélasticité, vieillissement, modification chimique...) sont hygro-thermo-activés
- Le couplage hygromécanique intervient en cas de sollicitation mécanique à taux d'humidité variable. Mais en fait il intervient aussi à contrainte nulle, aux échelles structurelles inférieures du fait de l'expansion incompatible des constituants. L'état « libre » ne serait qu'un état stationnaire comme un autre
- La direction L domine très largement dès qu'elle est sollicitée. Les usages du bois respectant le fil (bois rond où à peine équarri, cintrage...) tirent le meilleur parti possible du potentiel du matériau.