

Master Class ESB, Nantes, novembre 2024

Mécanique - Diversité des comportements

Joseph Gril

Directeur de recherche CNRS émérite
Institut Pascal /PIAF, Clermont-Ferrand



INSTITUT
PASCAL
Association de l'Université et des Sciences



UCA
UNIVERSITÉ
Clermont
Auvergne

INRAE

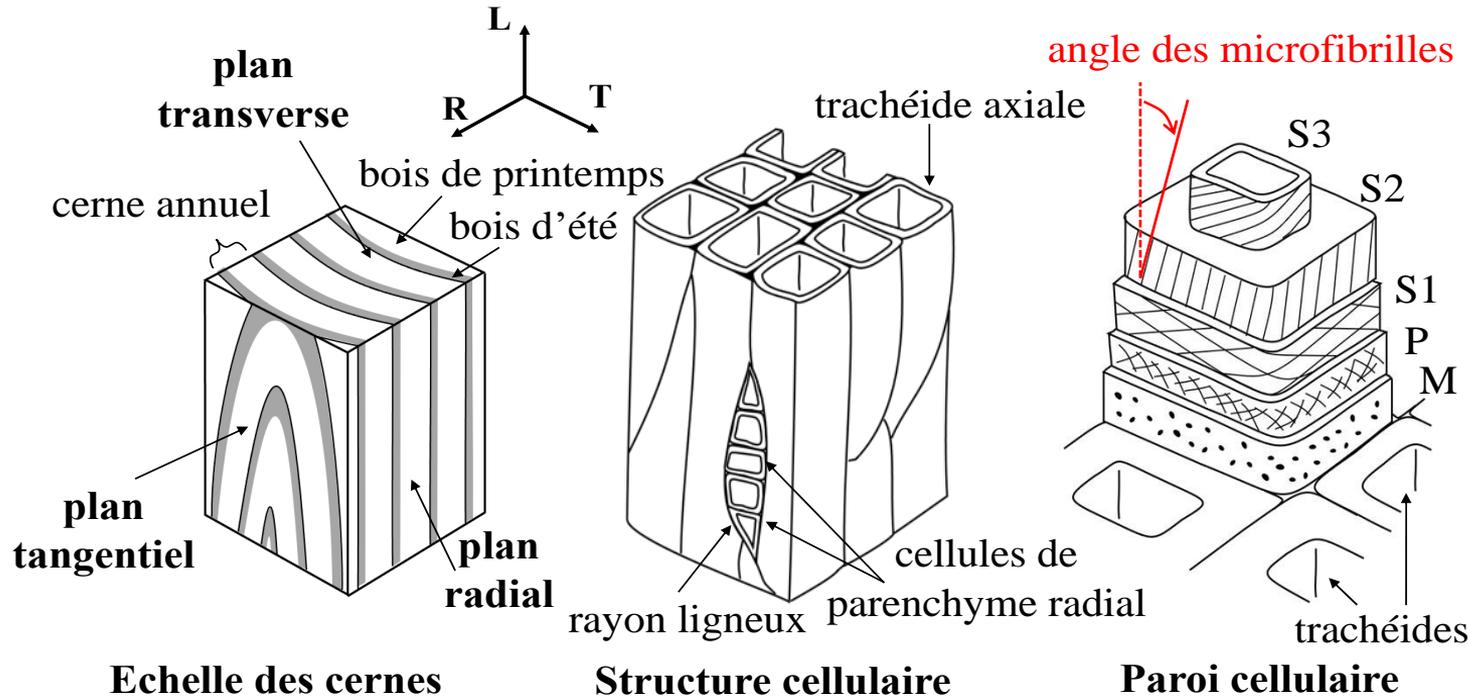


CONTENU

- L'anisotropie du bois
- Comportement dépendant du temps
- Un peu de biologie végétale

L'anisotropie du bois

Anisotropie mécanique : contribution imbriquée des échelles



$L \text{ et } T > R$ $L > R \text{ et } T + R > T$ $L > R \text{ et } T$

- 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 $R > T$

Lequel de ces carreaux de bois s'enfonce le plus sous l'action d'une pression donnée?



(A)

bois de bout



(B)

débit sur quartier



(C)

faux quartier

(D)

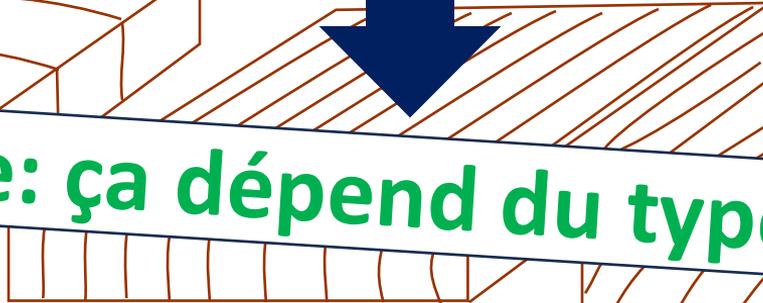
ne sais pas

?

Lequel de ces carreaux de bois s'enfonce le plus sous l'action d'une pression donnée?



Réponse: ça dépend du type de bois



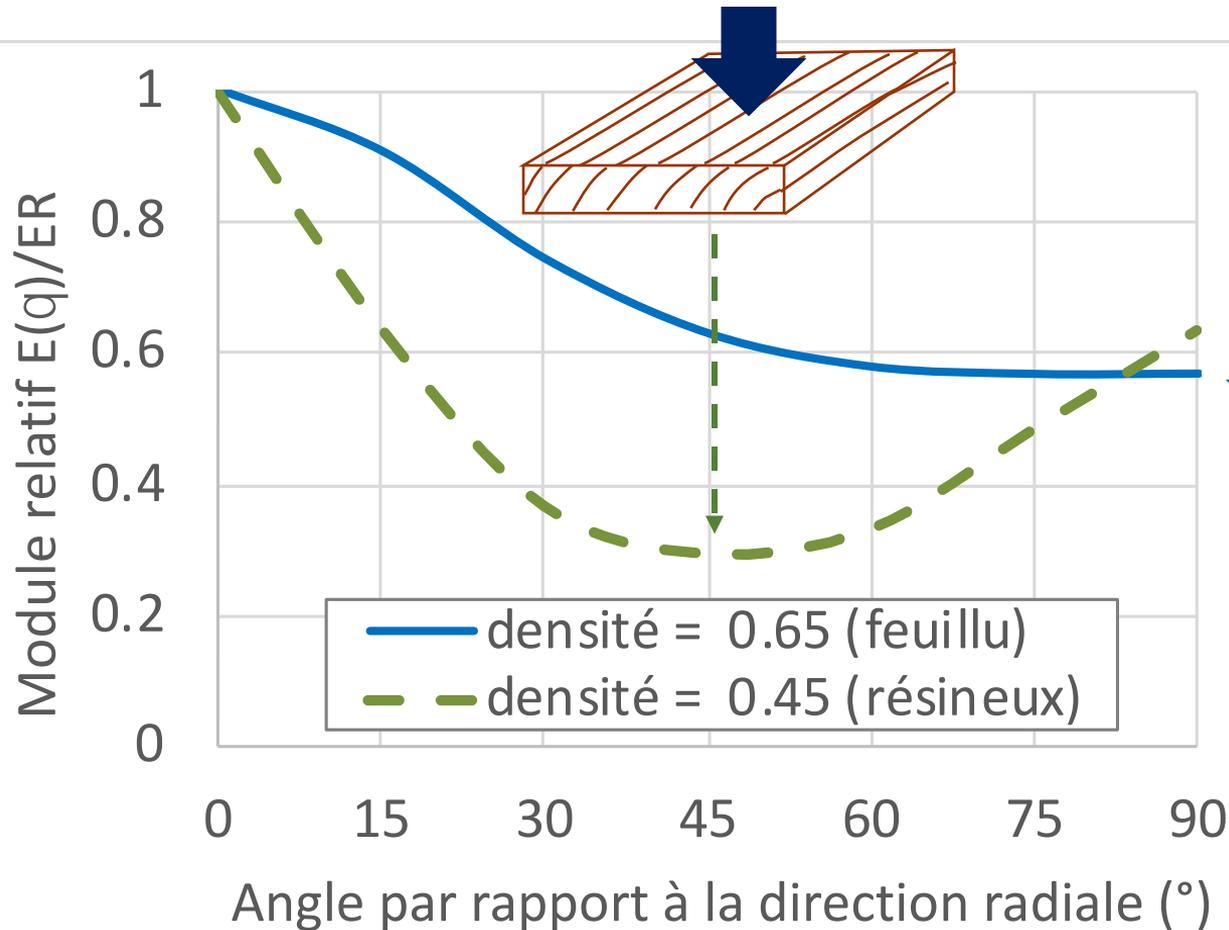
(A)
bois de bout

(B)
débit sur quartier

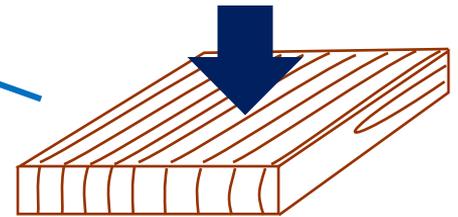
(C)
faux quartier

(D)
ne sais pas

(C) faux quartier pour un résineux



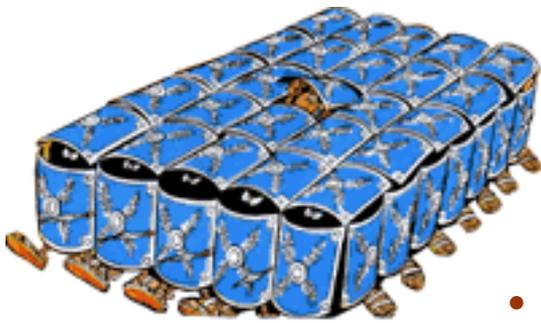
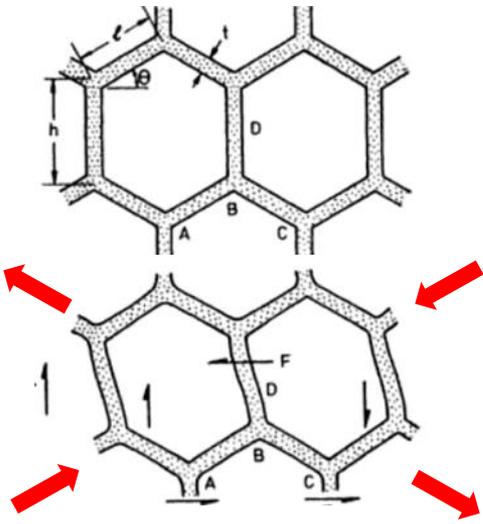
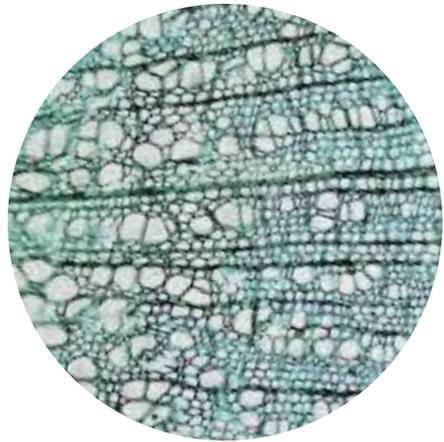
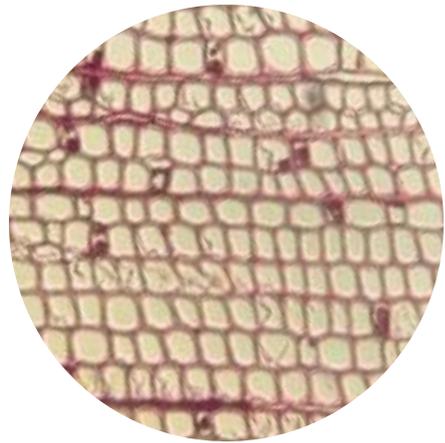
- Le cisaillement « roulant » (GRT) est particulièrement faible chez les résineux



(B) débit sur quartier pour un feuillu

D'où vient le faible module de cisaillement transverse des résineux?

- Les cellules des résineux sont trop bien rangées: quasiment toutes les parois sont soumises à de la flexion sous l'effet d'un cisaillement



- La complexité du plan ligneux des feuillus rend ce mode de déformation moins systématique

Le comportement dépendant du temps

Que veut dire par un 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

≈ réversibilité

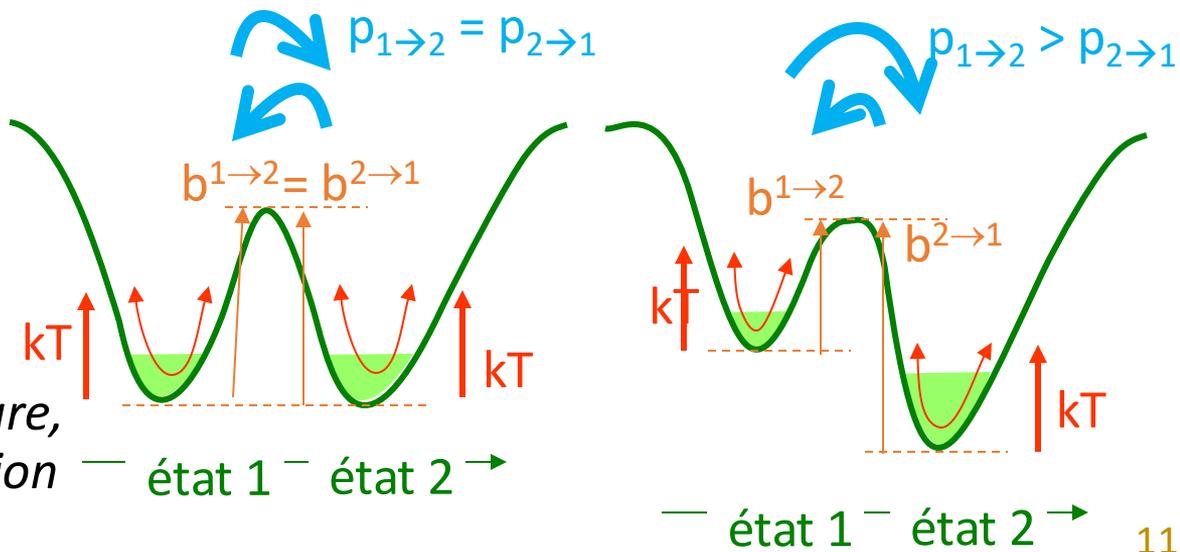
- Comportement (t):
- Les propriétés du matériau changent dans le temps, à cause:
 - des conditions environnementales (température, humidité...)
 - du chargement mécanique (endommagement...)
 - d'un processus chimique interne (dégradation, recristallisation, vieillissement chimique...)
 - ou tout couplage entre ces facteurs

≈ 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

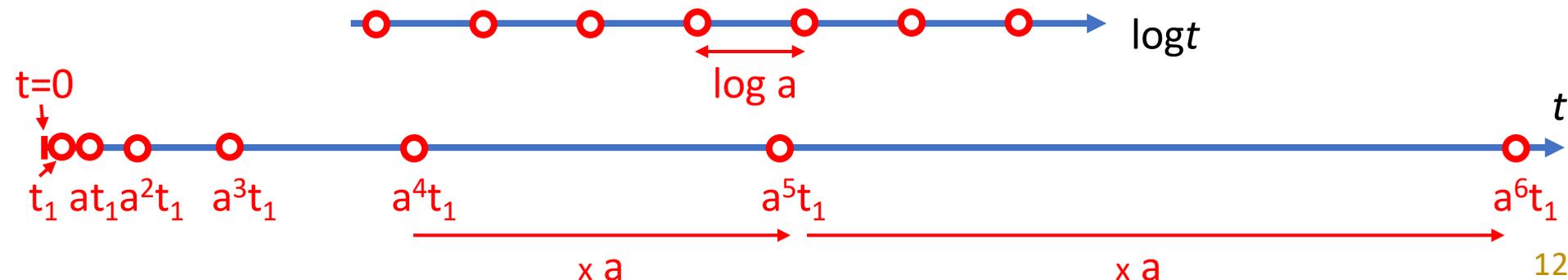
$$p_{1 \rightarrow 2} \propto \exp\left[-\frac{b^{1 \rightarrow 2}}{kT}\right]$$
$$= \exp\left[-\frac{N \times b^{1 \rightarrow 2}}{N \times kT}\right] = \exp\left[-\frac{B^{1 \rightarrow 2}}{RT}\right]$$



- *Sous l'effet d'une action extérieure, le système passe d'une distribution statistique d'états à une autre*

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:

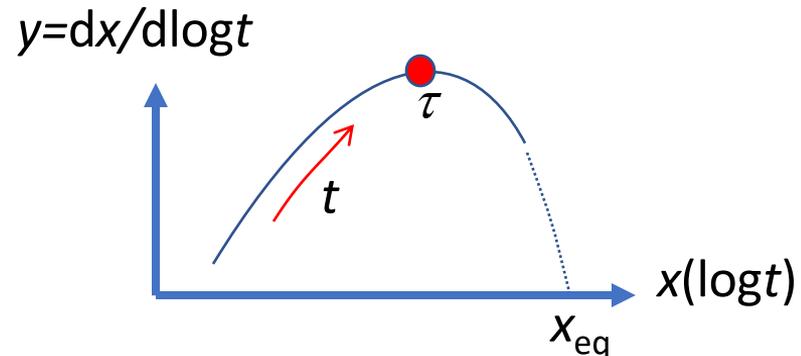
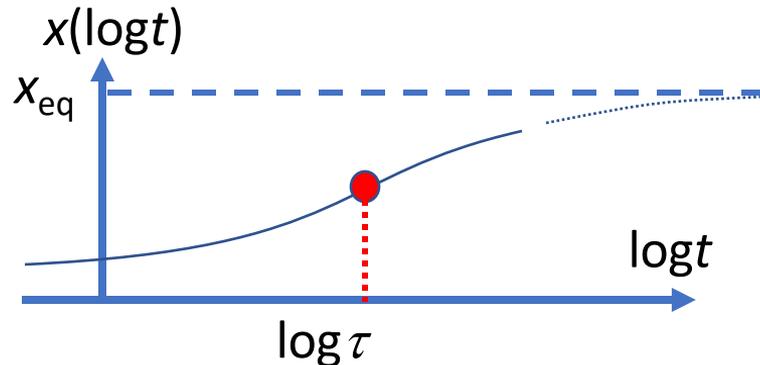
$$X_{i+1} - X_i < X_i - X_{i-1}$$

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

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

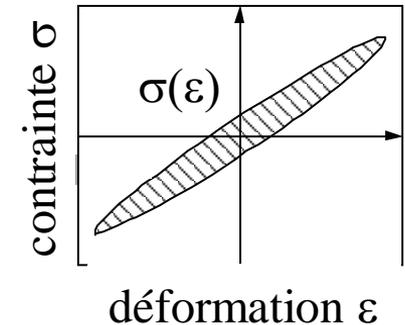
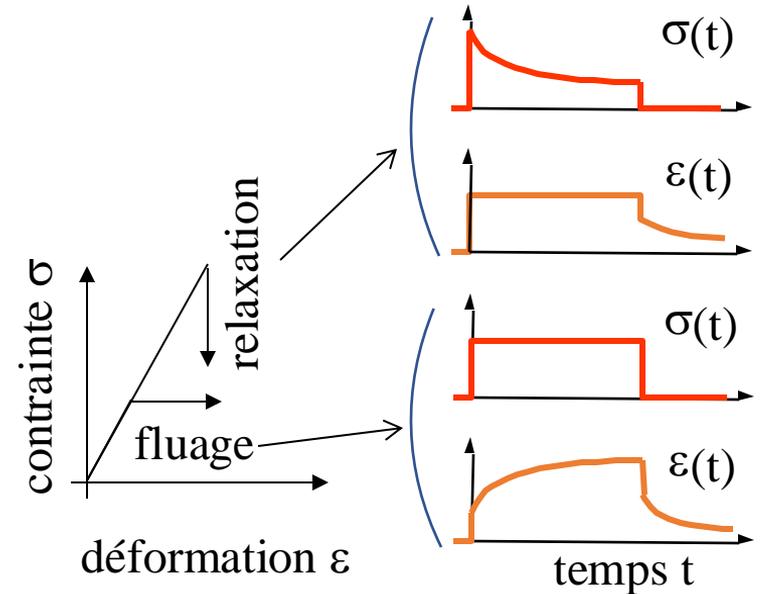
- Le tracé d'un **diagramme de phase** permet d'estimer temps caractéristique τ et valeur d'équilibre x_{eq} :

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

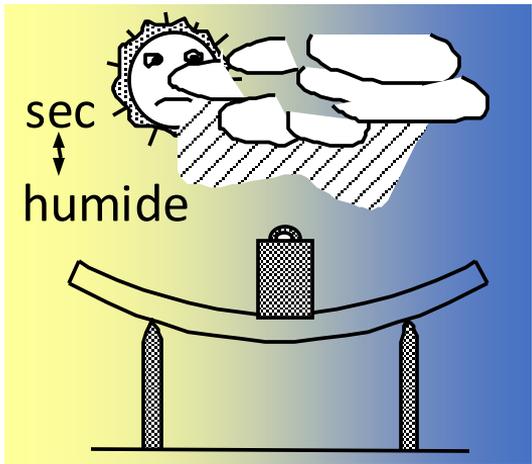
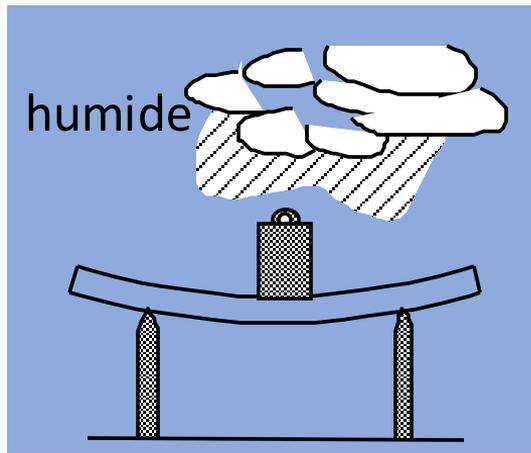
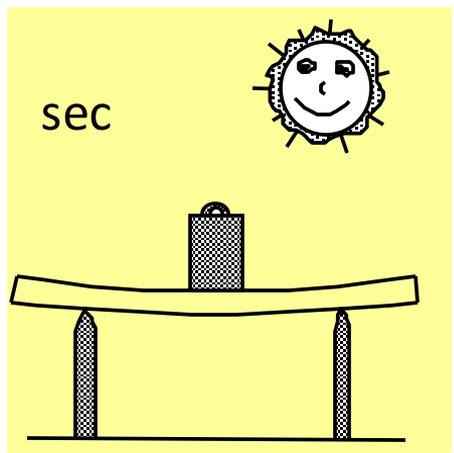


Viscoélasticité

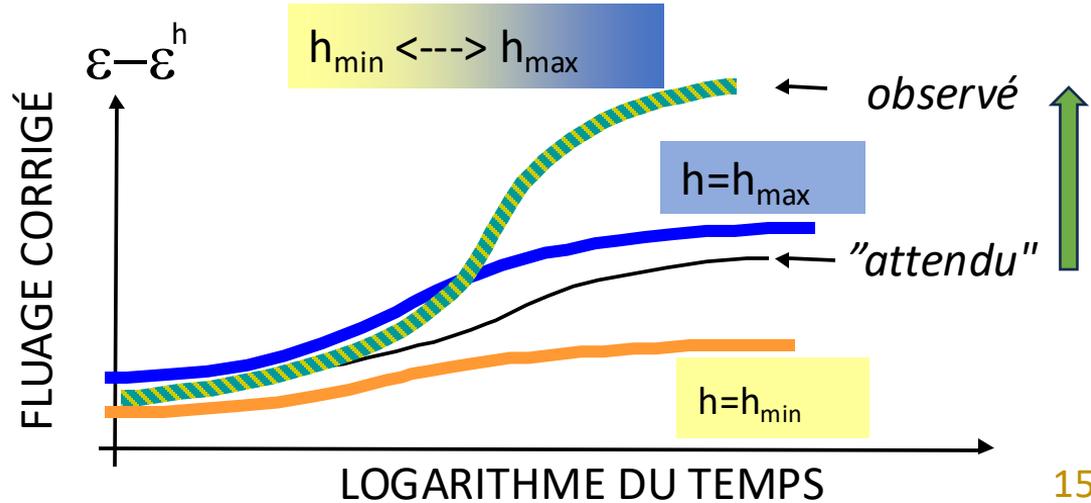
- Forme de comportement dépendant du temps
- Caractérisation expérimentale
 - statique: fluage, relaxation, recouvrance...
 - chargement cyclique
- Viscoélasticité “linéaire”
 - grâce au principe de superposition tous les tests sont théoriquement équivalents
 - cela n’est plus vrai en viscoélasticité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



Fluage mécano-sorptif



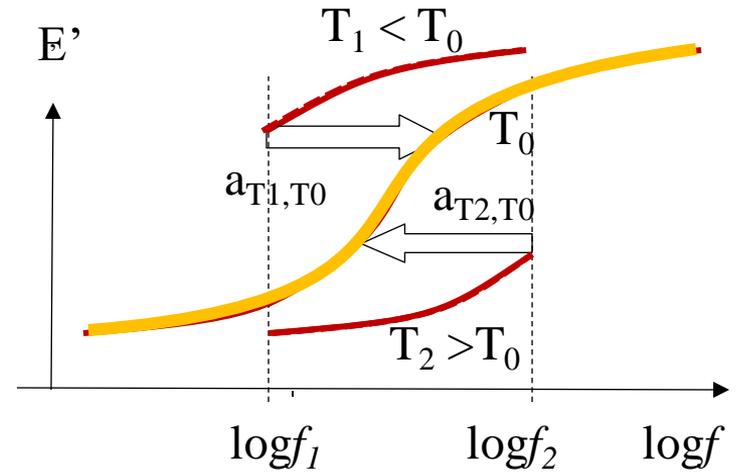
- Le fluage du bois sec est modéré, surtout dans la direction L
- Il est d'autant + important que le bois est + humide et + chaud
- Et encore + lorsque l'humidité varie : c'est la **mécanosorption**



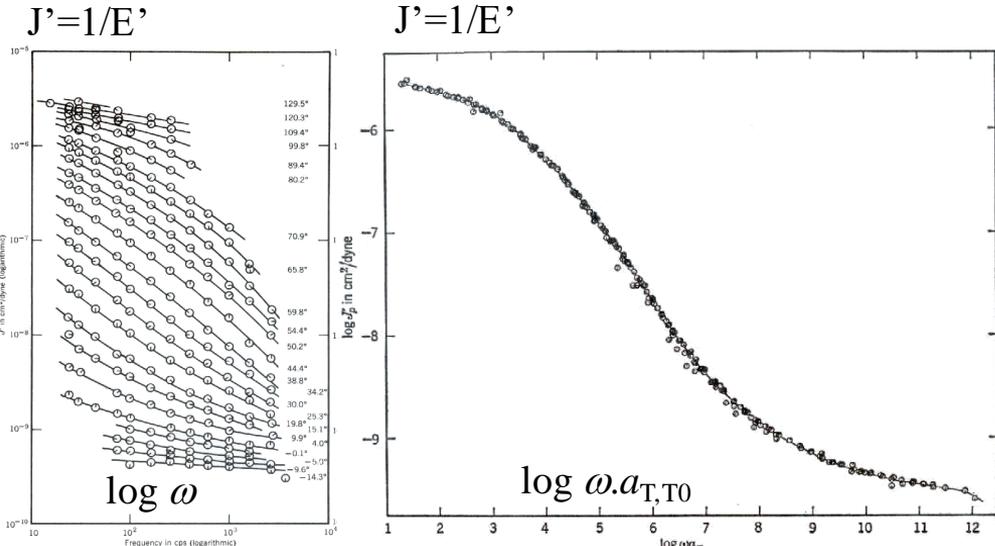
Viscoelasticité (hygro)thermo-activée

- 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"

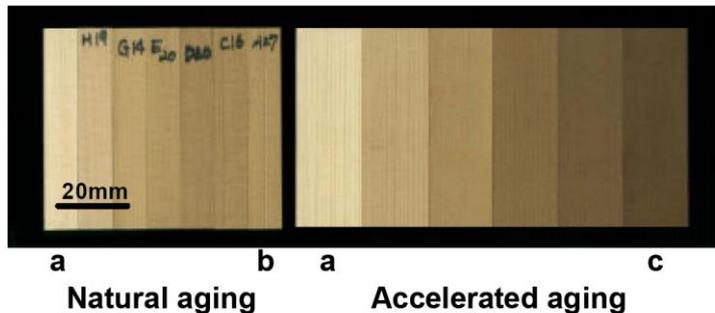


- une "courbe maîtresse" peut être construite par une série de translations horizontales



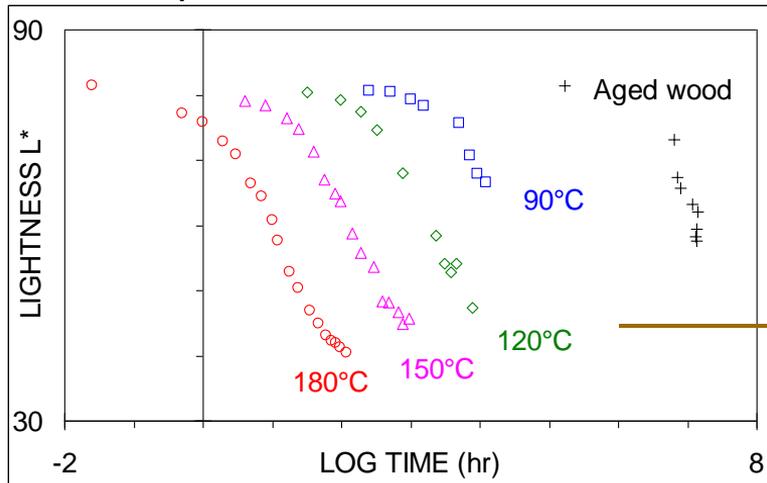
Effet du vieillissement naturel et artificiel sur la couleur

- Les propriétés de Cyprès du Japon provenant de temples bouddhistes sont comparées à celle d'un équivalent moderne, soumis à des traitements thermiques

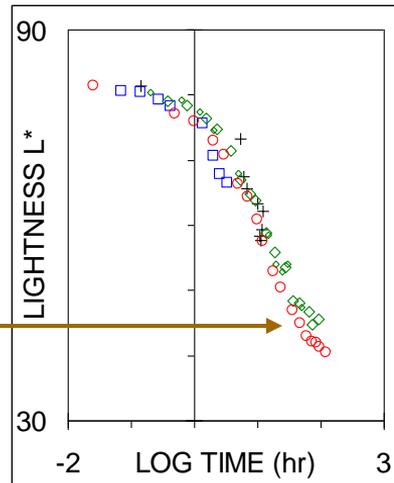


Matsuo et al (2011)

- a: contrôle: bois actuel, non traité
- b: 1580 ans, vieillissement naturel
- c: 120h à 180°C

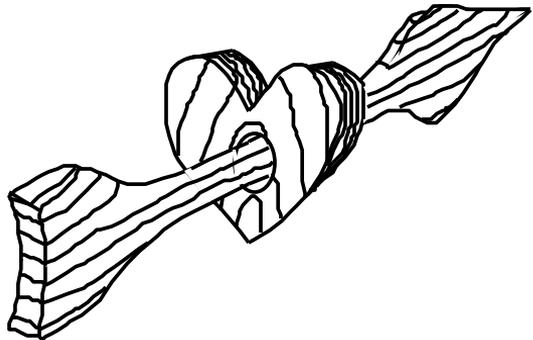


Energie
d'activation
= 125 kJ/mol



*Obtention d'une
'courbe maîtresse' à
180 °C, intégrant le
cas du vieillissement
naturel*

- Équivalence temps-température par analyse cinétique
1500 années à température ambiante \approx 3 mois à 120°C \approx 1 semaine à 150°C \approx 12 h à 180°C



Comment la flèche est-elle entrée dans le cœur ?



(A)

c'est taillé
dans la masse

(B)

le bois a été
compressé

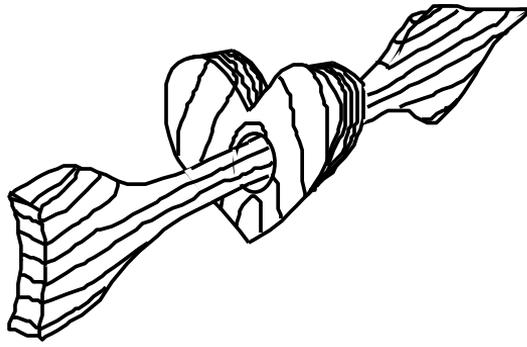
(C)

le bois a été
tendu

(D)

je ne
sais pas

?



Réponse: la pointe a été compressée



(A)

c'est taillé
dans la masse

(B)

le bois a été
compressé

(C)

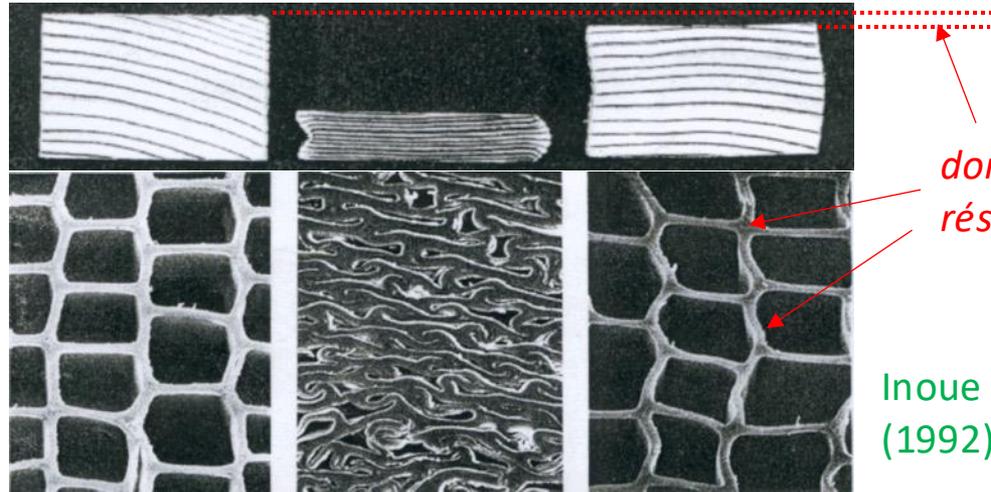
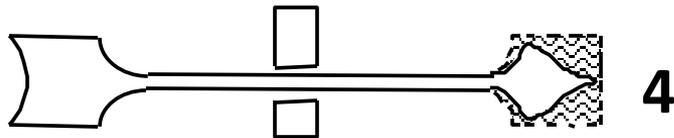
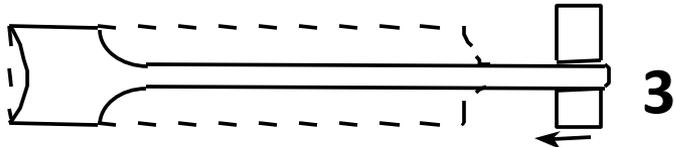
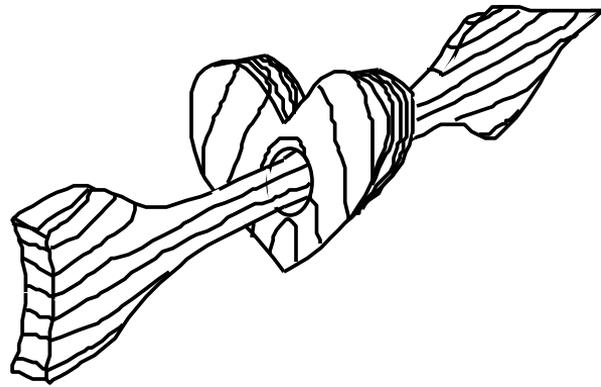
le bois a été
tendu

(D)

je ne
sais pas

La “flèche de Cupidon”

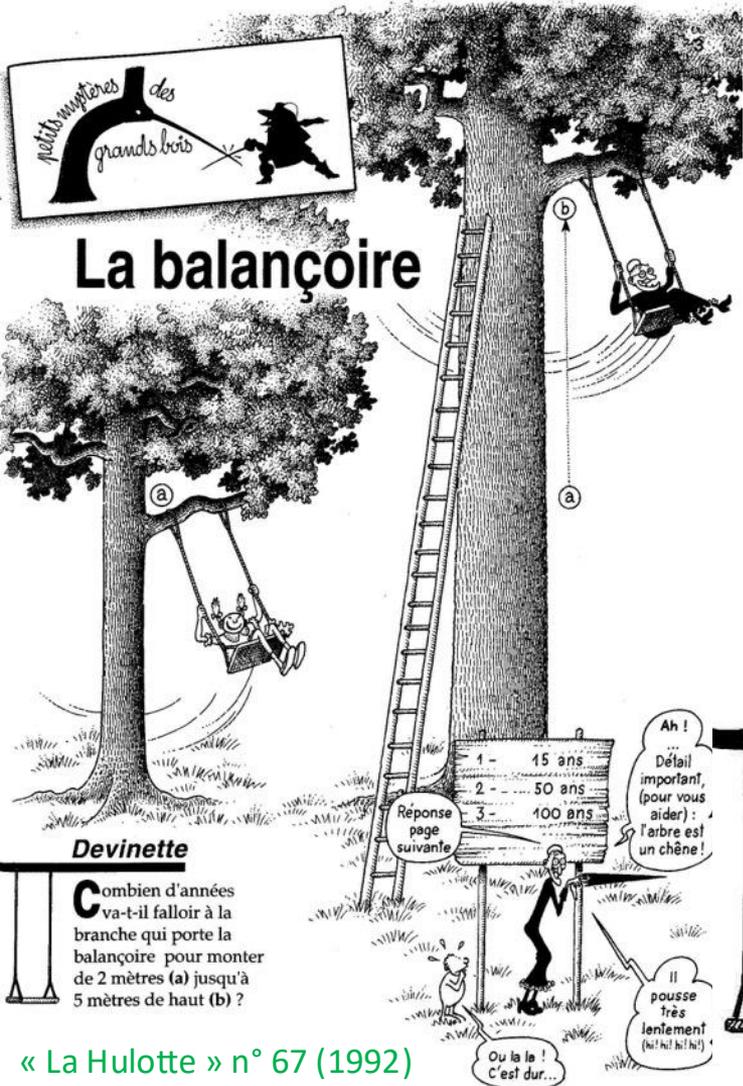
- (1) Extrémité de la planche **ramollie** par trempage dans l’eau bouillante
- (2) Extrémité **compressée** puis maintenue jusqu’à **blocage** par séchage sous contrainte
- (3) Débit en planchettes et taille au ciseau de la forme cylindrique
- (4) Nouveau trempage dans l’eau bouillante, **recouvrance** de la compression et taille de la pointe



*dommage
résiduel*

Inoue et al.
(1992)

Un peu de biologie végétale

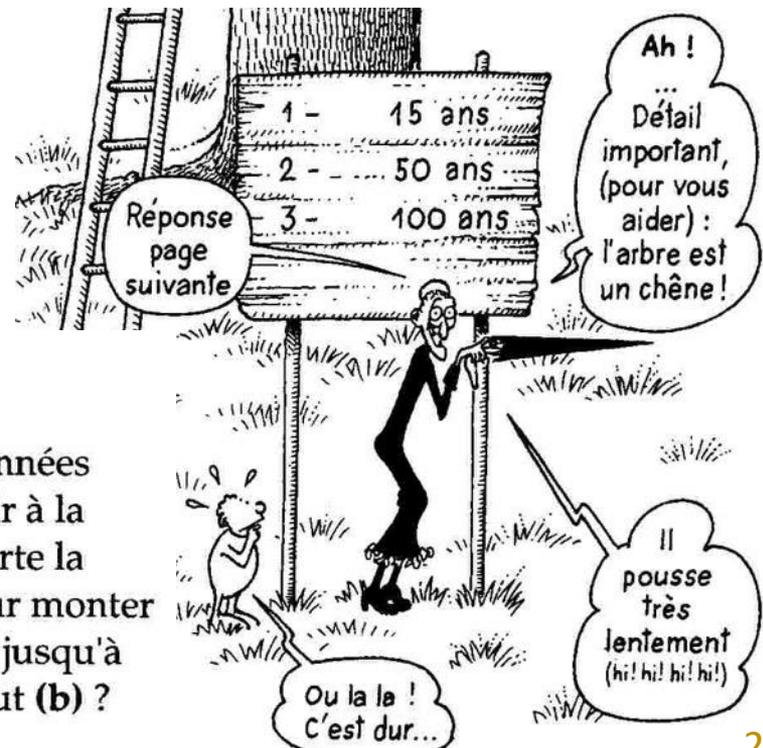


- (1) 15 ans
- (2) 50 ans
- (3) 100 ans
- (4) ne sais pas



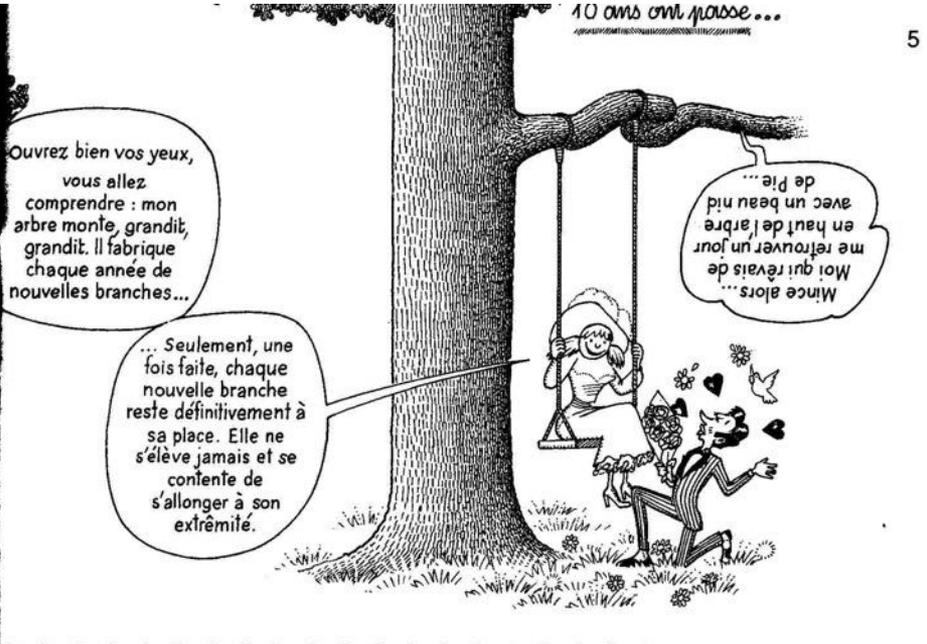
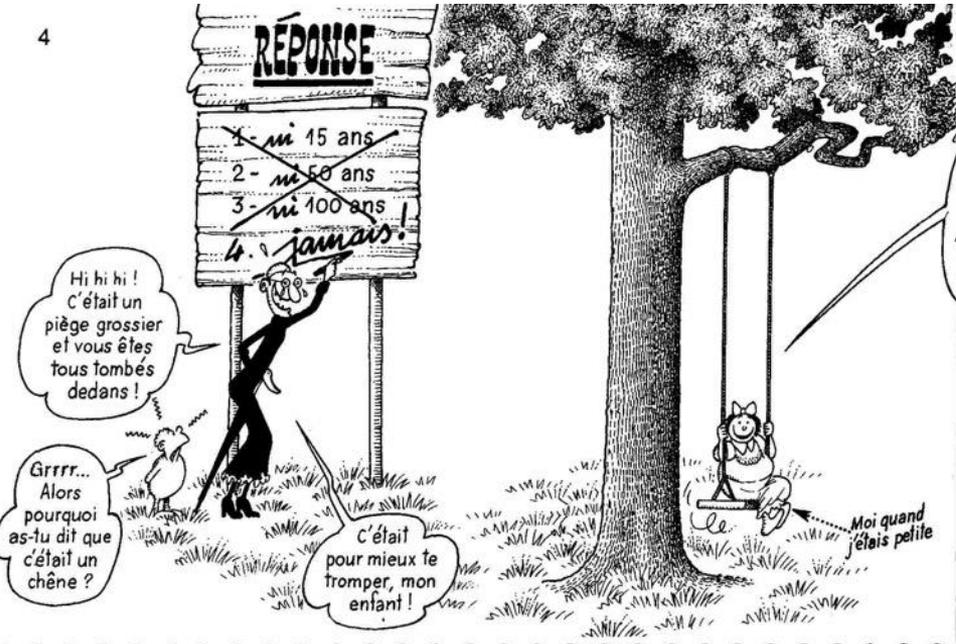
Devinette

Combien d'années va-t-il falloir à la branche qui porte la balançoire pour monter de 2 mètres (a) jusqu'à 5 mètres de haut (b) ?



?

La balançoire (réponse 1)

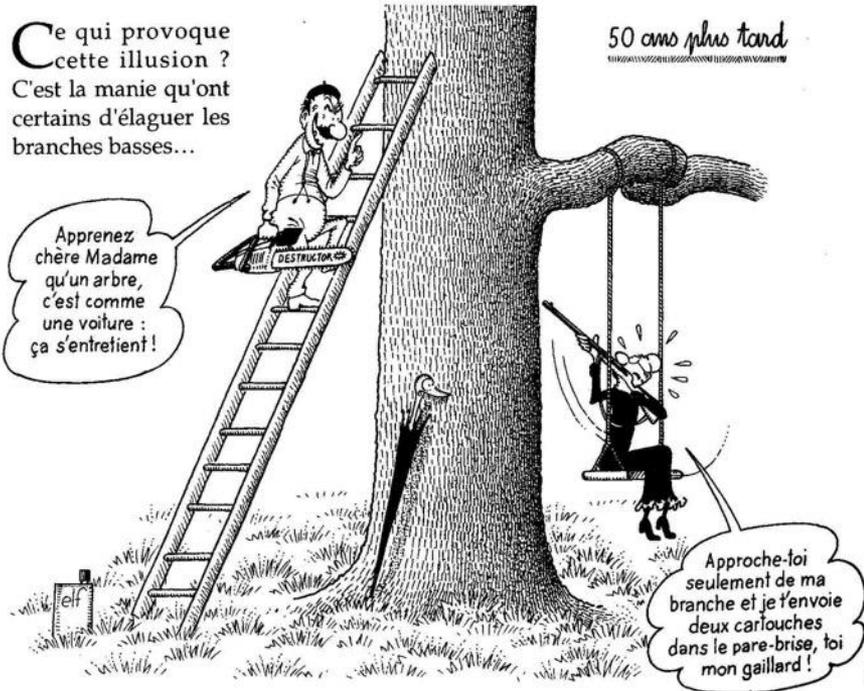


La croissance des arbres est incroyable: un fois mise en place (croissance primaire), une structure reste en place et se renforce (croissance secondaire) ...

La balançoire (réponse 2)

Ce qui provoque cette illusion ? C'est la manie qu'ont certains d'élaguer les branches basses...

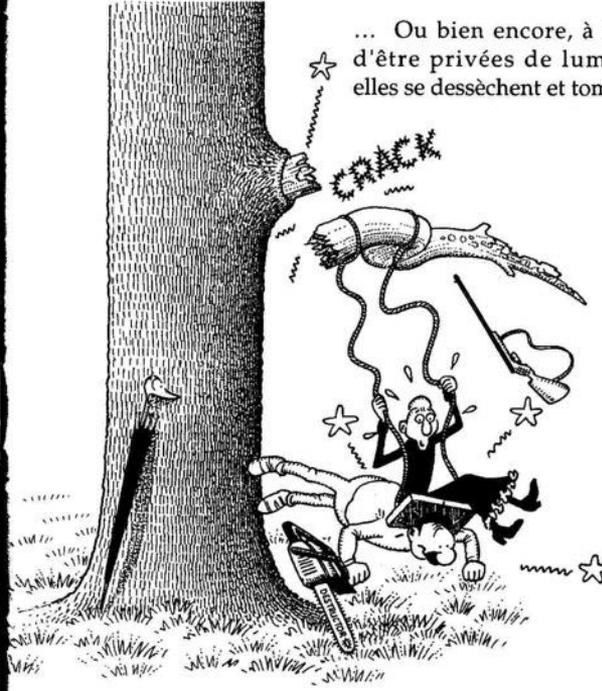
Apprenez chère Madame qu'un arbre, c'est comme une voiture : ça s'entretient !



50 ans plus tard

Approche-toi seulement de ma branche et je t'envoie deux cartouches dans le pare-brise, toi mon gaillard !

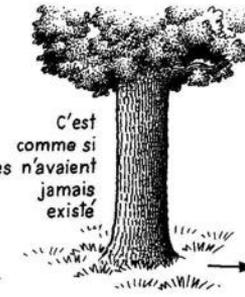
... Ou bien encore, à force d'être privées de lumière, elles se dessèchent et tombent



Avec le temps, les cicatrices se retrouvent noyées sous l'écorce et deviennent invisibles

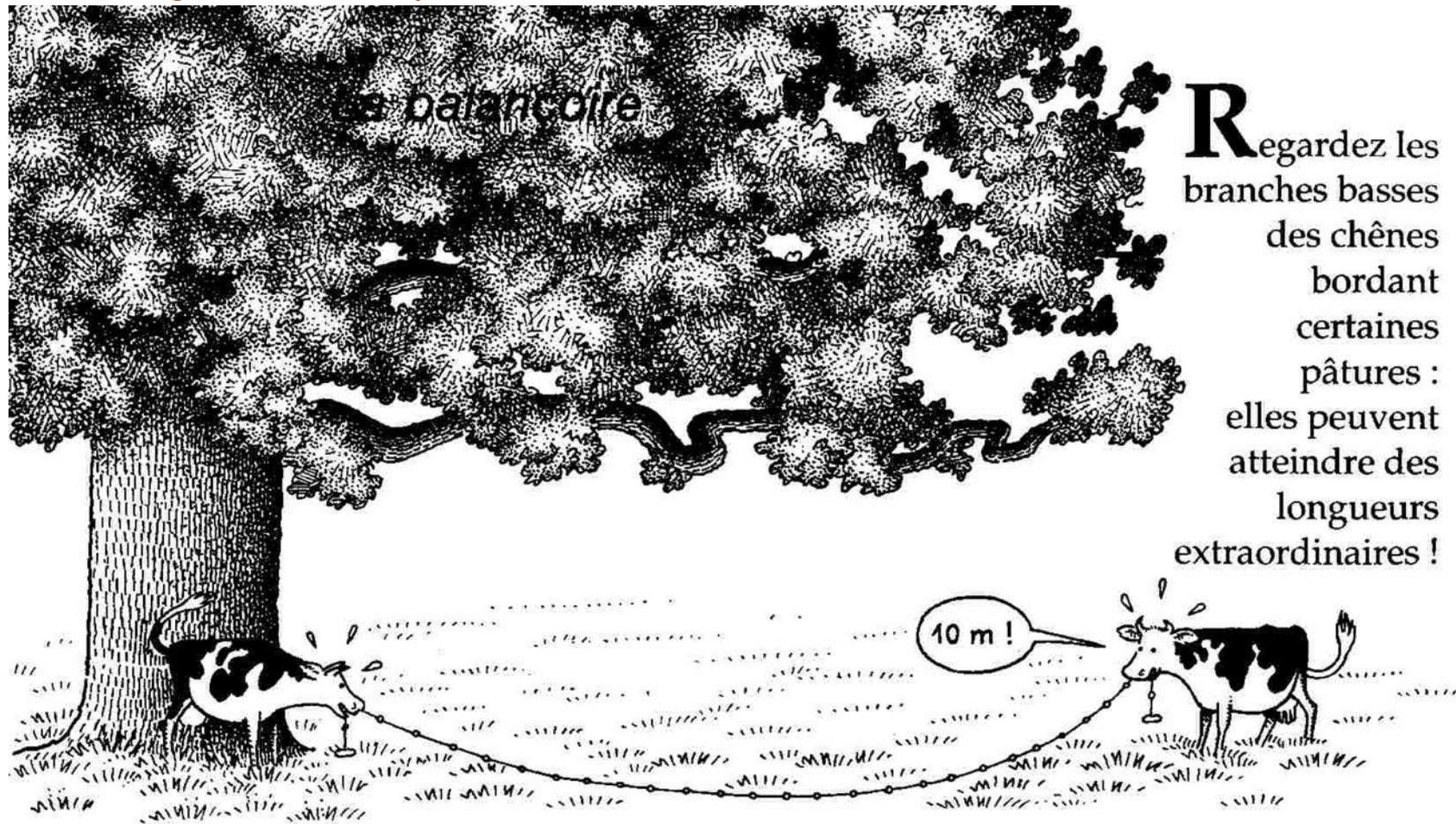


C'est comme si elles n'avaient jamais existé



- ... ou bien elle disparaît (élagage, etc)

La balançoire (réponse 3)



Regardez les branches basses des chênes bordant certaines pâtures : elles peuvent atteindre des longueurs extraordinaires !

Merci de votre attention

bernard.thibaut@umontpellier.fr
joseph.gril@cnr.fr