

La fabrication de feuilles de grandes dimensions par usinage : questions mécaniques posées par le déroulage du bois.

Bernard THIBAUT
DR émérite CNRS

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil
Equipe Mécanique de l'arbre et du bois



Un peu d'histoire locale du déroulage

1984 Création de l'équipe « Mécanique et usinage du bois » au LMGMC

Thibaut B., (1988). – *Le processus de coupe du bois par déroulage*, Thèse de Doctorat d'Etat

Thèses soutenues

- MOVASSAGHI E., (1985). – *Influence des paramètres micro-densitométriques du bois sur les efforts de coupe et la qualité des placages de Douglas et de Châtaignier obtenus par déroulage.*
- MOTHE F., (1988). – *Aptitude au déroulage du bois de Douglas, conséquences de l'hétérogénéité du bois sur la qualité des placages*
- MARCHAL R., (1989). – *Valorisation par tranchage et déroulage des bois de chênes méditerranéens*
- BEAUCHENE J., (1996). – *Evolution du comportement mécanique du bois vert avec la température. Application à l'étude du déroulage de quelques bois guyanais.*
- DECES-PETIT D., (1996). – *Etude des phases transitoires au cours du déroulage du bois.*

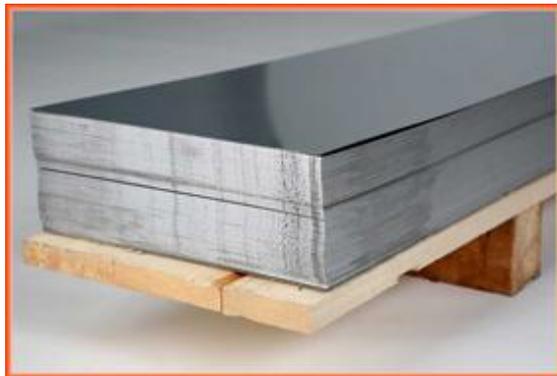
Un peu d'histoire locale du déroulage (bis)

Les contrats de recherche

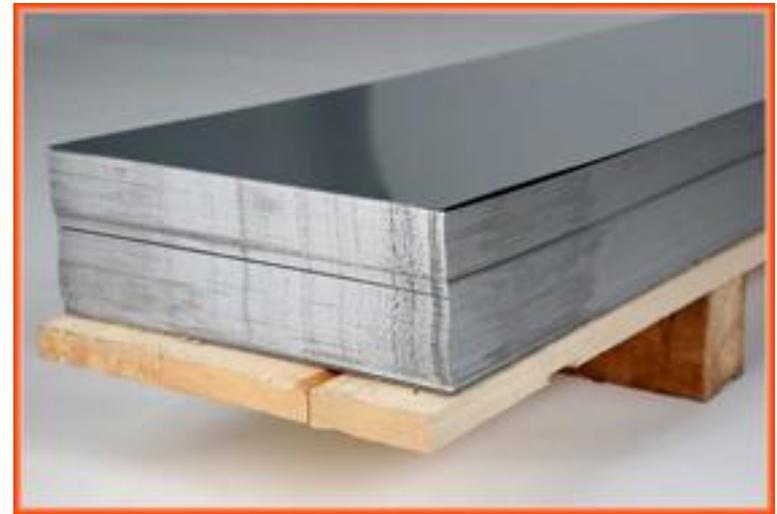
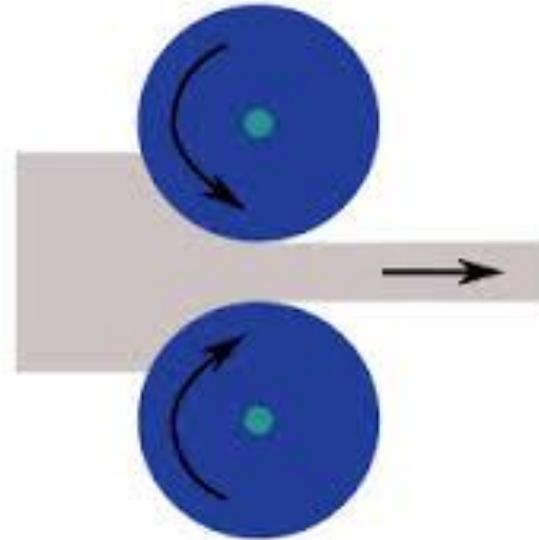
- 1979-80 *Etude des problèmes de coupe et des déformations résultantes dans le déroulage d'arbre de petit diamètre . DGRST*
- 1981-82 *Etude de l'influence des propriétés mécaniques et structurelles du matériau, dans le processus de coupe du bois par déroulage. DGRST*
- 1983-84 *Conception d'un prototype de machine d'étude du déroulage. MRT*
- 1986 *Etude de faisabilité du déroulage de brins de taillis de châtaignier. ROL*
- 1990-91 *Amélioration de la dérouleuse avec la société Sodème . Région LR*
- 1992-94 *Innovation in the Chestnut timber processing . CEE*
- 1993-97 *Cypress. CEE*
- 1988-2001 *Stresses in Beech. CEE*

Des feuilles de grande dimension

- Dimensions de l'ordre du m dans le plan, de l'ordre du mm dans l'épaisseur
- Des appellations dépendant des matériaux: tôles pour les métaux, plaques ou feuilles pour les polymères, le papier ou les cartons, placages pour les bois
- Productions importantes des industries primaires
- Utilisations nombreuses dans les secteurs de l'édition, l'emballage, la construction, le transport, l'ameublement, les aménagements intérieurs ...
- Composants de base d'une multitude de panneaux et coques multicouches combinant souvent les différents matériaux

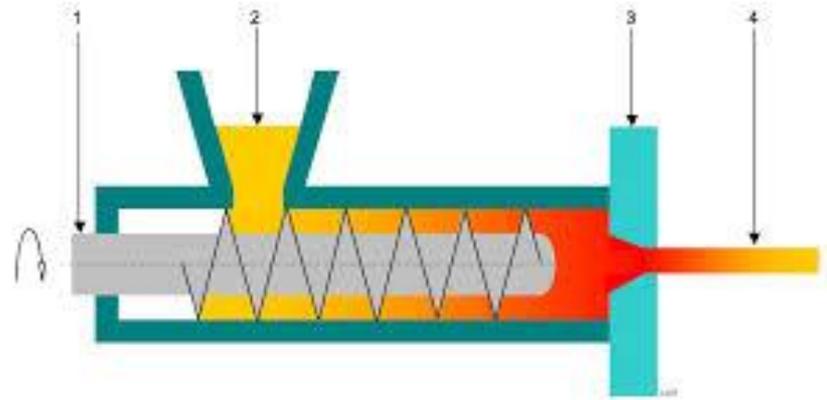


Fabrication des tôles par laminage

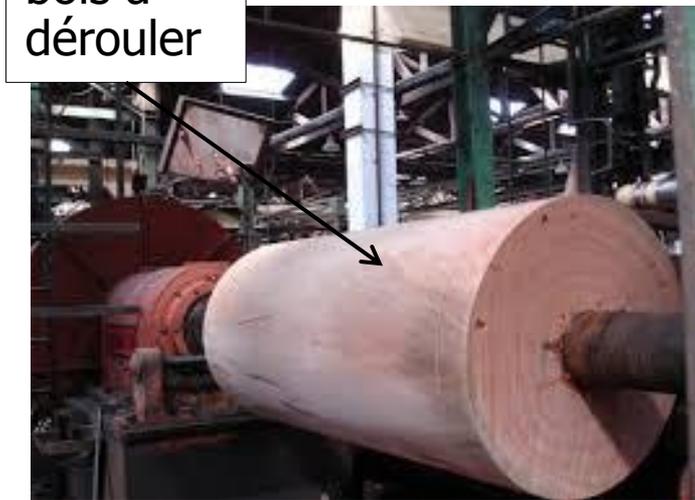
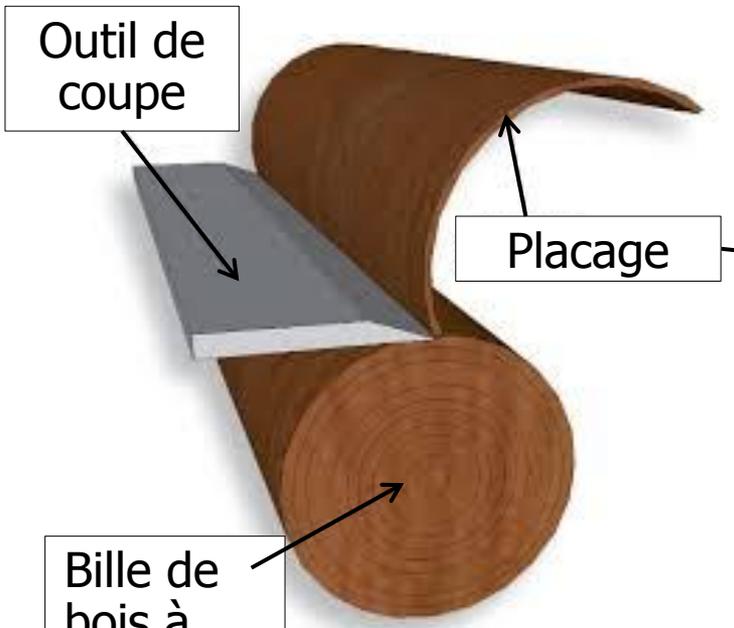


Laminage à froid de tôle d'acier

Fabrication des plaques et feuilles par extrusion (plastiques, papier et carton)



Fabrication des placages par usinage



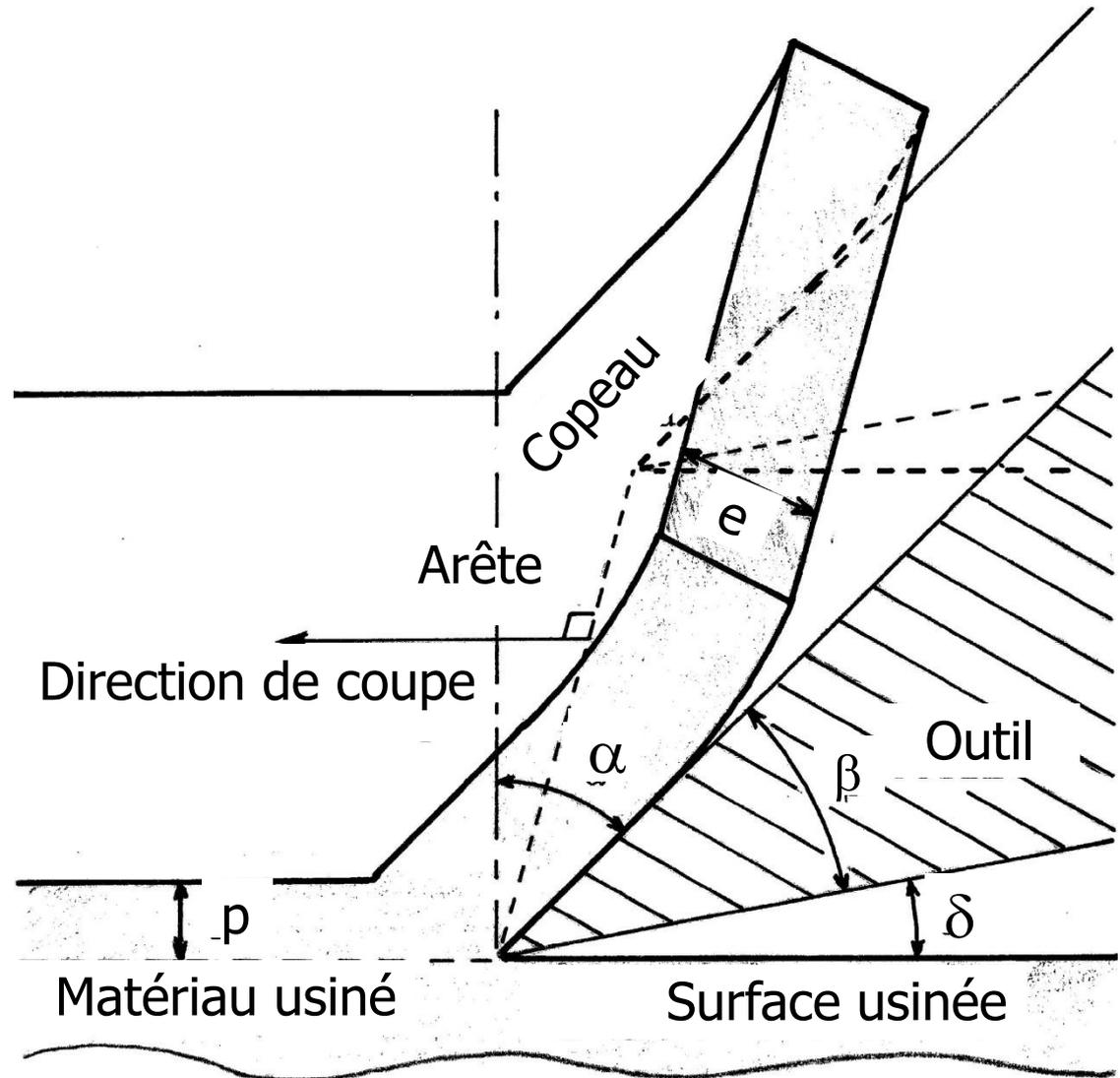
Coupe orthogonale par outil tranchant et chauffe ente 40 et 80°C

La coupe orthogonale par outil tranchant

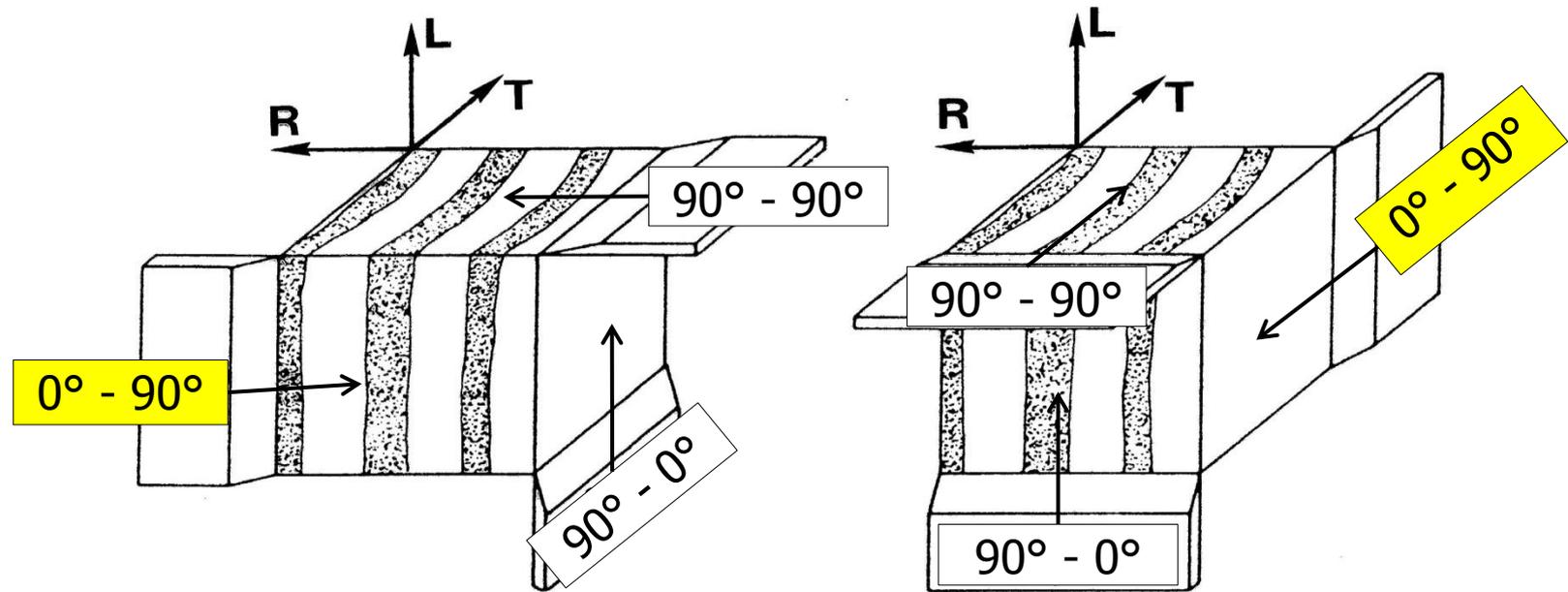
(arête de l'outil perpendiculaire à la translation outil/matière)

- α : angle d'attaque
- β : angle de bec
- δ : angle de dépouille
- p : passe d'usinage
- e : épaisseur du copeau

(l'épaisseur réelle du copeau est différente de la passe dans le cas général)



Le déroulage: coupe orthogonale en mode $0^\circ - 90^\circ$



Les modes fondamentaux de coupe orthogonale du bois.

Le fil du bois (L) est la direction privilégiée.

Premier chiffre: angle entre l'arête et le fil du bois

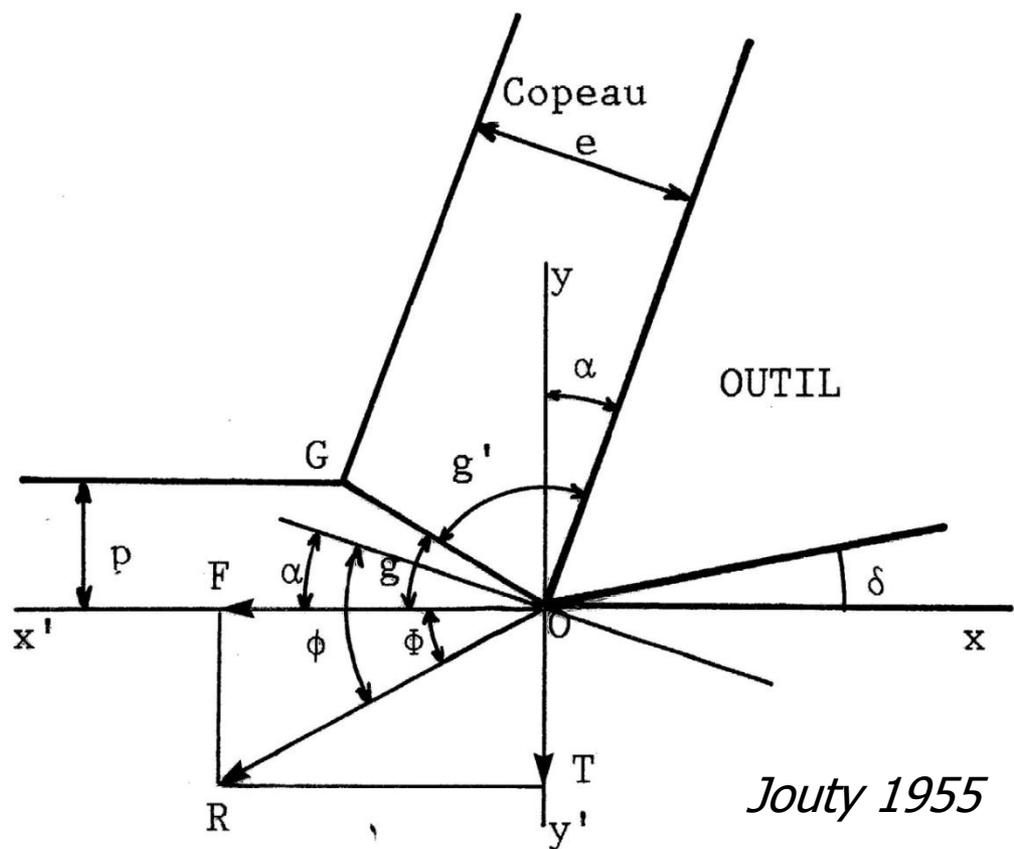
Deuxième chiffre: angle entre la direction de coupe et le fil du bois

L'orientation par rapport aux cernes est secondaire dans l'usinage mais importante pour le dessin du placage (tranchage / déroulage)

Le cisaillement plastique localisé phénomène de base du modèle de Pijpanen-Merchant

- ϕ : angle de frottement
- α : angle d'attaque
- δ : angle de dépouille
- p : passe d'usinage
- e : épaisseur du copeau
- R : effort total
- F : composante frontale
- T : composante transverse

OG: Plan de cisaillement
 g : angle de cisaillement
 $g = (90^\circ + \alpha - \phi) / 2$



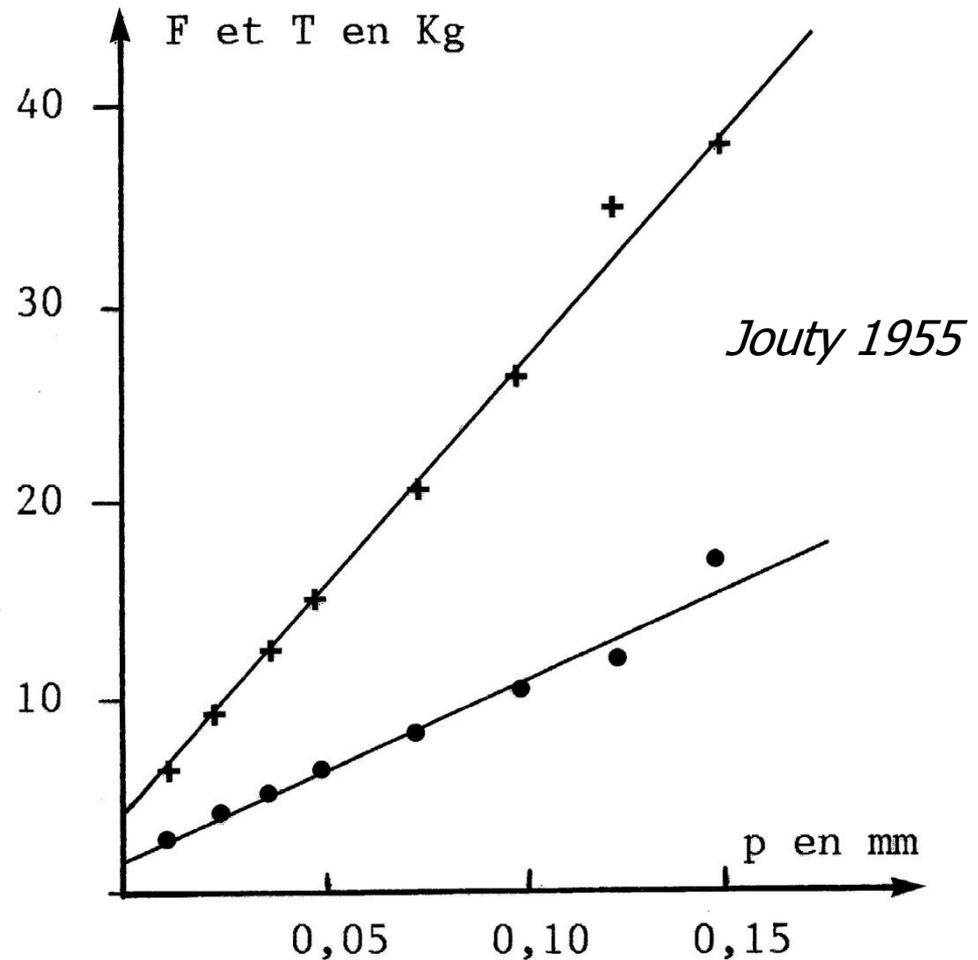
Épaississement du copeau $e/p = \cos(\alpha - g) / \sin(g)$

Rétrécissement en longueur du copeau: inverse de l'épaississement
 (pas d'épaississement ou de rétrécissement si le frottement est nul)

Evolution de l'effort de coupe avec la passe d'usinage

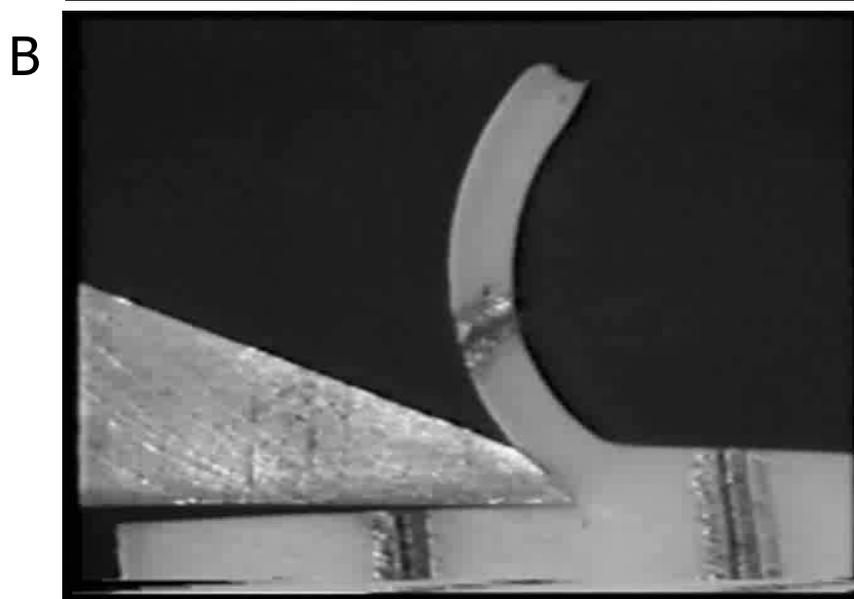
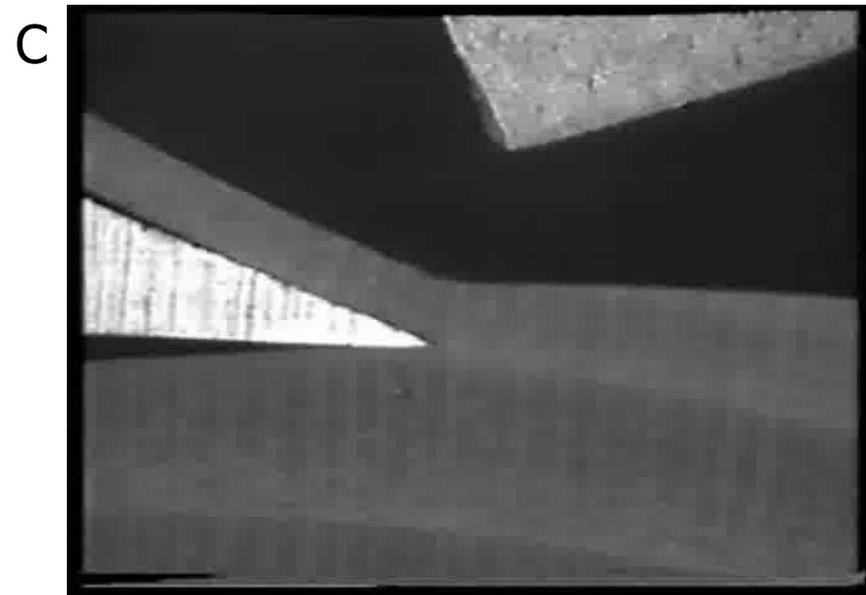
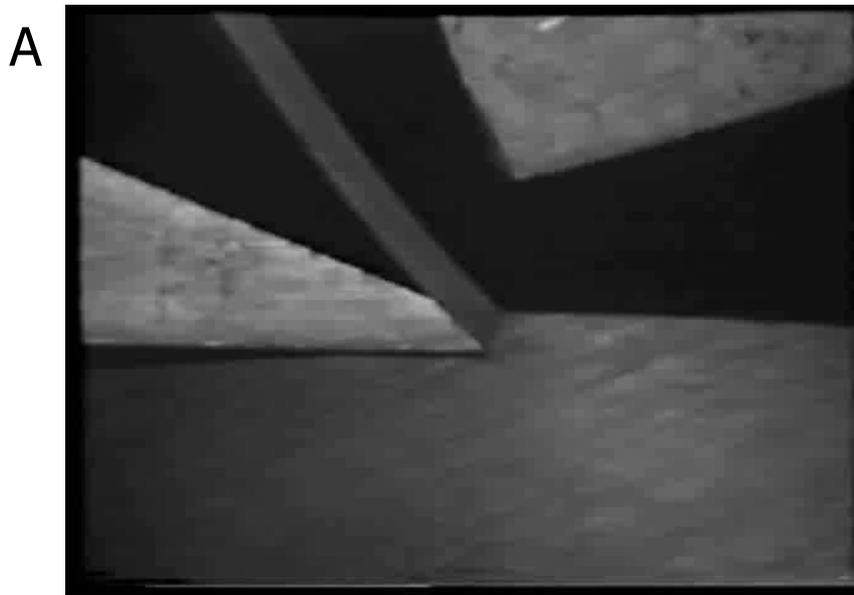
La pente des droites est proportionnelle à la section usinée et à la contrainte de cisaillement plastique

Au passage à la limite pour une passe nulle, l'effort de coupe n'est pas nul.



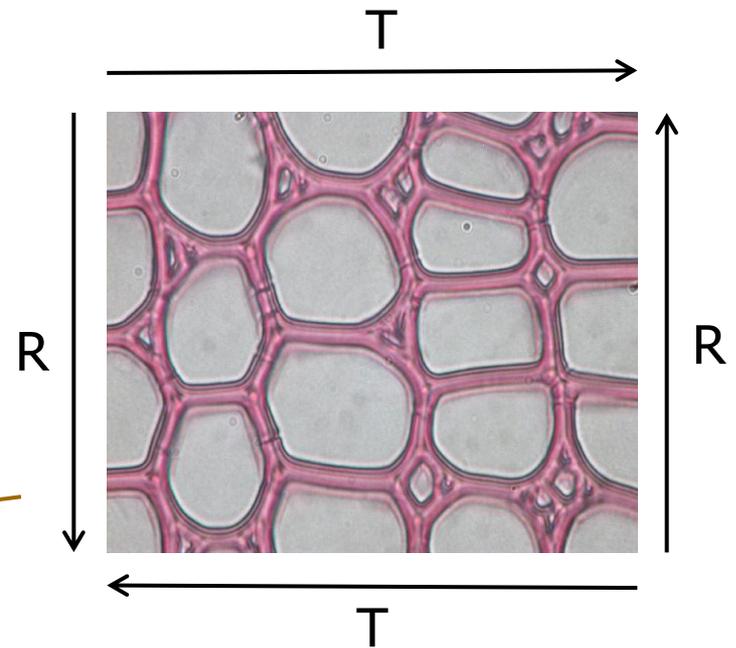
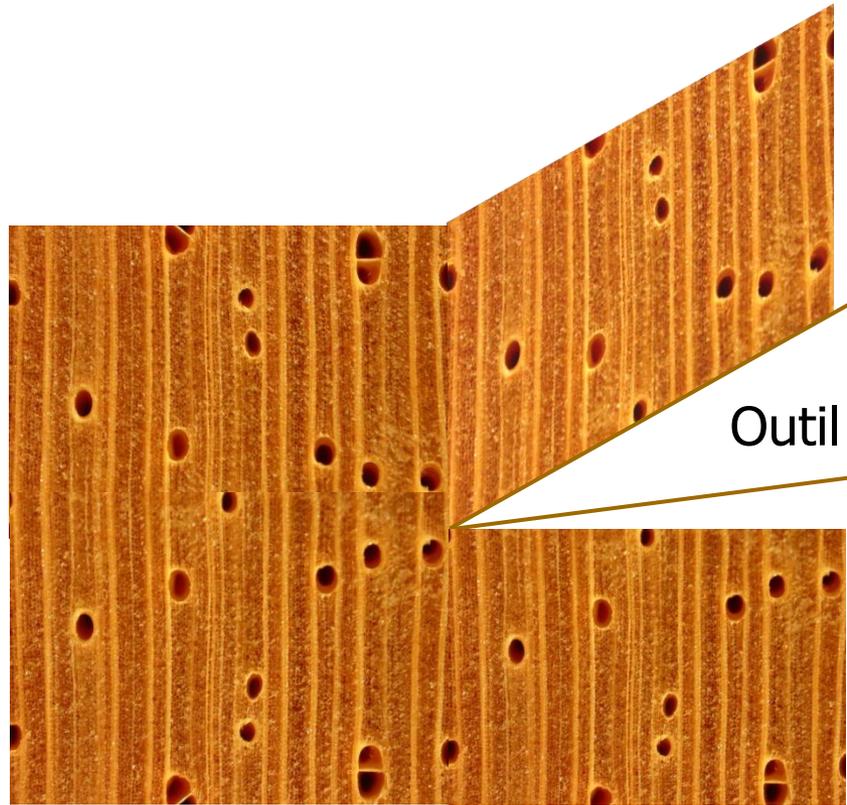
- + F Composante frontale de l'effort
- T Composante transverse de l'effort

Images du cisaillement



- A: PMMA, cisaillement plastique localisé
- B: Téflon, cisaillement plastique plus diffus
- C: Platane cisaillement évident

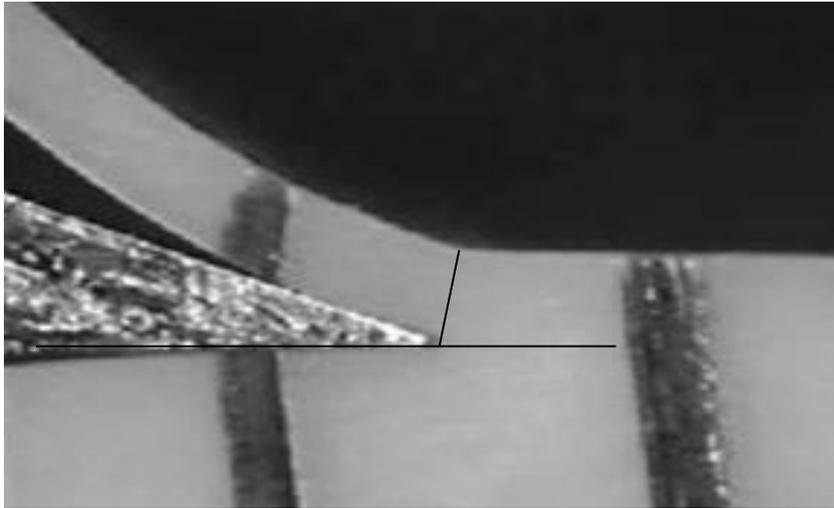
Cisaillement R/T en coupe 0° - 90°



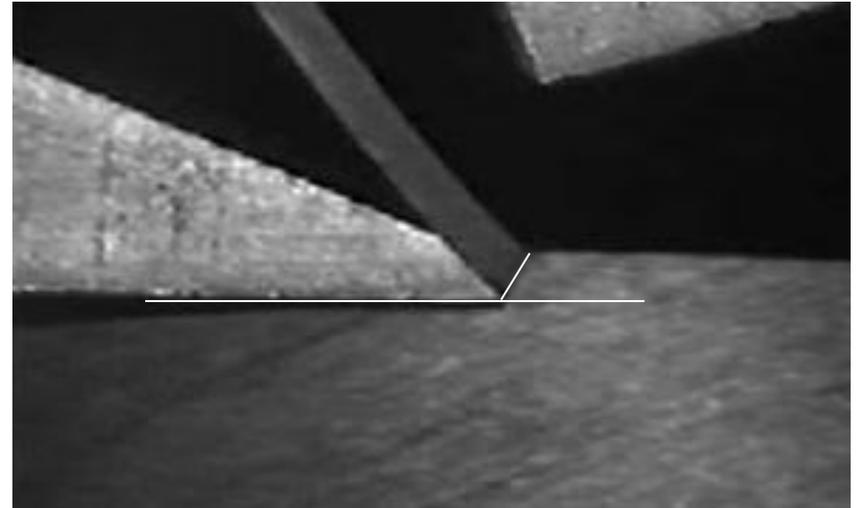
La direction du fil est perpendiculaire au plan de la figure

Le cisaillement RT du bois, dit « cisaillement de roulement », est le plus facile et le plus complaisant

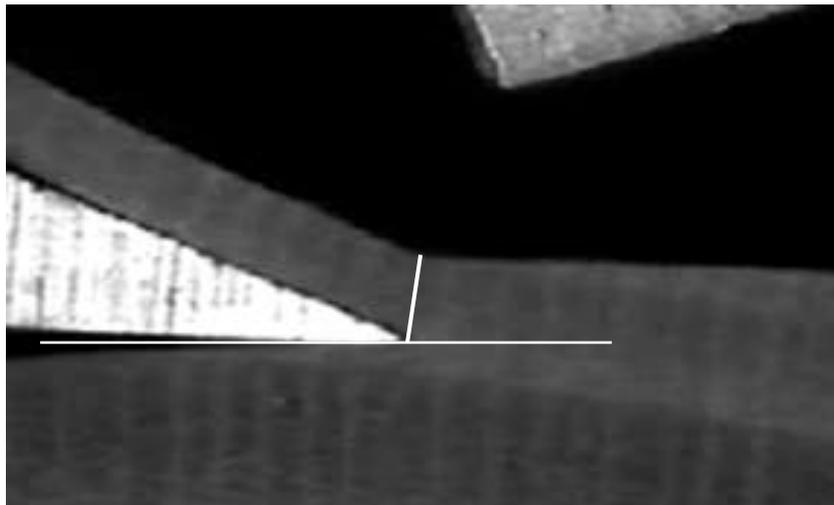
Angle du plan de cisaillement



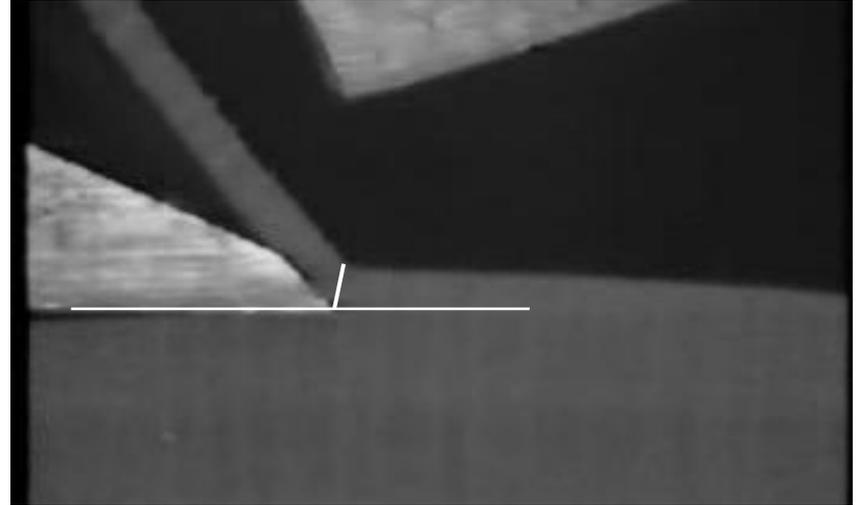
Téflon: $\phi=5,7^\circ$, $\alpha=72^\circ$, $g=78^\circ$, $gt=79$



PMMA: $\phi=28^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $g=56^\circ$, $gt=54^\circ$

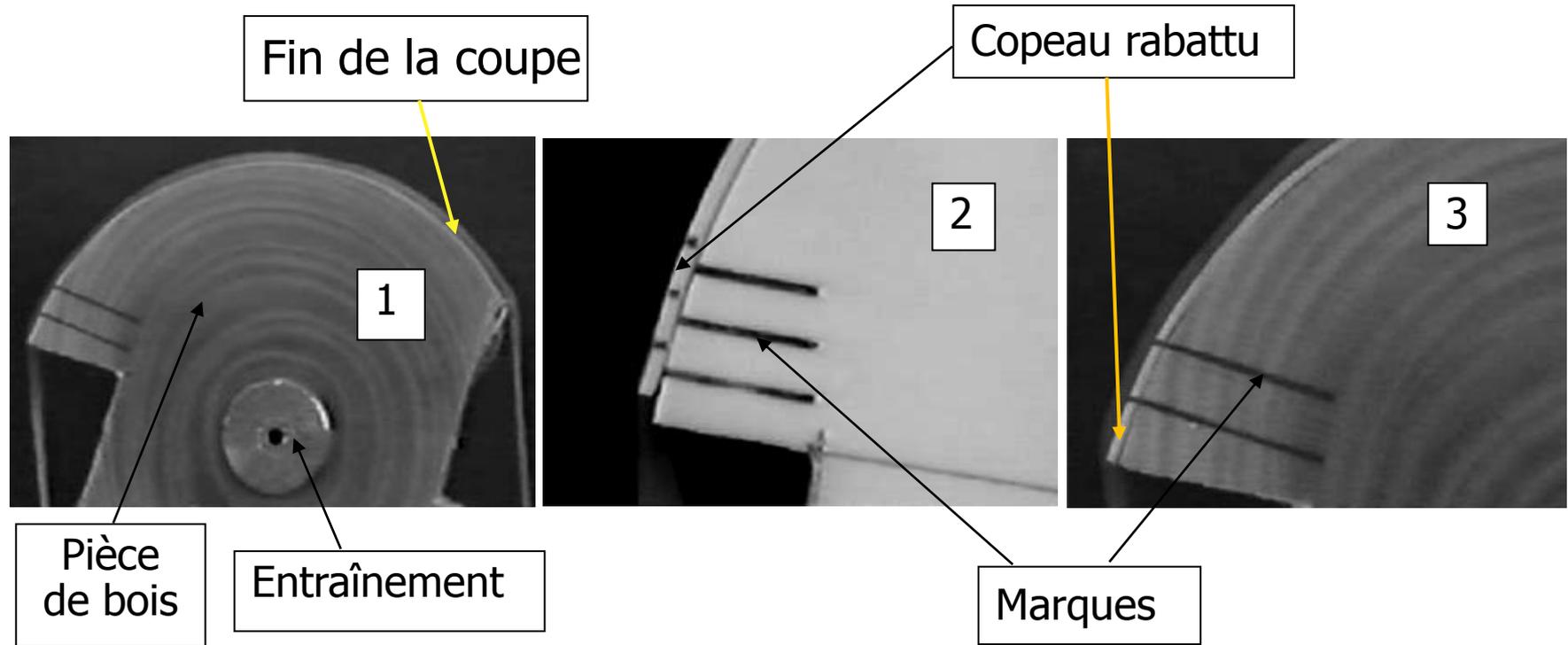


Platane: $\phi=22^\circ$, $\alpha=68$, $g=81^\circ$, $gt=68^\circ$



Platane: $\phi=22^\circ$, $\alpha=45$, $gt=79^\circ$, $gt=57^\circ$

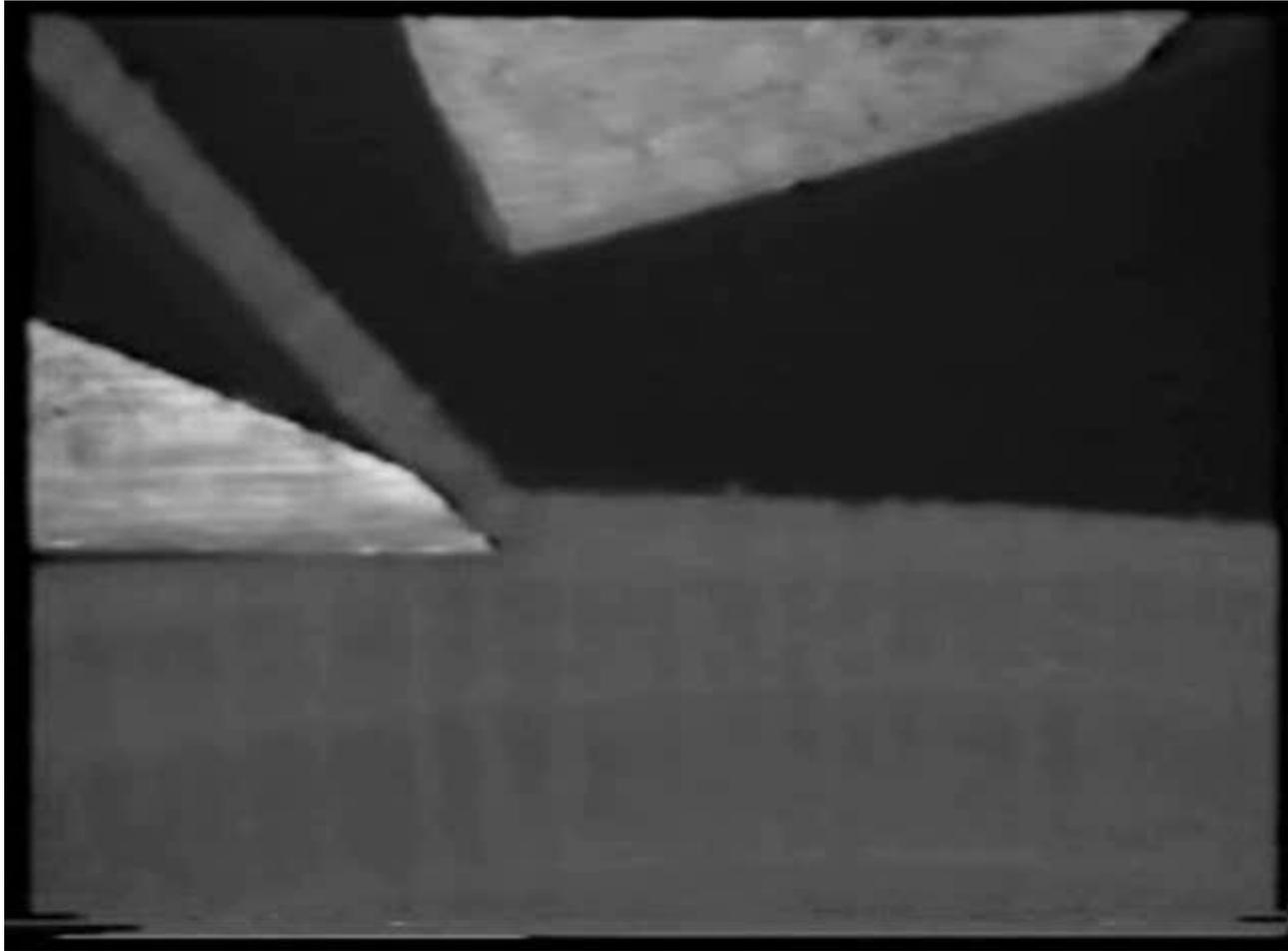
Rétrécissement du copeau



- 1 Vue générale de la coupe interrompue et du repositionnement du copeau (longueur coupée: 90mm, distance entre marques: 5mm)
- 2 Vue locale du rétrécissement, téflon, $\alpha=70^\circ$, (valeur prévue: 2%)
- 3 Vue locale du rétrécissement, Platane, $\alpha=70^\circ$, (valeur prévue: 8%)

Pour le bois il n'y a pas de rétrécissement

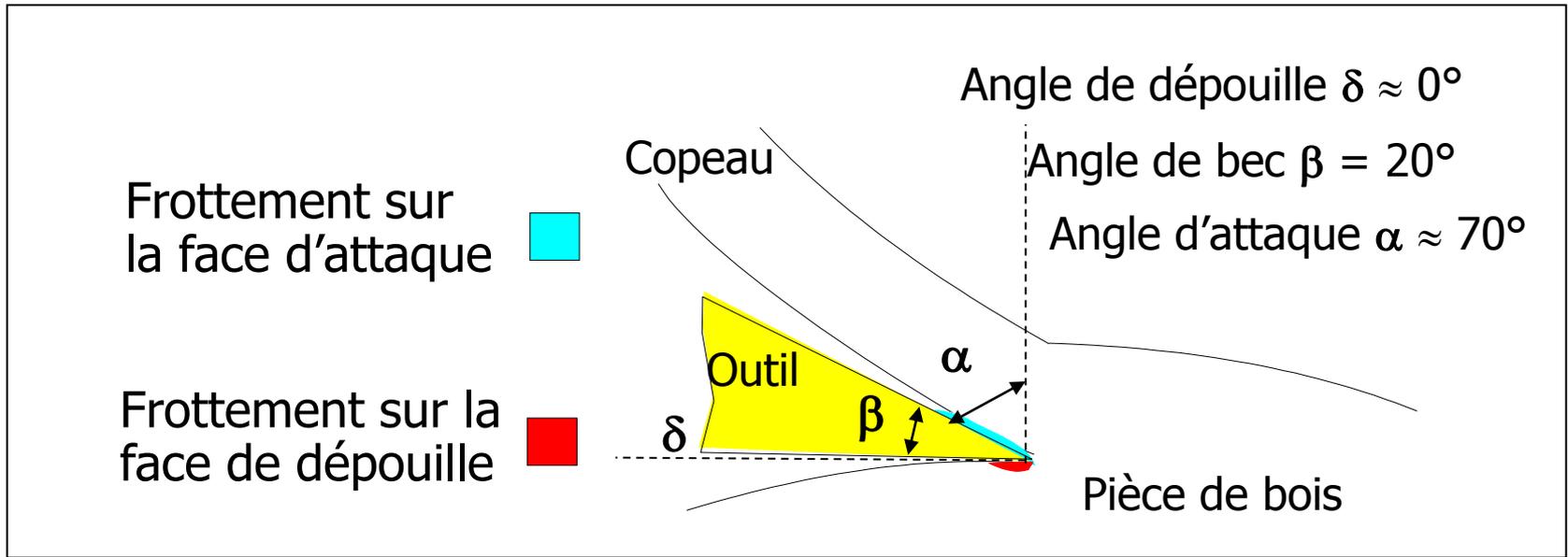
En déroulage le copeau est le produit fini



Succession de coupes de platane avec un angle de bec de 45° puis 20°

Pour obtenir un placage peu endommagé il faut utiliser un petit angle de bec. 20° est un minimum imposé par la tenue de l'arête.

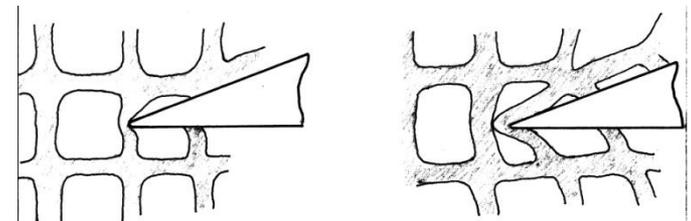
Un outil à deux faces en contact avec le bois



Avec un angle de bec de 20° , l'outil est très flexible. Il est important que l'effort exercé par le bois sur la face de dépouille réduise l'effort de flexion résultant de l'action du copeau en formation sur la face d'attaque.

Il y a toujours un contact bois/face de dépouille.

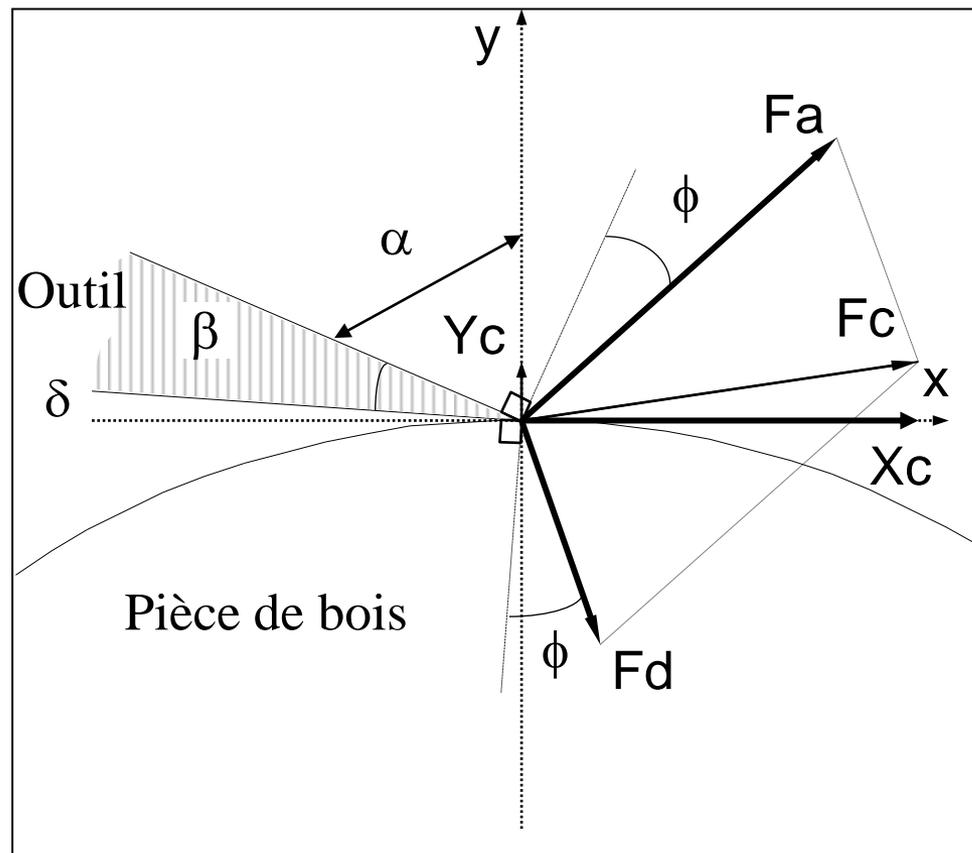
Dans une coupe circulaire l'angle de dépouille peut être négatif.



Interaction très locale entre l'arête et les fibres de bois

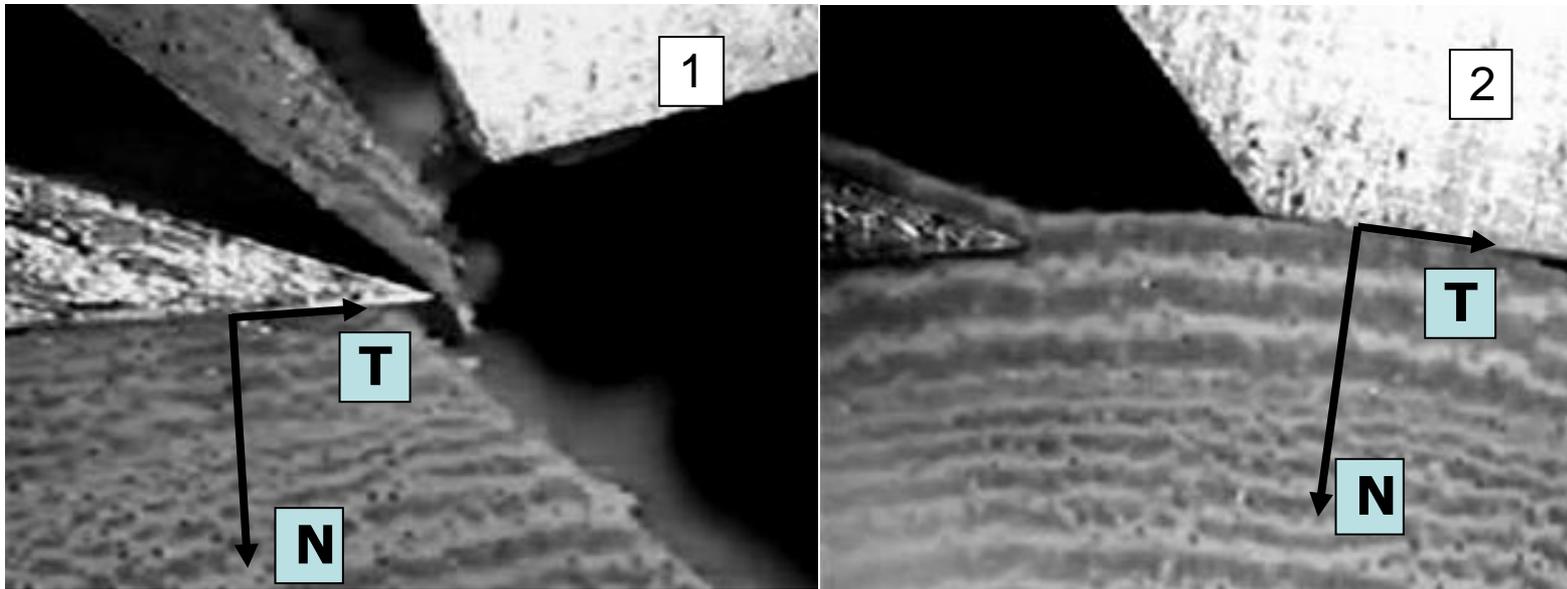
Séparation des efforts sur les deux faces

- X: direction de coupe
- Y: normale à la surface
- ϕ : angle de frottement
- α : angle d'attaque
- β : angle de bec
- δ : angle de dépouille
- Fc: effort total outil
- Xc: effort frontal
- Yc: effort transverse
- Fa: effort d'attaque
- Fd: effort de dépouille



Pour des outils bien affûtés, l'effort local sur l'arête est négligeable. L'angle ϕ caractérise le frottement bois/métal, lubrifié par l'eau. La mesure de ϕ et des deux composantes Xc et Yc de l'effort total exercé par l'outil sur le bois permettent le calcul de Fa et Fd

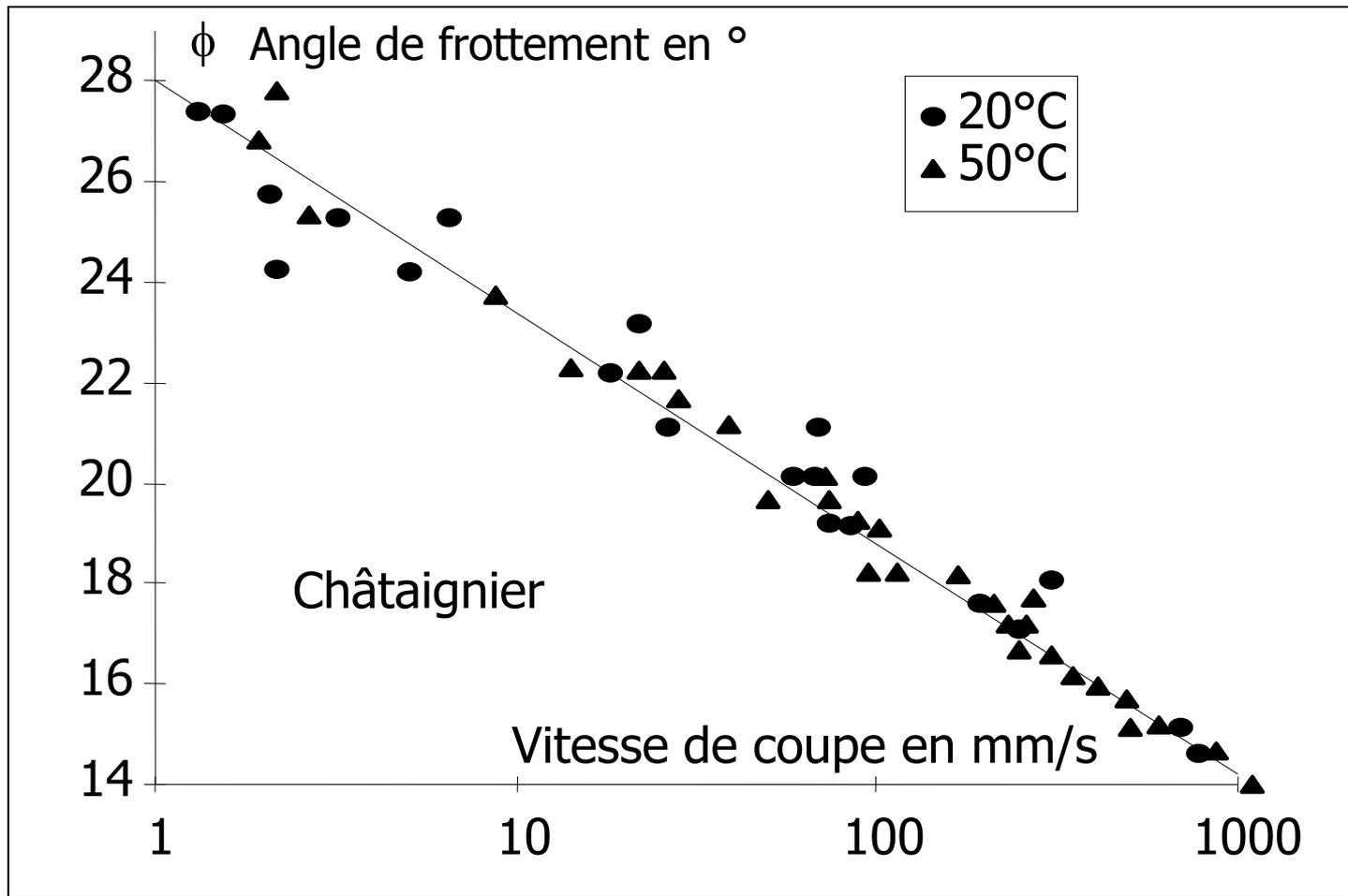
Mesure de l'angle de frottement ϕ



- 1 - Les 2 composantes de l'effort exercé par le dos de l'outil frottant sur la pièce de bois après la séparation du copeau (angle de dépouille négatif)
- 2 - Les 2 composantes de l'effort exercé par un patin frottant sur la surface fraîchement usinée

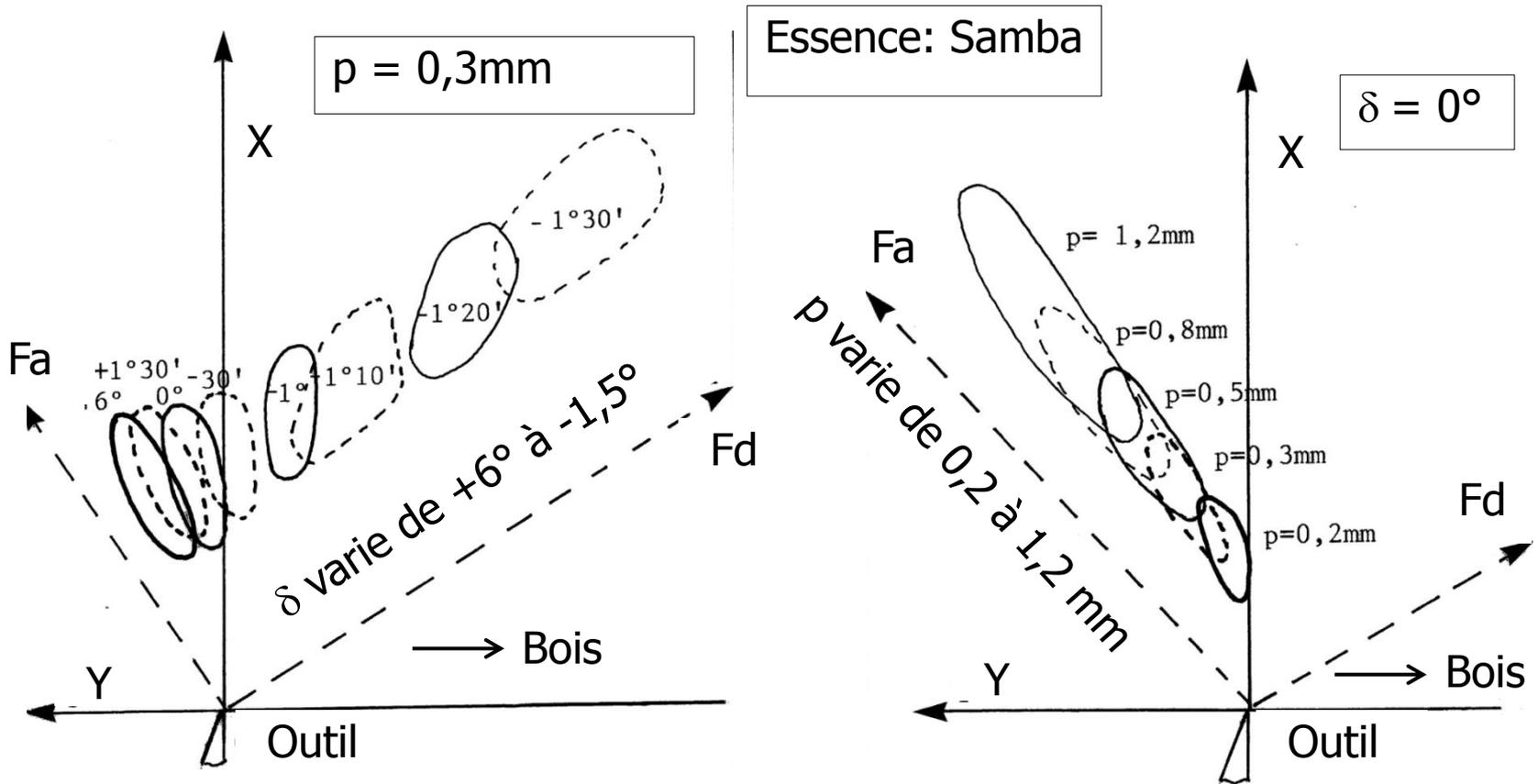
$$\text{Angle de frottement } \phi = \text{Arc-tangente } (T/N)$$

Evolution de l'angle ϕ avec la vitesse de coupe



L'angle de frottement ϕ ne dépend pas de la température du bois vert; il double quand la vitesse de coupe passe de 1m/s à 1mm/s

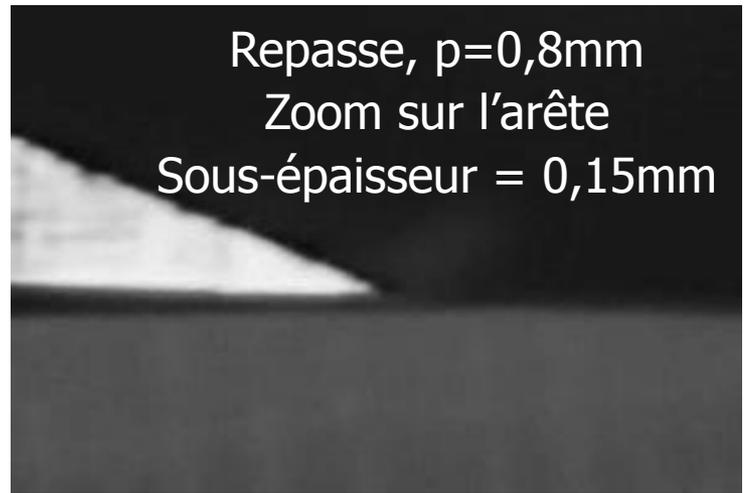
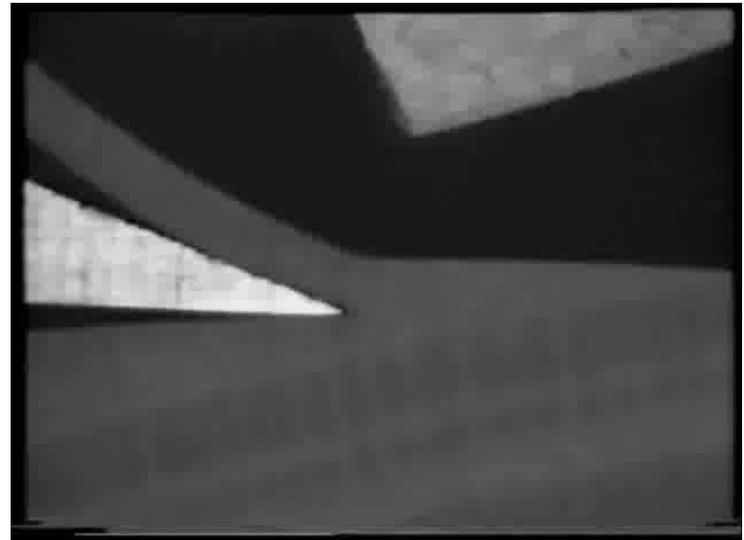
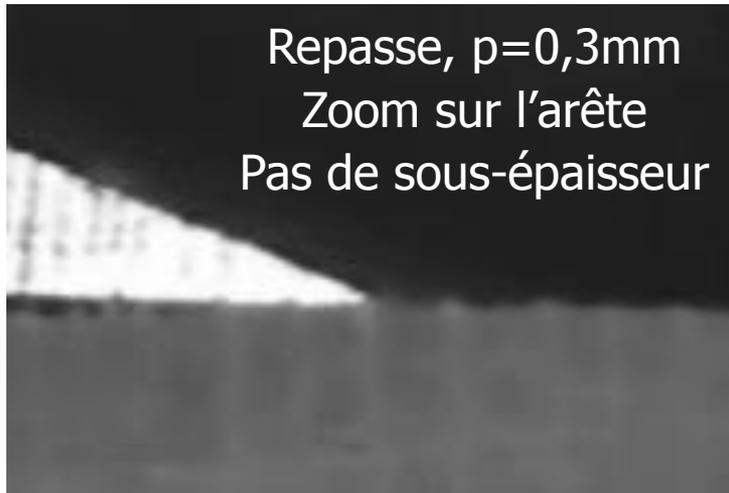
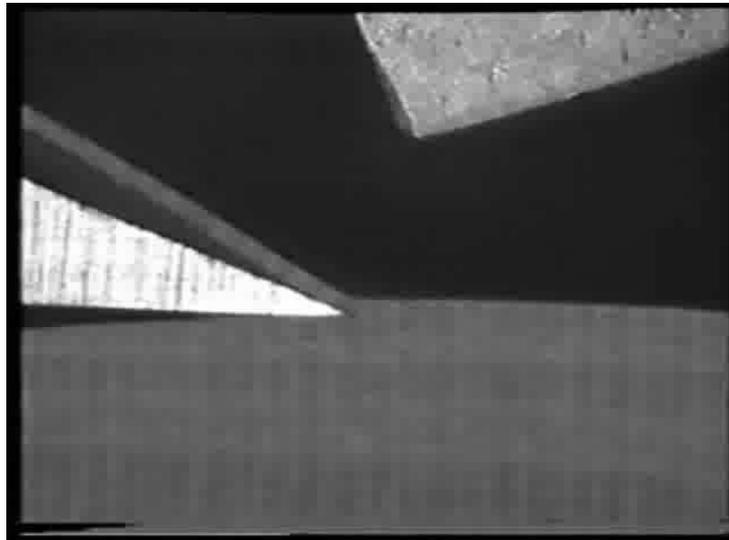
Influence de p et δ sur F_a et F_d



L'effort de dépouille dépend de l'angle de dépouille δ pour un bois donné
 L'effort d'attaque dépend de la passe d'usinage p pour un bois donné
 On est en régime de refus si la résultante Y_c est dirigée vers le bois
 ($\delta < 0$ ici) et en régime d'avalement dans le cas contraire

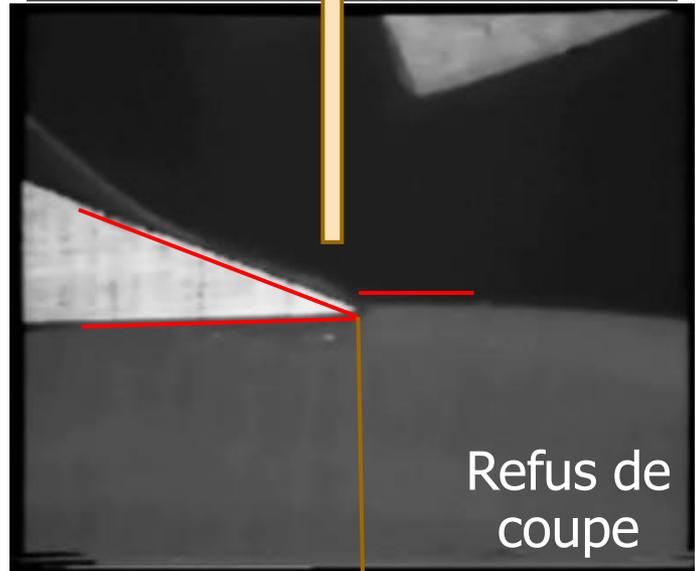
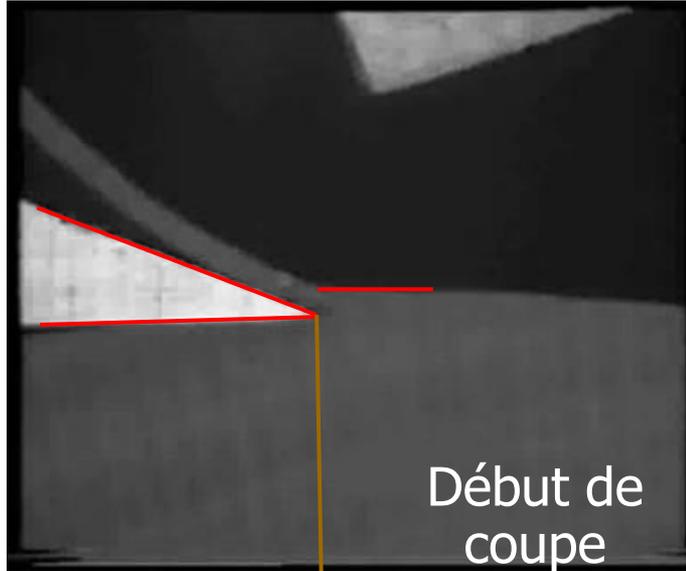
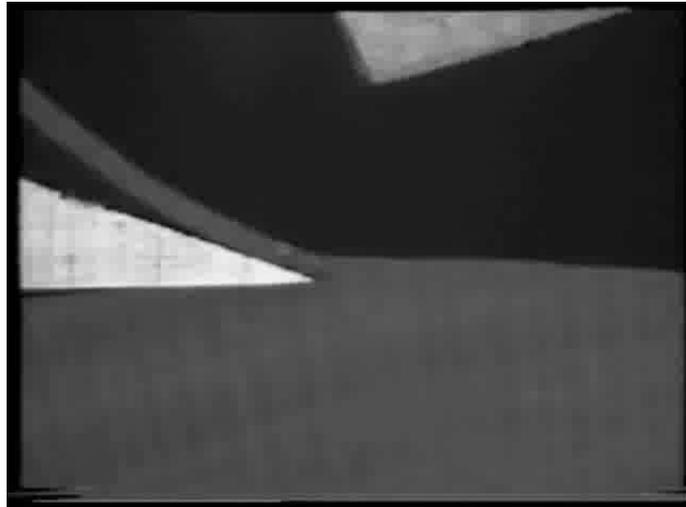
Sous-épaisseur en avalement *Platane* ($\delta=+2^\circ$)

Séminaire LMGC, Montpellier, 3 juillet 2014



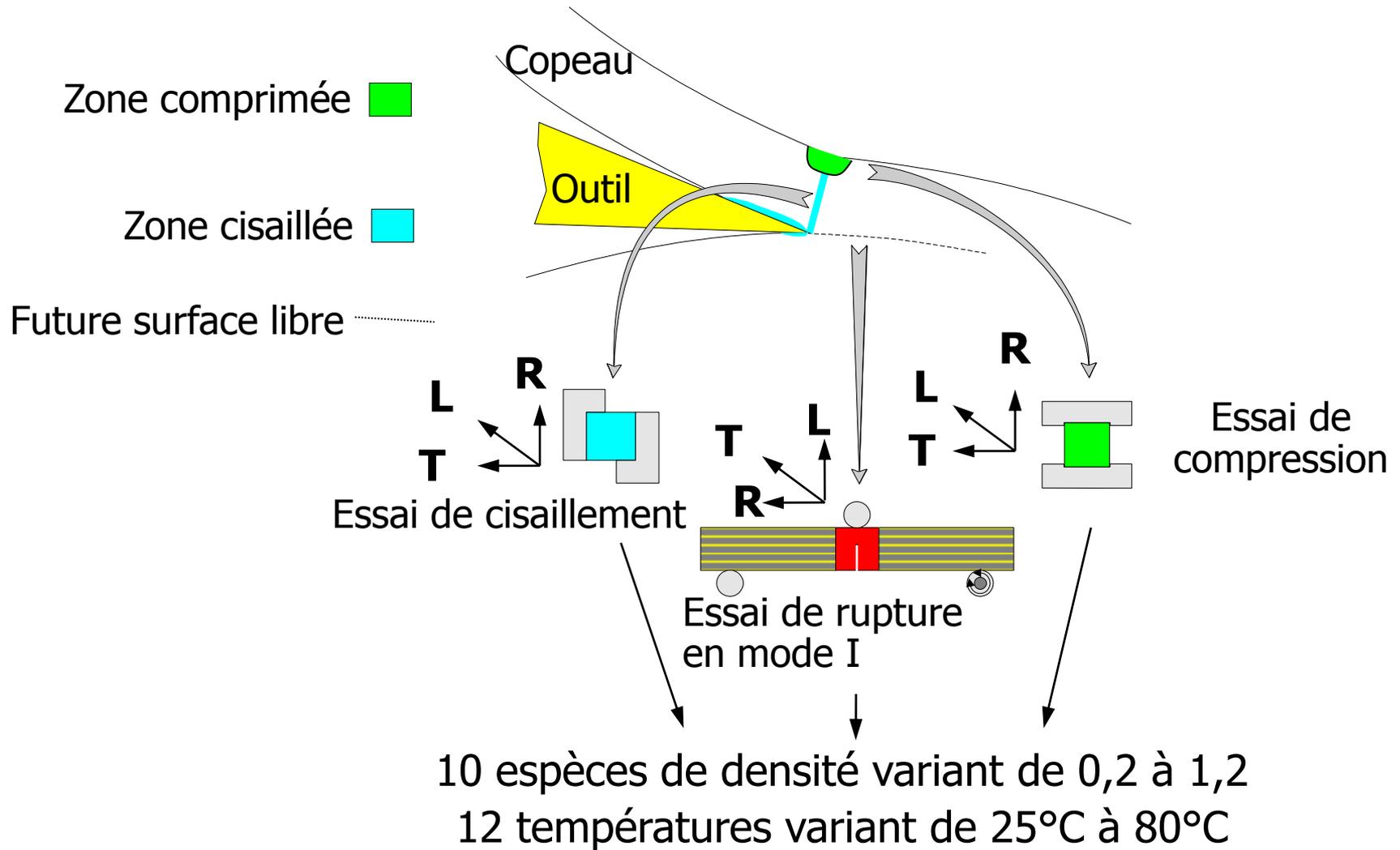
Si l'effort de dépouille est très inférieur à l'effort d'attaque ($p=0,8\text{mm}$ ici)
La composante transverse de l'effort total tire le bois vers le haut et l'outil fléchit un peu vers le bas. Le retour élastique après la coupe laisse un « jour » entre l'outil et le bois. Il y a une sous-épaisseur sensible.

Surépaisseur en refus: *Platane* ($p=0,4mm$, $\delta=-1^\circ$)

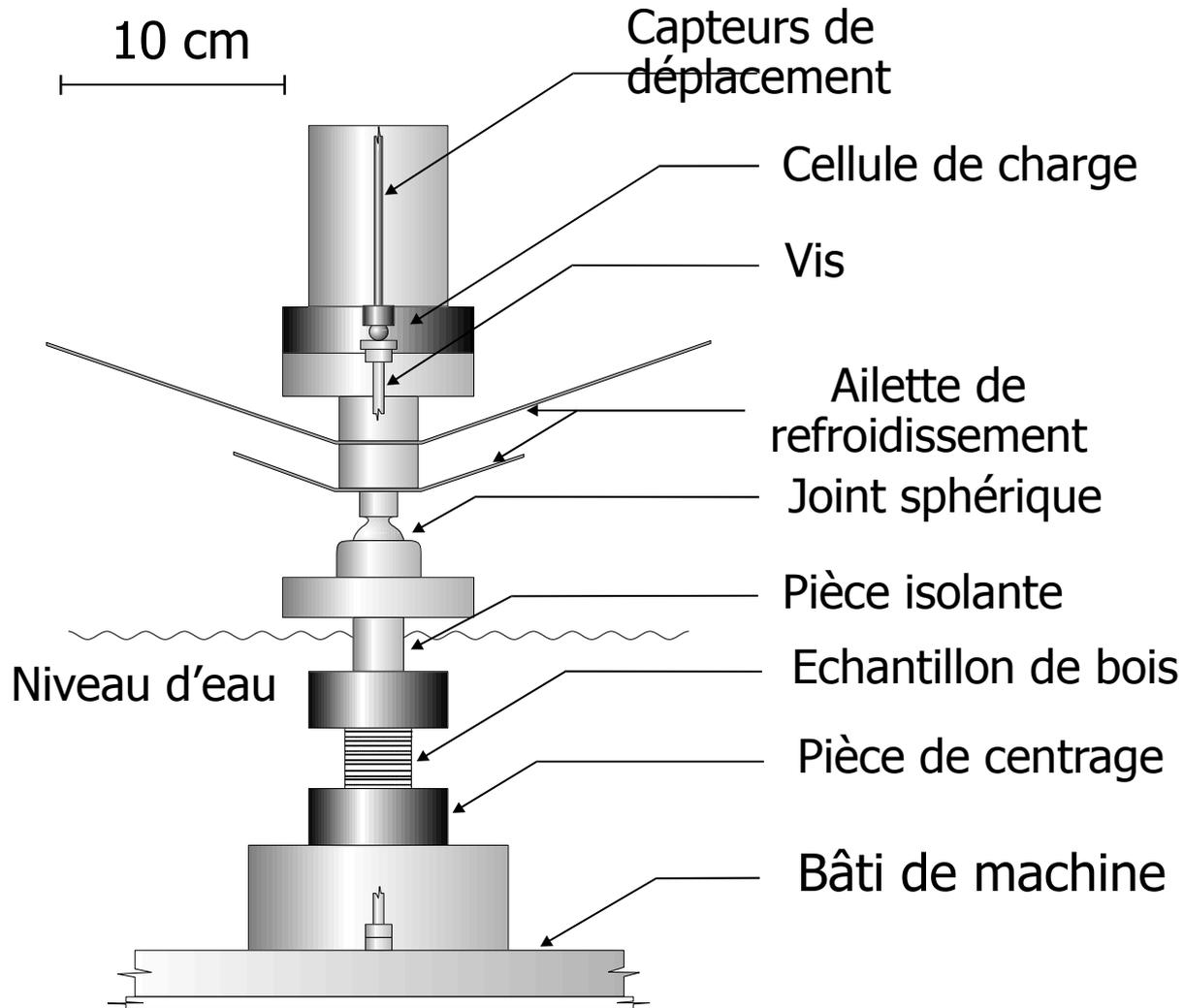


L'effort de dépouille augmente énormément, l'outil fléchit un peu et le bois est fortement comprimé en avant de l'arête ($de_{p^t}=0,3mm$ + éjection d'eau)

Caractérisation mécanique des bois

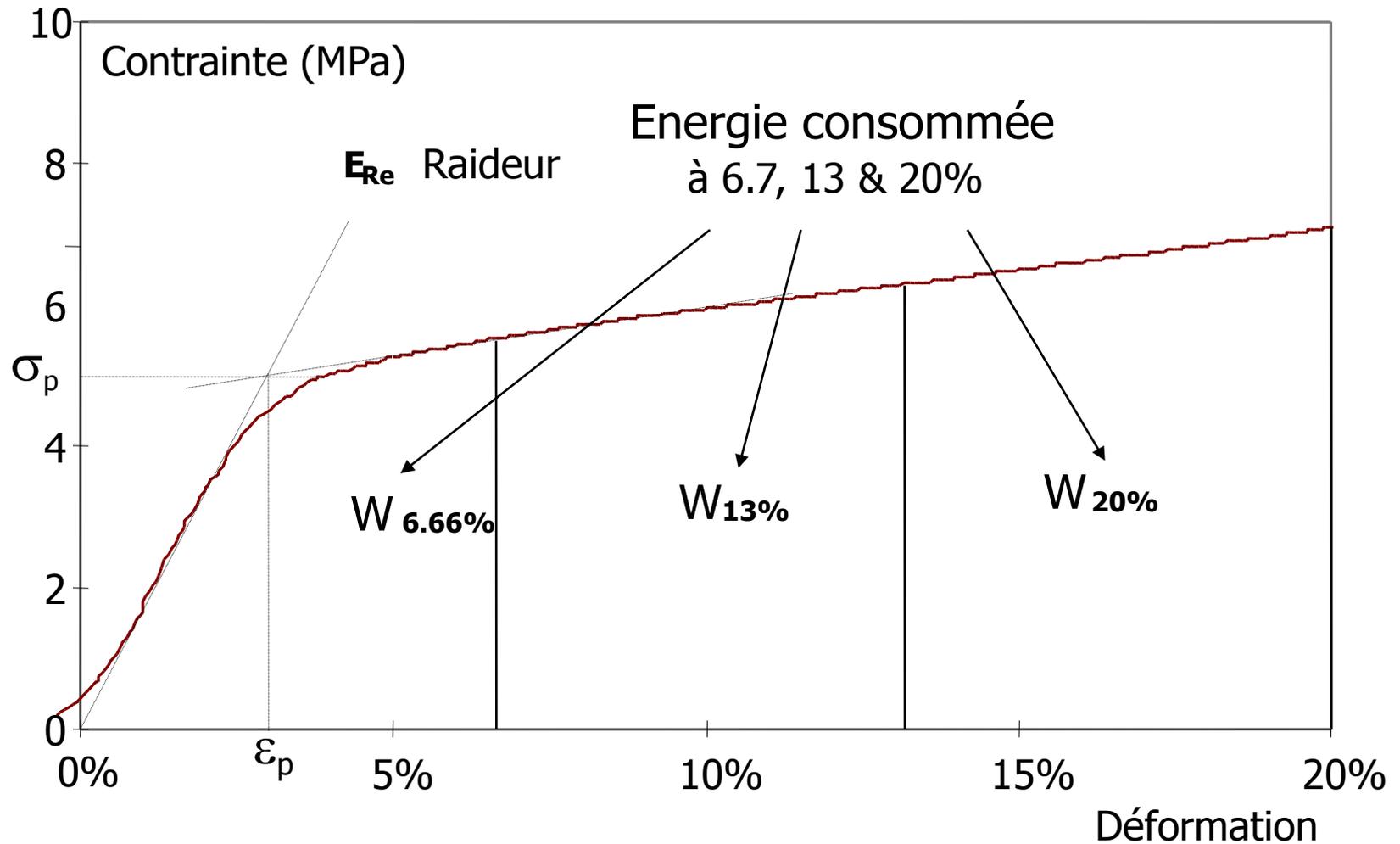


Essai de compression



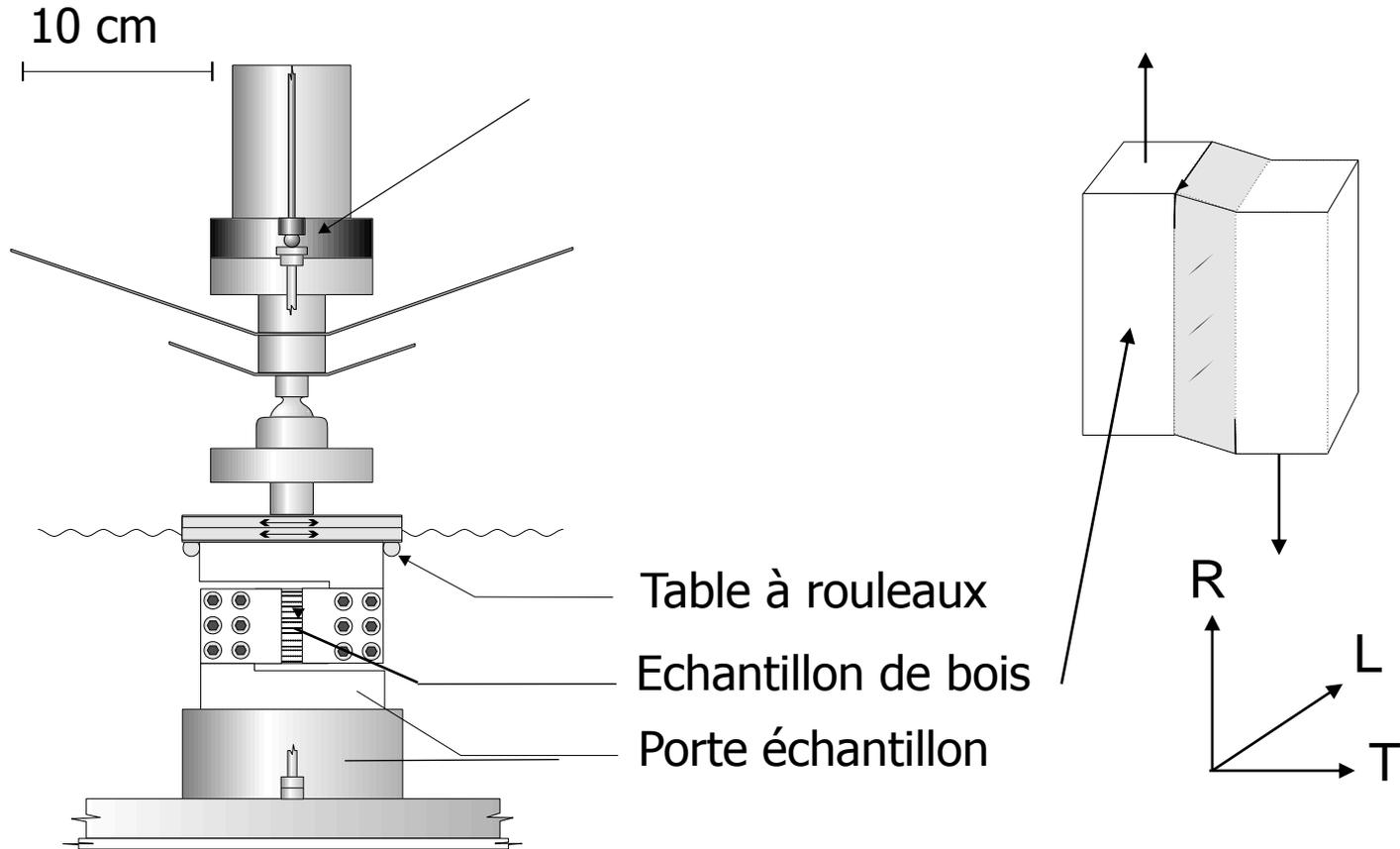
Indicateurs de l'essai de compression

Séminaire LMGC, Montpellier, 3 juillet 2014

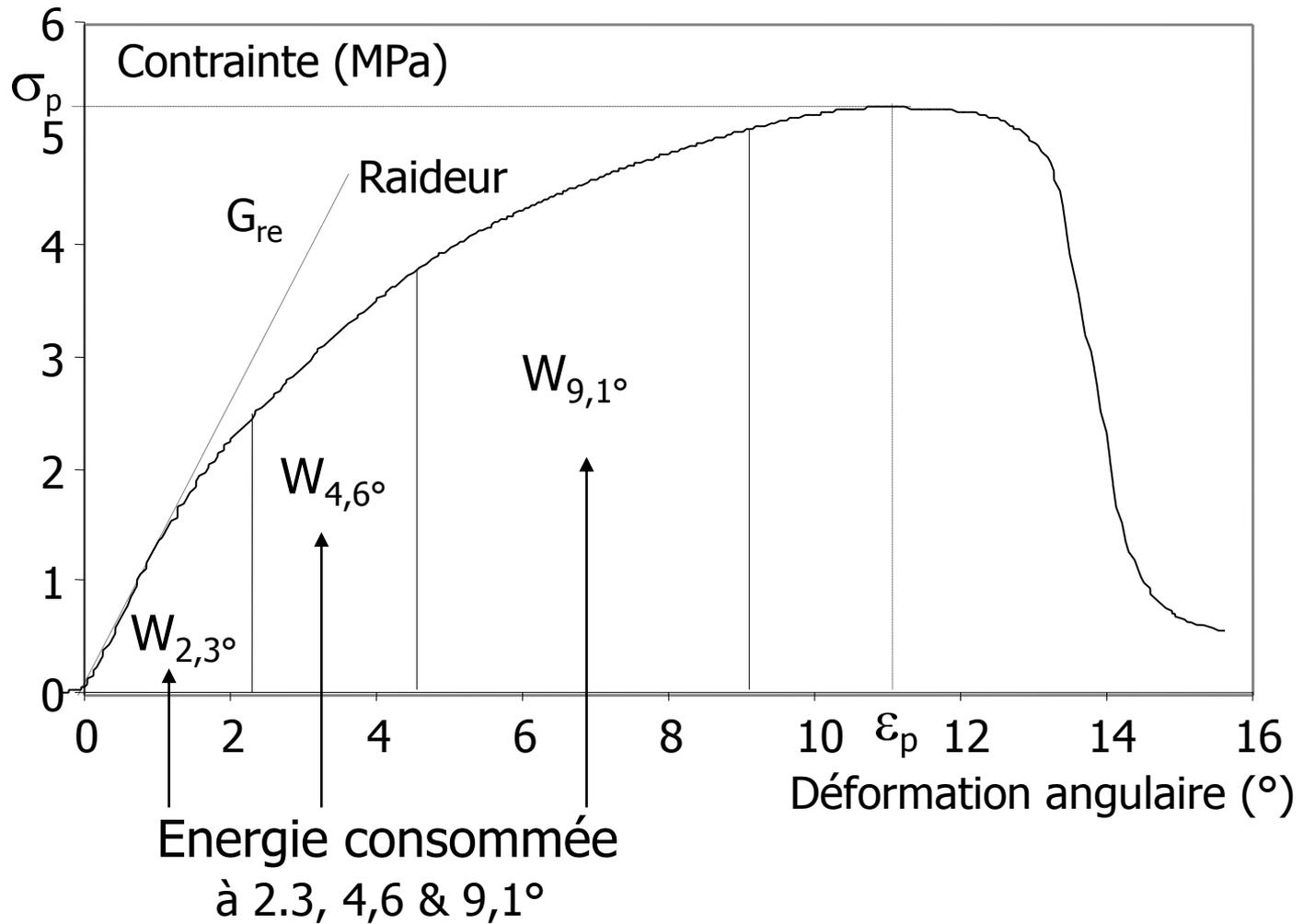


σ_p et ϵ_p : Contrainte et déformation limites d'écoulement

Essai de cisaillement

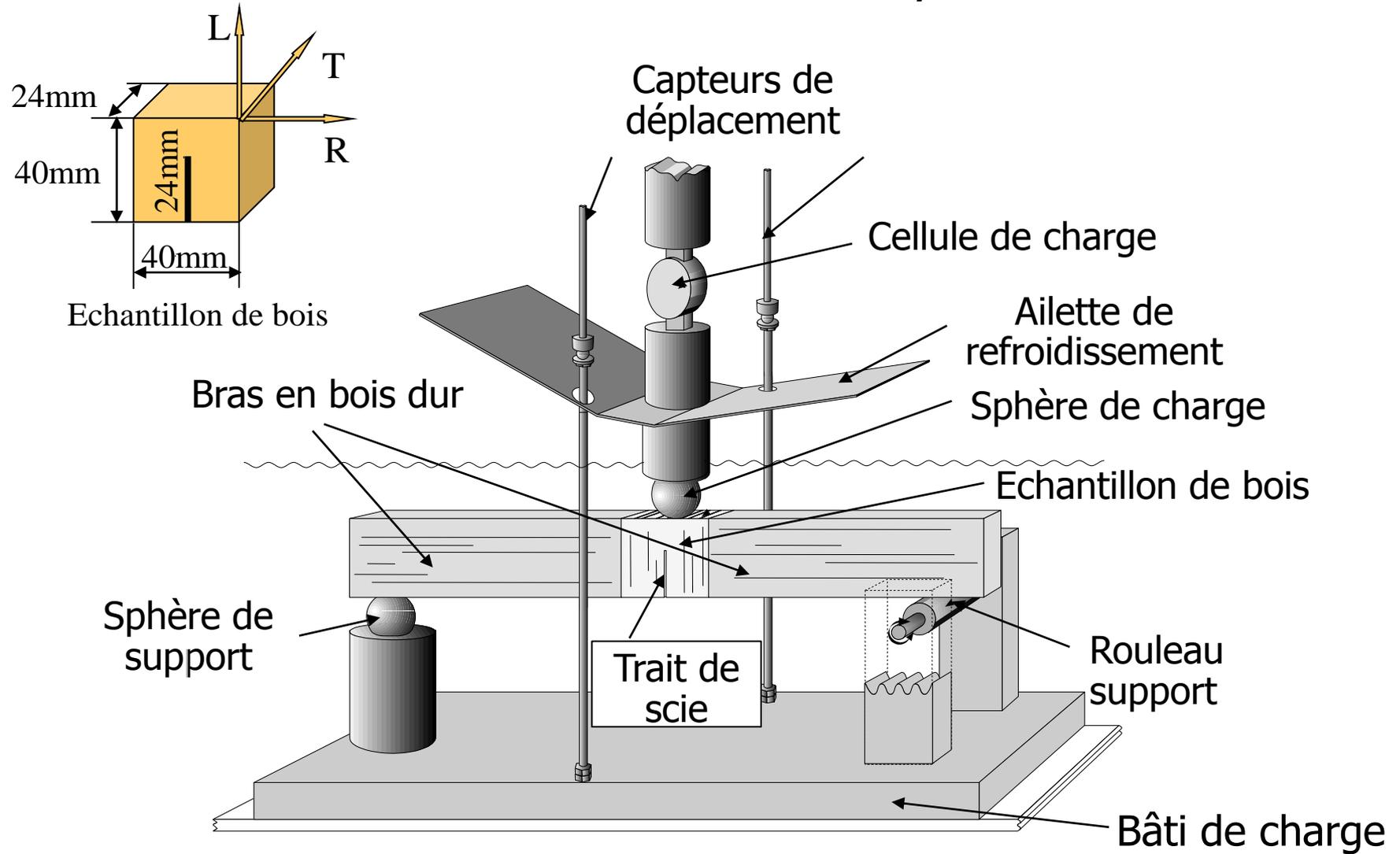


Indicateurs de l'essai de cisaillement



σ_p et ϵ_p : Contrainte et déformation limites

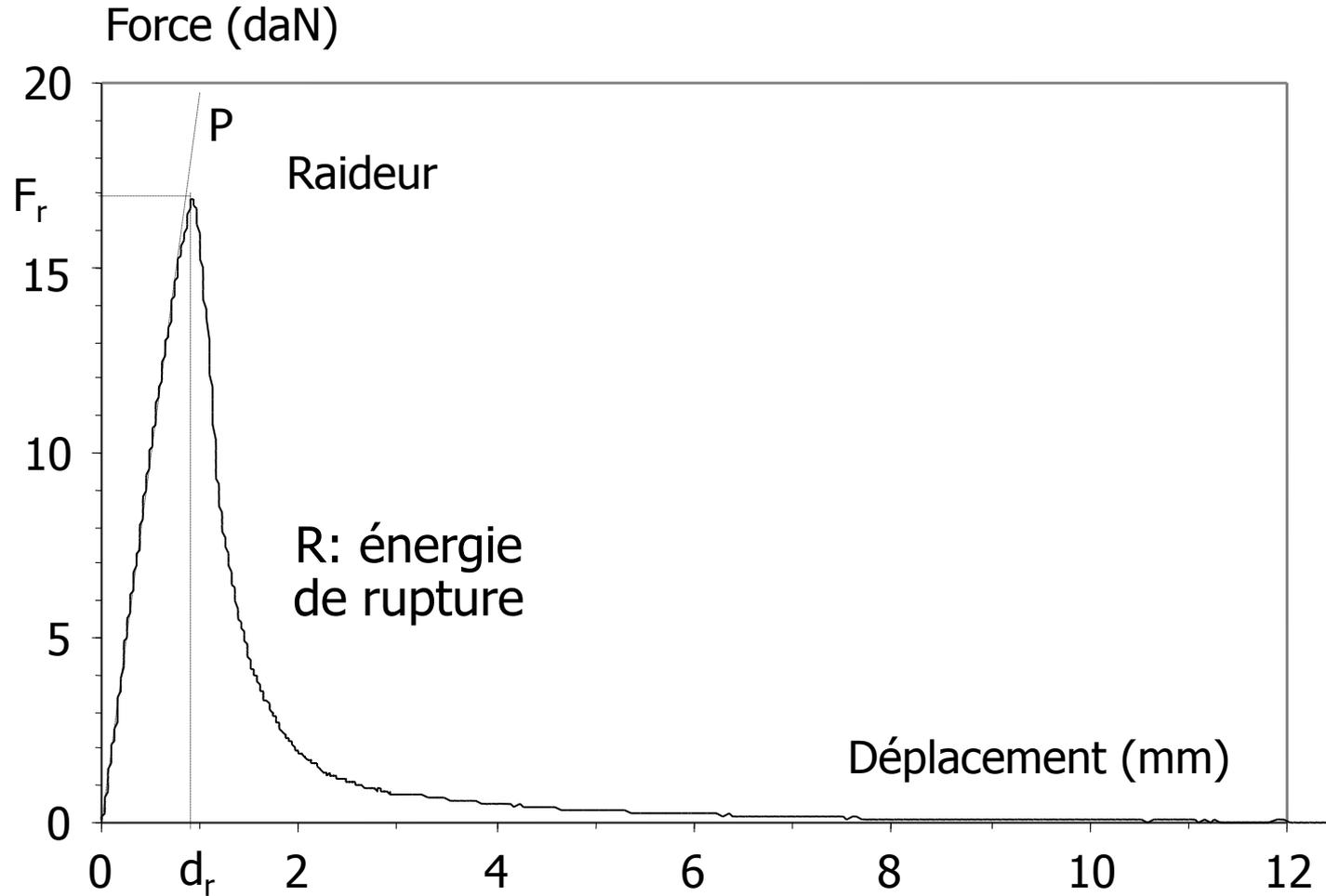
Essai de ténacité L/R



La propagation de fissure se fait dans la direction du fil

Indicateurs de l'essai de ténacité

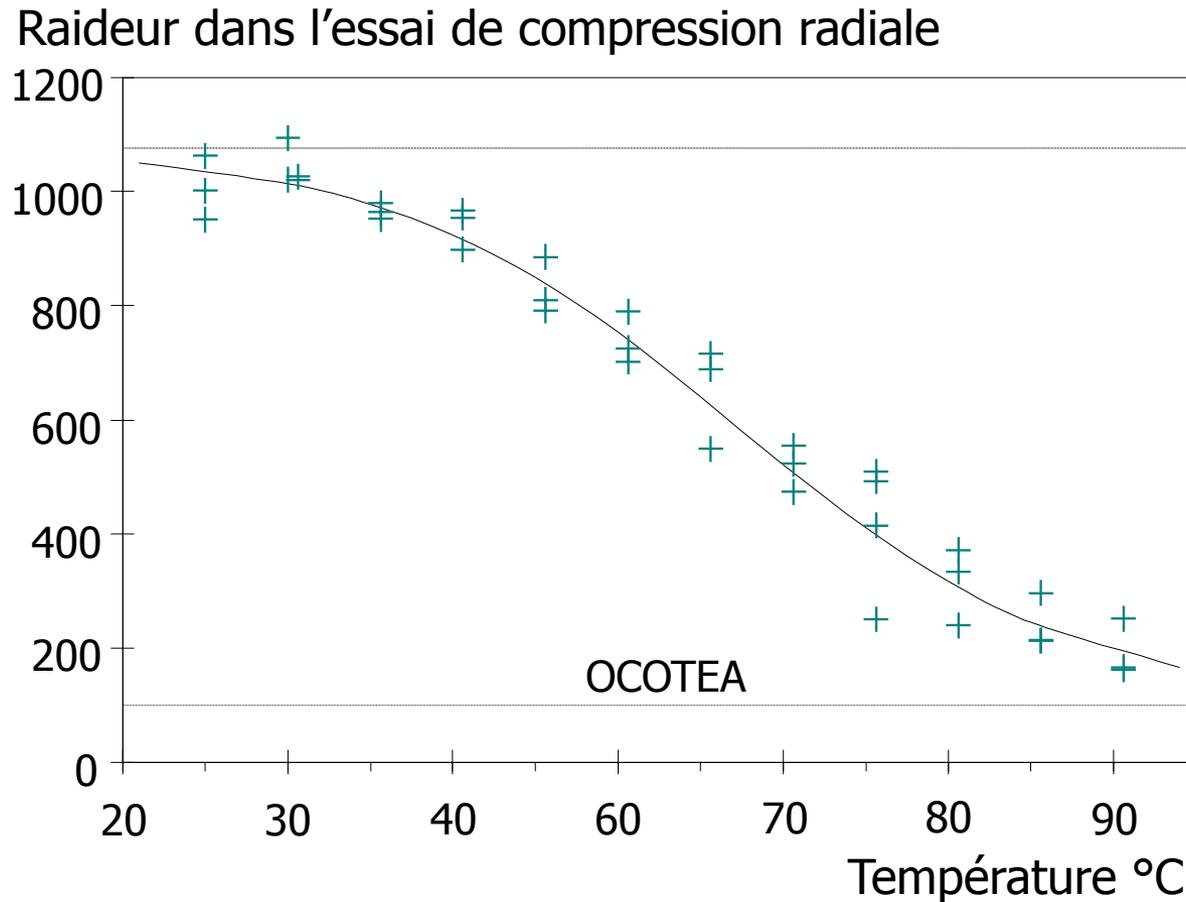
Séminaire LMGC, Montpellier, 3 juillet 2014



F_r et d_r : Force et déplacement à rupture

Evolution des indicateurs avec la température

Séminaire LMGC, Montpellier, 3 juillet 2014



Il y a une transition vitreuse vers 60°C

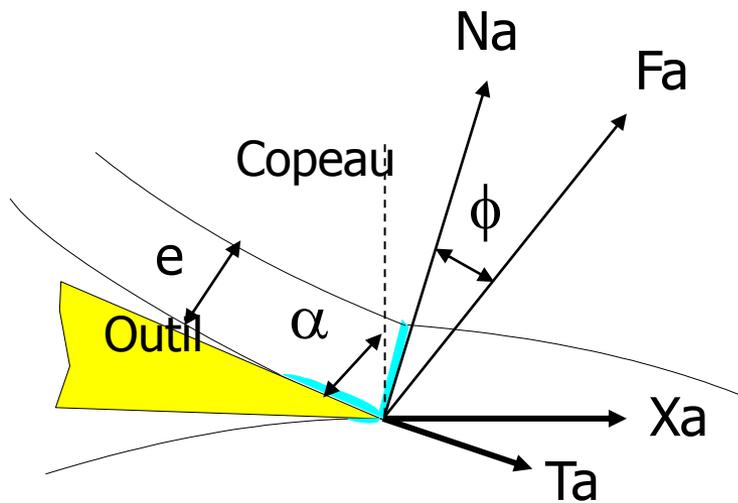
Ceci est vrai pour tous les indicateurs et toutes les essences

La température de transition varie peu mais l'ampleur de l'effet dépend de l'essence et de l'indicateur

Bilan énergétique de la coupe

(efforts par unité de largeur du copeau, G énergie de création de surface par unité de surface, D dissipation mécanique par unité de volume)

b: largeur du copeau



$$T_a = F_a \cdot \sin(\phi)$$

$$X_a = F_a \cdot \cos(\alpha - \phi)$$

Bilan des énergies concernant le copeau pour un parcours dl

Travail de la force F_a : $W_a = X_a \cdot b \cdot dl$

Energie de frottement sur le copeau:

$$W_f = T_a \cdot b \cdot dl \cdot \cos \alpha$$

Energie de création de surface: $W_s = G \cdot b \cdot dl$

Dissipation méca. dans le copeau: $W_d = D \cdot e \cdot b \cdot dl$

$$W_a = W_f + W_s + W_d$$

$$X_a - T_a \cdot \cos \alpha = (W_s + W_d) / (b \cdot dl)$$

$$F_a \cdot (\cos(\alpha - \phi) - \sin \phi \cos \alpha) = (W_s + W_d) / (b \cdot dl)$$

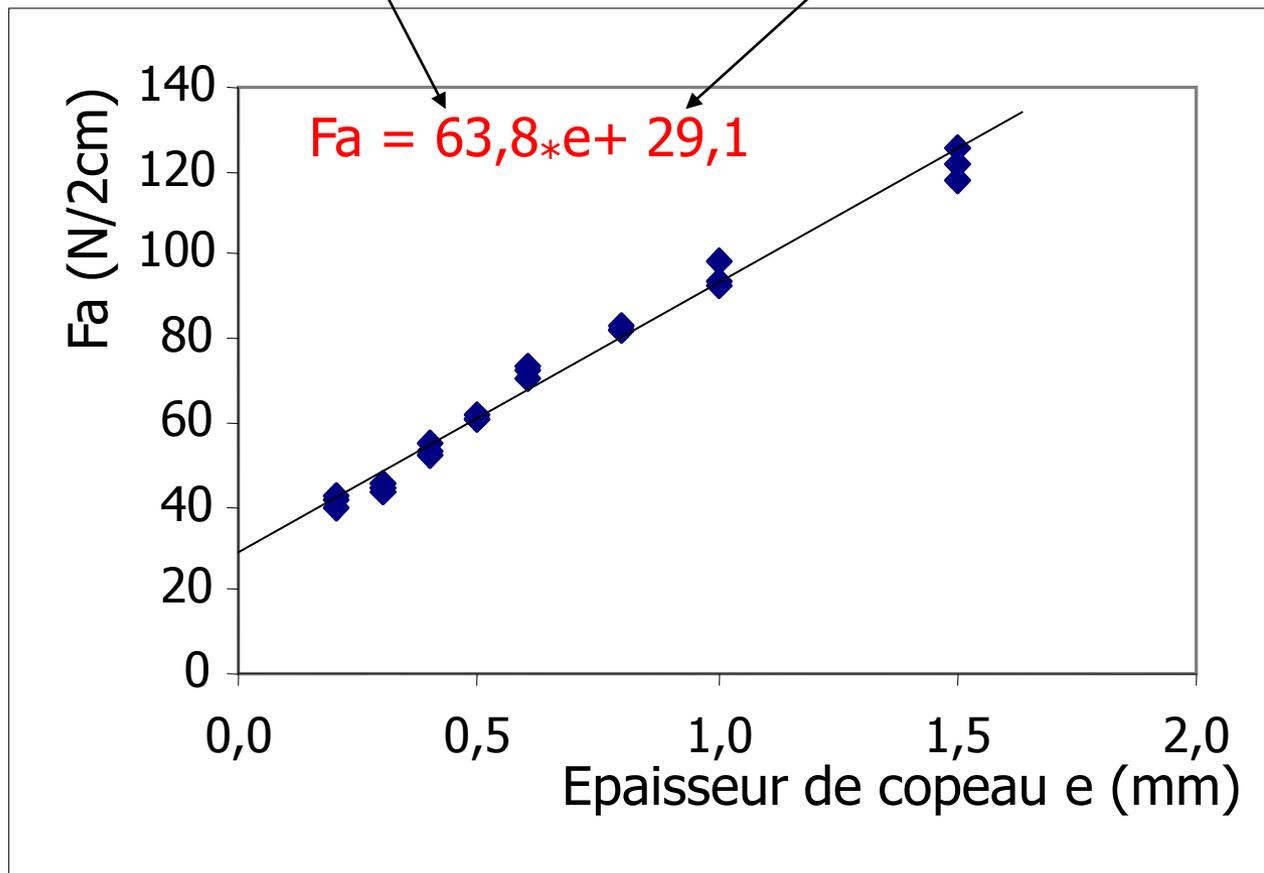
$$F_a = (D \cdot e + G) / (\cos(\alpha - \phi) - \sin \phi \cos \alpha)$$

Quand on fait tendre e vers zéro, l'énergie de dissipation mécanique dans le copeau W_d tend aussi vers zéro, mais l'énergie de création de surface W_g reste constante. F_a tend vers une valeur positive proportionnelle à G et la pente de la droite est proportionnelle D

Relation entre la force F_a et la passe pour le déroulage du grignon à 50°C

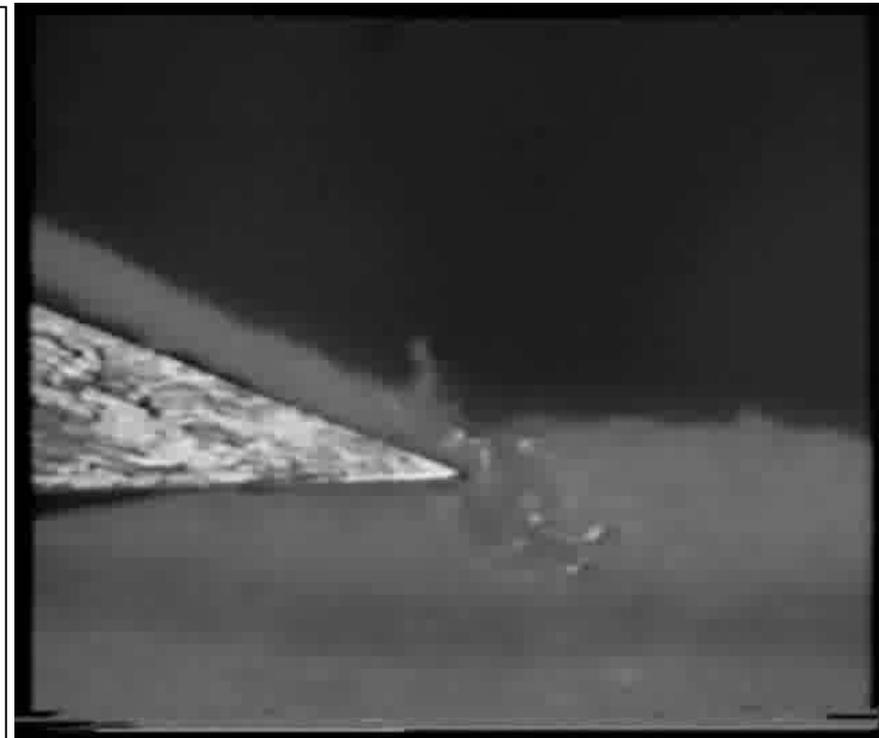
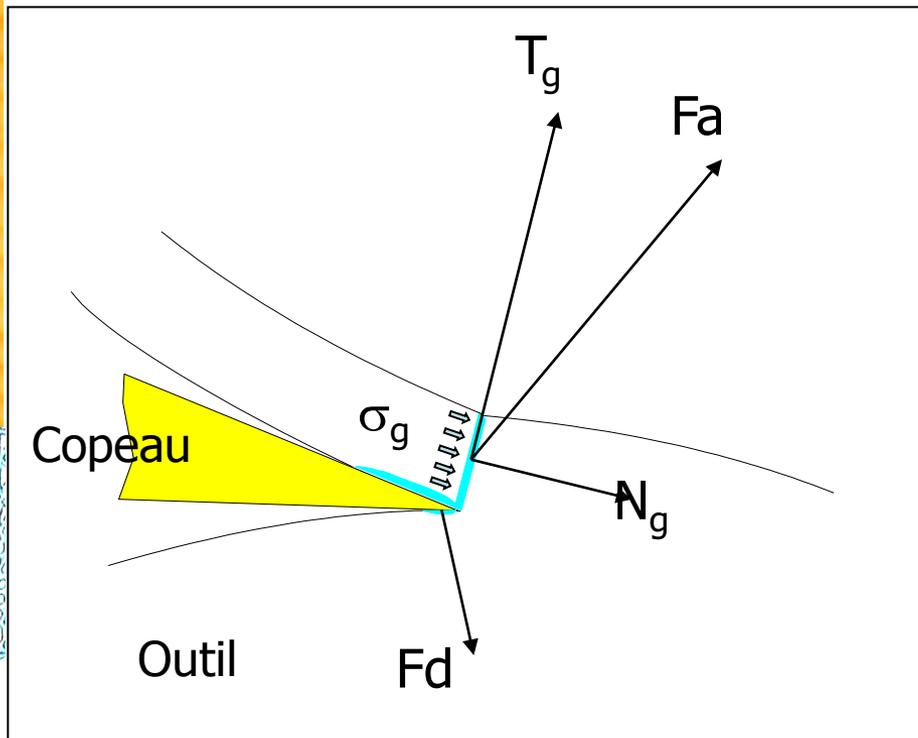
Pente liée à la
dissipation D

Ordonnée à l'origine liée
à l'énergie de rupture G



Copeau minimal: Effet Horner

Séminaire LMGC, Montpellier, 3 juillet 2014



N_g et T_g : résultantes normale et tangentielle de l'effort F_a sur le plan de cisaillement. σ_g : contrainte normale moyenne sur ce plan

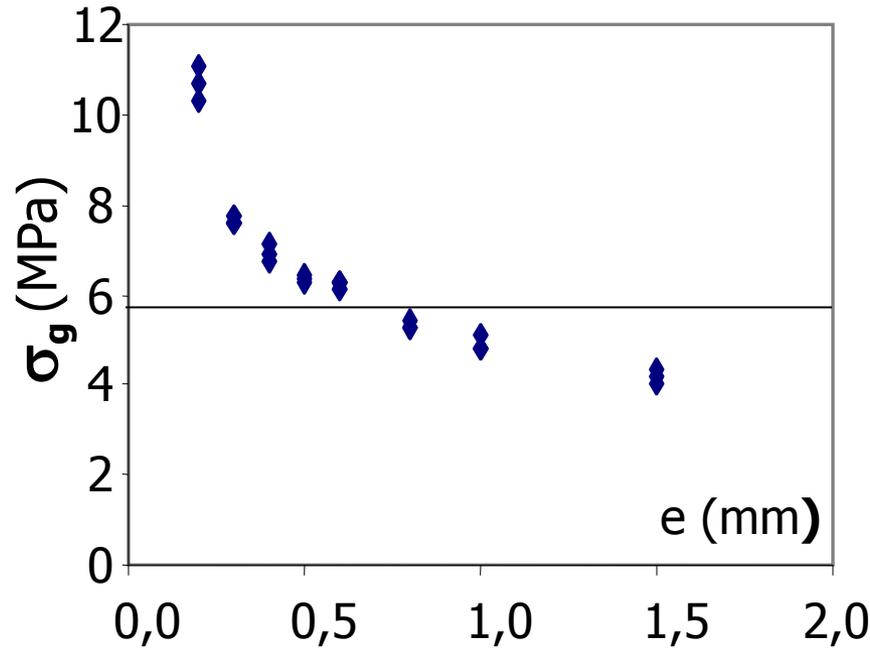
Déchirures sur les deux faces du copeau

Flambement du copeau

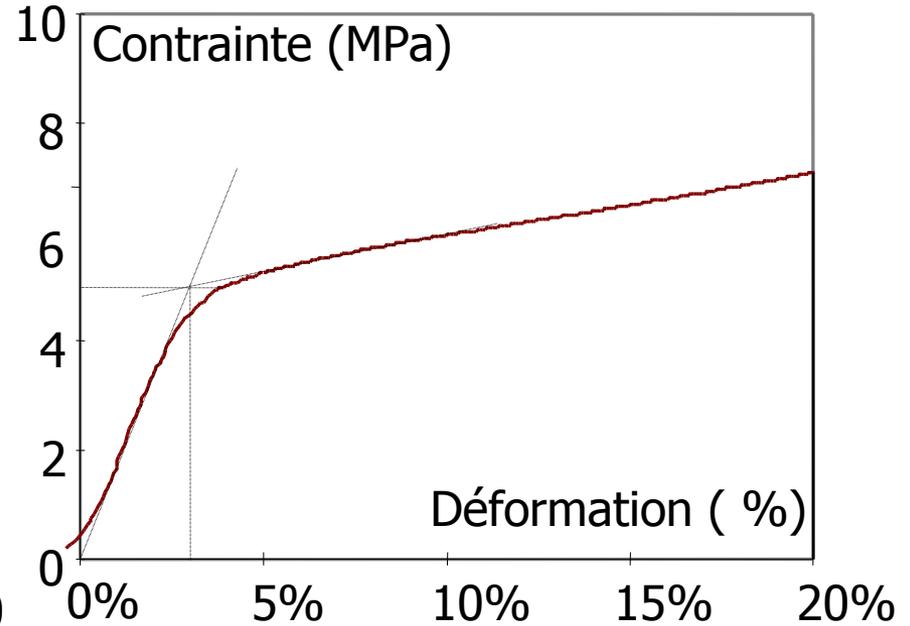
Le flambement se produit si $\sigma_g > \sigma_y$.
 $\sigma_g = N_g / e = m * F_a / e$ (e: épaisseur du copeau)



Exemple du Grignon à 50°C



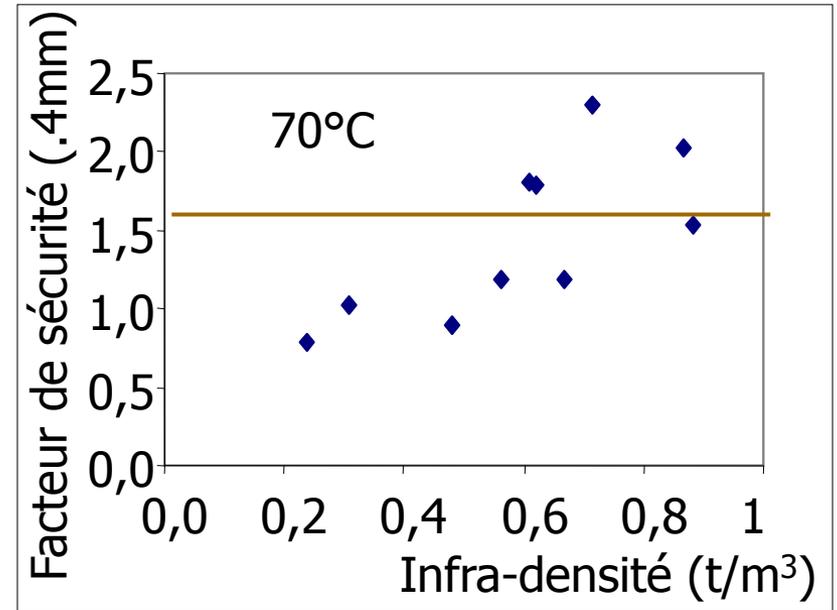
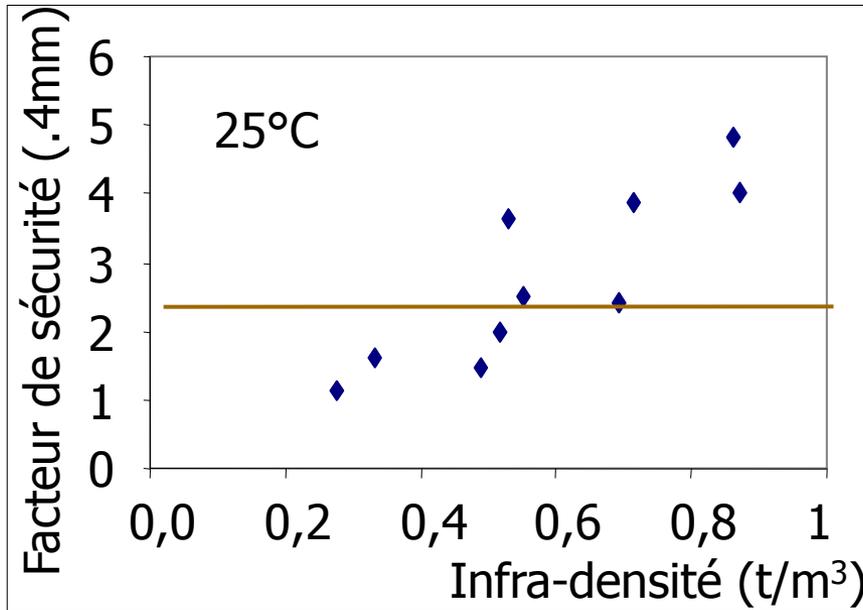
Contrainte normale moyenne sur le plan de cisaillement en fonction de la passe d'usinage (Grignon, 50°C)



Relation contrainte/déformation dans l'essai de compression (Grignon, 50°C)

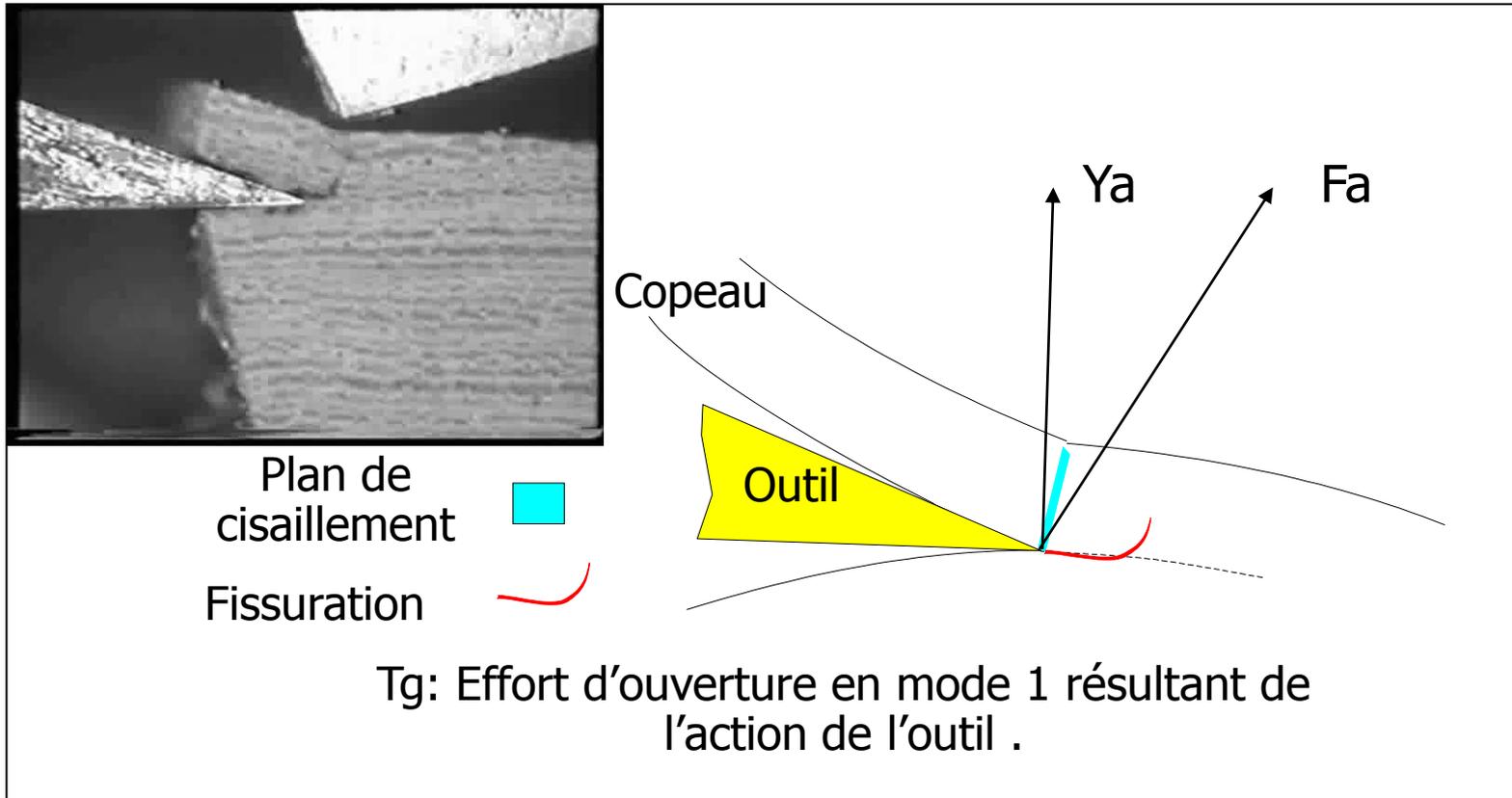
Il est difficile de produire des placages d'épaisseur inférieure à 0,3mm pour le Grignon, à 50°C

Influence de la densité et de la température du bois sur le risque d'effet Horner



Il est plus facile de produire des placages minces avec des bois denses
 Le risque de flambement du copeau augmente quand on chauffe le bois

La fissuration macroscopique

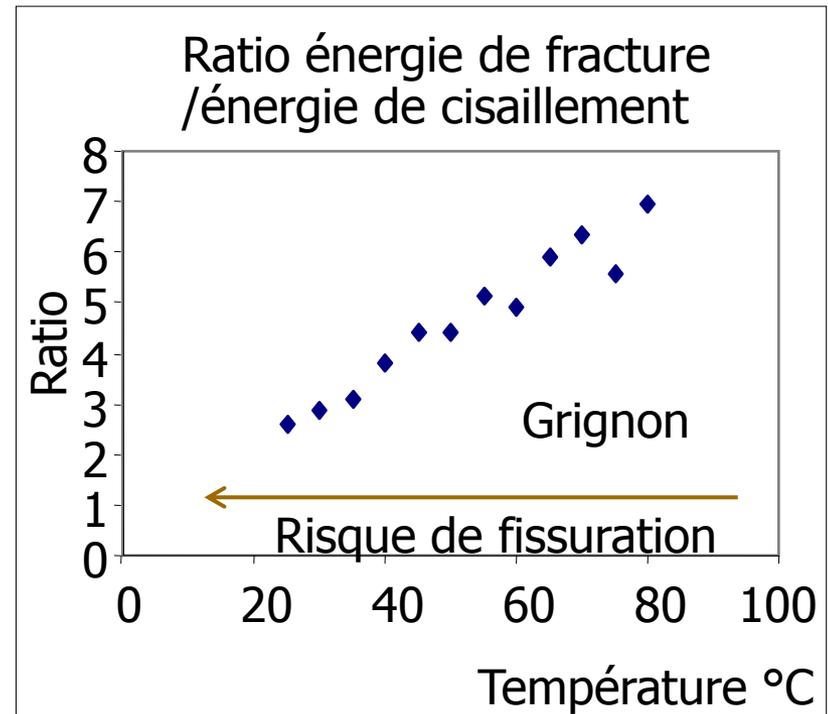
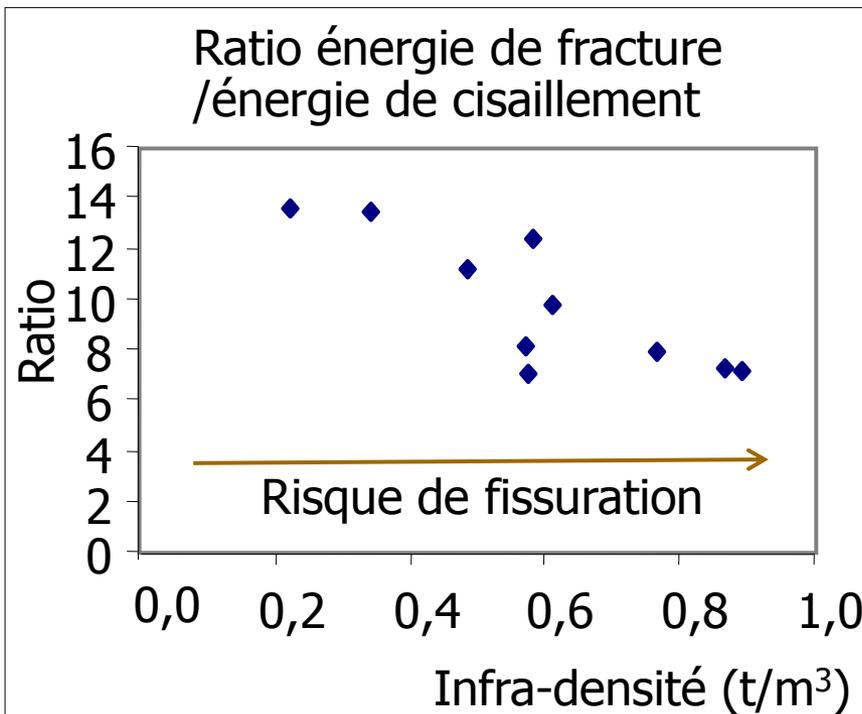


Avec un fort angle d'attaque, la résultante de l'effort F_a perpendiculaire à la surface de coupe (Y_a) représente un effort d'ouverture de fissure en pointe d'arête important.

Quand l'épaisseur du placage augmente, Y_a augmente sans que la résistance à l'ouverture de fissure change.

Facteurs d'influence sur le risque de fissuration

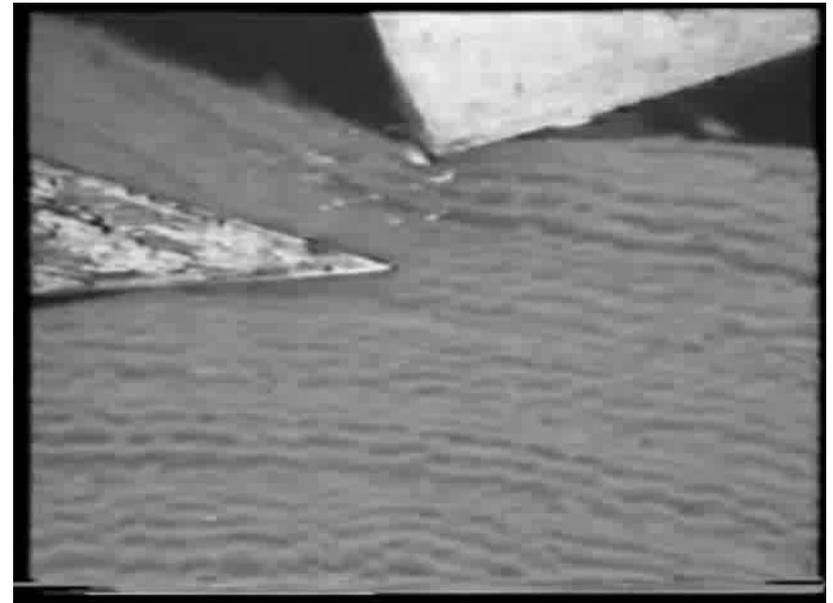
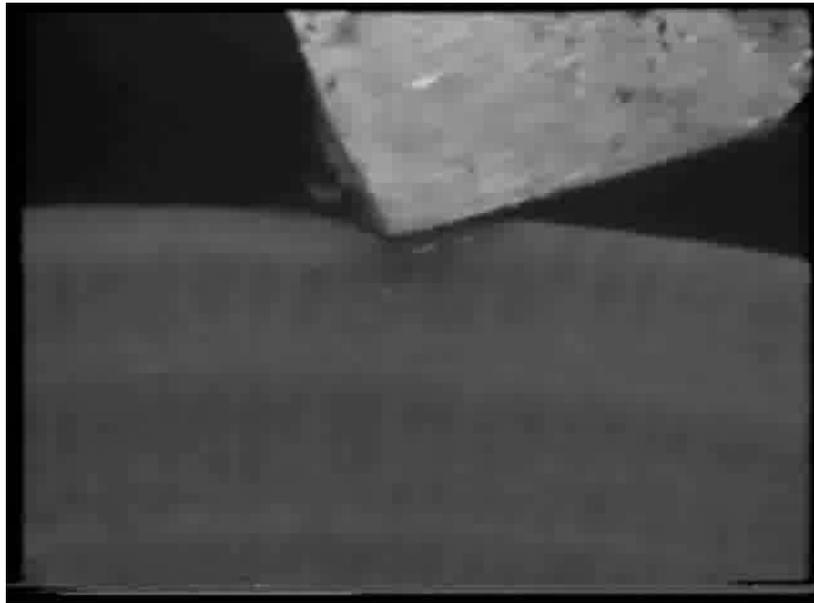
Séminaire LMGC, Montpellier, 3 juillet 2014



Le risque de fissure est un compromis entre l'énergie dissipée dans le cisaillement et l'énergie nécessaire à la fissuration. Si le ratio entre ces énergies diminue, la fissuration devrait être plus fréquente.

La probabilité de fissuration augmente pour les bois denses et elle peut être diminuée en chauffant le bois.

Rôle de la barre de pression



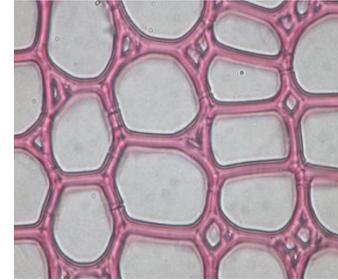
L'action de la barre de pression dépend de sa pénétration dans le bois et de la résistance en compression transverse de ce bois.

Jusqu'à une certaine épaisseur de placage, la barre peut contrecarrer l'effort d'ouverture de fissure dû à l'outil.

Le réglage de la barre (pénétration et avance par rapport à l'arête) est d'autant plus délicat que les premiers tours de déroulage conduisent à une sur (ou sous) épaisseur de la surface usinée dans l'état stationnaire d'un ordre de grandeur similaire à la pénétration affichée

Quelques enjeux industriels

- Couplage des réglages outil/barre de pression
- Phases transitoires
- Température d'étuvage
- Biseaux d'affutage
- Diversité des bois



Merci de votre attention



La fissuration macroscopique

