HAL open science

Thermocompression radiale du bois. Application au pliage de placages de peuplier destinés à l'industrie de l'emballage.

Eric Badel

To cite this version:

Eric Badel. Thermocompression radiale du bois. Application au pliage de placages de peuplier destinés à l'industrie de l'emballage.. Matériaux. 1994. hal-03294260

HAL Id: hal-03294260

https://hal.inrae.fr/hal-03294260v1

Submitted on 21 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LABORATOIRE de MÉCANIQUE et de GÉNIE CIVIL
EQUIPE BOIS

UNIVERSITE Nancy I

MEMOIRE DE D.E.A.

SPECIALITE

SCIENCES DU BOIS

THERMOCOMPRESSION RADIALE DU BOIS ET APPLICATION AU PLIAGE DE PLACAGES DE PEUPLIER DESTINES A L'INDUSTRIE DE L'EMBALLAGE

Présenté à l'E.N.G.R.E.F. Nancy le 11 Juillet 1994

par

ERIC BADEL

devant Messieurs les membres du jury :

DEGLISE
FILLIATRE
GUITARD
HALUK
KELLER
MORLIER
NEPVEU
PLUVINAGE
THIBAUT
ZOULALIAN

TABLE DES MATIERES

I - INTRODUCTION....2
II - GENERALITES - RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES....3
II - 1. Le peuplier....3
II - 2. Le pliage....3
II - 2.1 La compression transverse....3
II - 2.2 La recouvrance....4
II - 2.3 La flexion....4
III - PROCESSUS DE PLIAGE ENVISAGE....5
IV - LES ESSAIS EN TRACTION....6
IV - 1. La compression radiale....7
IV - 1.1. Matériel et méthode....7
IV - 1.2. Résultats....7
IV - 2. La traction longitudinale....9
IV - 2.1 Matériel et méthode....9
IV - 2.1.1. la préparation des éprouvettes....9
IV - 2.1.2. les essais de traction....9
IV - 2 2. Résultats....10
IV - 3. La traction tangentielle....12
IV - 3.1. Matériel et méthode....12
IV - 3.2. Résultats....13
V - LES ESSAIS DE FLEXION....15
V - 1. Matériel et méthode....15
V - 2. Résultats....15
V - 2.1. La flexion tangentielle....15
V - 2.2. La flexion longitudinale....17
VI - LE PROBLEME DU POINÇONNAGE....20
VI - 1. Matériel et méthode....21
VI - 2. Résultats....21
VII - HISTOIRE D'UN ECHEC....22
VII - 1. Matériel et méthode....23
VII - 2. Résultats....23
VIII - SOLUTION FINALEMENT ADOPTEE....23
VIII - 1. Matériel et méthode....23
VIII - 2. Résultats....24
VIII - 3. Discussion-explication....24
IX - CONCLUSION ET PERSPECTIVES....29
X - REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES....30

I - INTRODUCTION

Le bois de peuplier a une grande importance du point de vue commercial, et même s'il n'appartient pas à la classe des bois nobles, ses utilisations dans l'industrie sont considérables. Les techniques modernes de transformation ainsi que la gamme étendue des propriétés physiques et mécaniques qu'offrent les nombreux hybrides ont permis un accroissement important de la surface plantée. En effet, sa légèreté, son absence d'odeur, sa croissance rapide et l'homogénéité de son bois font de cette essence l'une des plus récoltée en France.

L'industrie de l'emballage consomme 75% de cette production. Le pôle d'activité principal de ce secteur est sans conteste celui des emballages légers destinés essentiellement aux fruits et légumes (5). Celui-ci doit faire face à la concurrence de nombreux autres matériaux. Les cartons, en particulier, font, dans ce domaine, une progression spectaculaire. Leur faculté d'être pliables est un atout considérable du point de vue commercial et la possibilité d'impression permet d'obtenir un produit dont l'esthétique est devenu un argument publicitaire très important.

Depuis plusieurs années, des sociétés proposent des petits emballages fabriqués grâce à des placages pliés. Malheureusement, les techniques employées réduisent considérablement les caractéristiques mécaniques du matériau. Cela se traduit par une fragilité de l'objet fini.

Le fil conducteur de base de ce travail est la recherche d'un moyen permettant de conférer au matériau bois la possibilité de pliage. L'idée développée ici consiste en une réduction locale de l'épaisseur d'un placage par une compression radiale importante et d'en étudier les effets sur la flexion. Ce principe s'inspire d'une technique utilisée par les cartonniers.

Le matériel utilisé est du peuplier I-214 sous forme de placages destinés à l'industrie de l'emballage léger. L'application industrielle peut prendre deux formes :

- minimiser le nombre d'éléments en bois et d'agrafes constituant les emballages actuels limitant ainsi les opérations d'assemblage longues et coûteuses. Dans ce cas, le pliage s'effectue de manière définitive lors de la fabrication.
- réaliser des innovations aptes à concurrencer les cartons et permettant la conception de nouveau emballages en bois. La solution idéale étant la mise au point d'un produit capable d'être plié et déplié.

Ce travail, de type exploratoire, doit mettre en évidence des thématiques autour desquelles de futures recherches peuvent utilement être menées, et à l'inverse, montrer que certains problèmes ne semblent pas avoir de solutions pratiques simples.

Après quelques rappels bibliographiques axés essentiellement sur la compression radiale et la flexion, nous suivrons les étapes qui nous ont mené à la mise au point d'un processus de pliage. Dans un premier temps, il s'agit de la vérification qu'une compression radiale n'altère pas de façon rédibitoire les propriétés mécaniques du matériau dans les autres directions.

Nous ferons ensuite des essais de flexion en grandes rotations sur des placages ayant été comprimés radialement dans le but d'étudier le comportement en flexion du matériau densifié.

Enfin, nous proposerons un procédé de pliage qui semble donner des résultats prometteurs et nous ferons une approche des phénomènes observés en reliant les aptitudes mécaniques du bois à certaines de ses caractéristiques anatomiques.

II - GENERALITES - RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

II - 1. Le peuplier

Du point de vue anatomique, le peuplier est un bois à pores diffus, très nombreux et dispersés régulièrement dans tout le cerne (6). Ils ont un diamètre assez petit (50 à 100 µm) qui diminue très peu dans le bois final. Leurs parois sont minces (≈7 µm). Il en est de même pour celles des fifres (2 à 4 µm) (14).

Le bois est de couleur blanche. Ce caractère revêt une grande importance du point de vue commercial et lui confère la possibilité d'être imprimé. Cependant, il a la fâcheuse tendance à développer un bois de tension qui émousse le tranchant des outils et donne aux placages un aspect pelucheux caractéristique et peu apprécié.

Plusieurs clones sont à la disposition des populiculteurs mais l'I-214, pour sa facilité d'usinage (déroulage, tranchage), est l'enfant chéri de la profession. Ses qualités mécaniques sont faibles mais relativement iintéressantes pour un bois dont la densité est la plus faible de l'essence peuplier (350 kg/m^3).

II - 2. Le pliage

Les cartonniers utilisent une technique basée sur une réduction importante de l'épaisseur. La rigidité de flexion s'en trouve localement amoindrie permettant ainsi un pliage aisé et précis.(Jayet, C.T.P. 1993 : communication personnelle)

II - 2.1 La compression transverse

La compression radiale, première étape du processus, se fait dans la direction la plus apte aux grandes déformations. La bois se comporte alors comme une structure de type nid d'abeille (7, 9). Ce sujet a largement été étudié par François et de nombreux autres chercheurs, notamment au Japon. Notre matériau a une disposition d'autant plus importante à la compression que l'opération se déroule dans des conditions très humides et chaudes. La matrice se ramollit autorisant alors des déformations plus importantes. Le caractère anatomique qu'est la porosité intervient de manière très importante sur la limite de déformation maximale (7) En effet, à partir d'un seuil ε_c, appelé *taux de*

consolidation, le bois amorce une phase de densification où la contrainte augmente de manière considérable. Cette zone correspond approximativement au moment où toutes les cavités sont comblées. Le bois se comporte alors comme un matériau dont la porosité est nulle. Ce seuil peut être estimé par la relation empirique :

$$\varepsilon_c = 0{,}9 - 1{,}07 \left\{\frac{d}{1{,}5}\right\} \qquad \text{d : densité}$$

Pour le peuplier I-214, de densité 0,35, la valeur théorique est donc environ 65%.

Les paramètres physiques que sont le taux d'humidité et la température affectent de façon considérable les courbes de contrainte-déformation en autorisant des déformations accrues pour une charge donnée (1, 12, 16)

II - 2.2 La recouvrance

A la suite d'une compression dépassant le domaine élastique, on constate l'existence d'une déformation plastique résiduelle lors du déchargement. Le phénomène selon lequel le matériau retrouve plus ou moins sa forme originelle est appelé la *recouvrance*. Elle s'exprime en deux temps : instantanément puis progressivement selon une cinétique de type exponentielle. Ces deux étapes sont fortement dépendantes des conditions opératoires (10, 13, 19): un taux d'humidité supérieur au point de saturation des fibres et une température élevée accélèrent et amplifient considérablement le phénomène (3, 8).

II - 2.3 La flexion

On ne considèrera que des flexion de placages dans l'une des directions d'orthotropie : T ou L, donc ne produisant que peu d'effet de torsion parasites. Cela nous donne la possibilité d'analyser la flexion de plaque comme celle d'une poutre chargée dans son plan. La théorie de l'élasticité linéaire appliqué aux poutres donne un aperçu de l'interêt à réduire l'épaisseur du placage. Lors de petites déformations, les contraintes longitudinales sont proportionnelles au moment fléchissant M_f (cf figure 1) (22).

$$\varepsilon_{xx} = \frac{y}{R} \quad \text{or} \quad \sigma_{xx} = E\ \varepsilon_{xx} = \frac{Ey}{R}$$

$$M_f = \int_S y\sigma_{xx} dS = \int_S \frac{Ey^2}{R}\ dS = \frac{EI}{R} \quad \text{donc} \quad R = \frac{EI}{M_f} \quad \text{avec} \quad I = \int_S y^2 dS$$

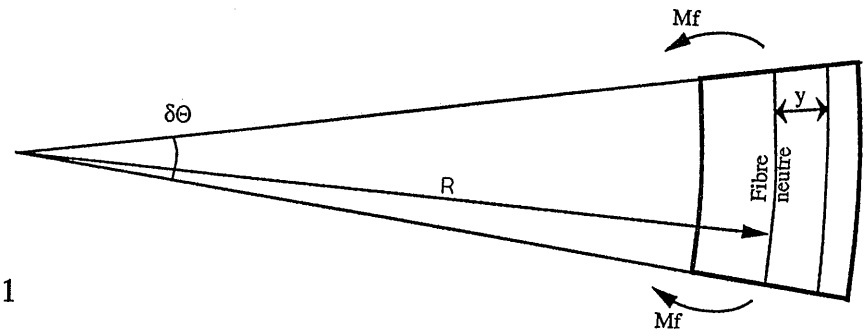


figure 1

Le rayon de courbure de la ligne moyenne de la poutre devient directement proportionnel à la quantité EI appelée *rigidité de flexion*. Pour une poutre rectangulaire, I vaut $bh^3/12$. En réduisant l'épaisseur de moitié, on divise donc I par 8. Cependant, la compression radiale de 50% double le module d'élasticité atténuant ainsi l'effet. Ainsi, pour un effort donné M_f, le rayon est -il divisé par 4.

Le bois est peu apte à de grandes déformations en traction. Le cintrage industriel s'effectue donc actuellement grâce à une méthode de formage qui vise à éviter les efforts sur la face tendue. Le principe consiste à plaquer une lame métallique destinée à absorber les contraintes en traction (cf figure 2) (20, 21). L'épaisseur de cette lamelle est calculée de façon à remonter la ligne neutre le plus près de la face en tension (cf figure 3). Les hauts niveaux de déformation en compression engendrés sur la face opposée sont atteints par le biais du micro flambement des parois cellulaires. Le rayon de courbure pouvant être atteint se calcule par :

$$\frac{1+\varepsilon_t}{R+h} = \frac{1+\varepsilon_c}{R} \Rightarrow R = h\frac{(1-|\varepsilon_c|)}{|\varepsilon_t|+|\varepsilon_c|}$$

ε_c : déformation maximum en compression
ε_t : " " en traction

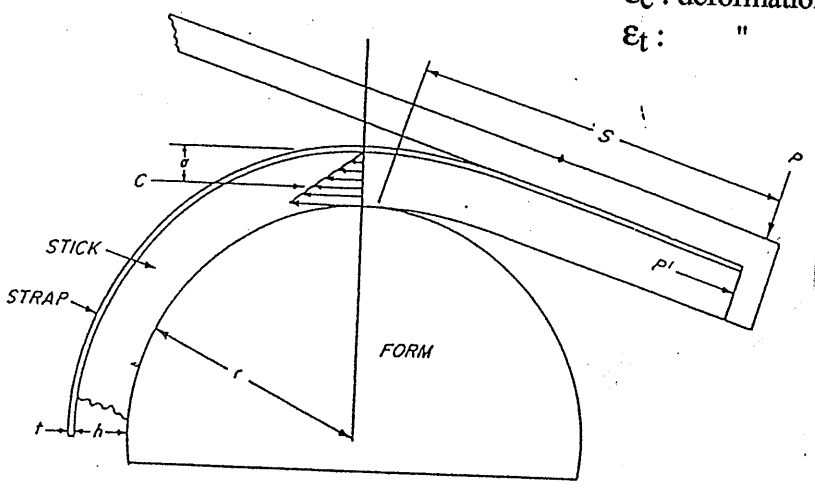


figure 2

Principe du formage

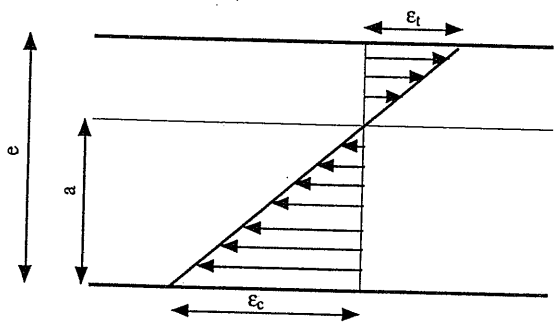


figure 3

Evolution des déformations en flexion *grandes rotations*

III - PROCESSUS DE PLIAGE ENVISAGE

Le processus que nous nous proposons d'étudier consiste en une réduction de l'épaisseur du placage dans le but de diminuer fortement la rigidité de flexion. Cette opération s'effectue grâce à un poinçon cylindrique. Pour éviter le problème incontournable de la recouvrance, la flexion, dite en grandes rotations, est réalisée autour de ce même outil (cf figure 4). Nous nous proposons ensuite d'étudier les paramètres physiques intervenant lors du processus (température, humidité, vitesse...) et les caractéritiques anatomiques du bois qui favorisent ou non les déformations.

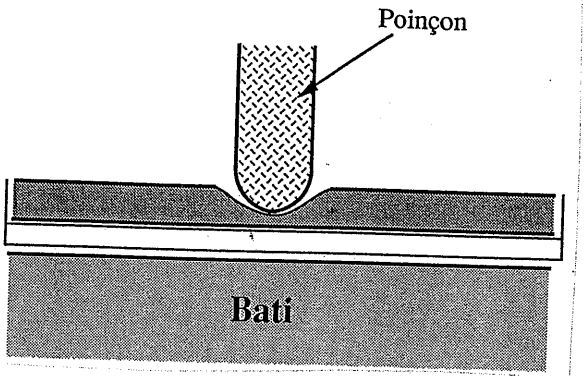
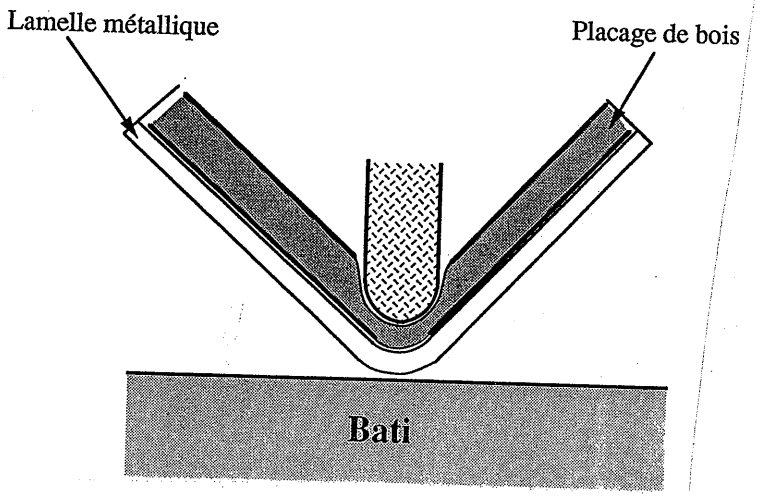


figure 4

1er temps : réduction d'épaisseur



2e temps : flexion de type formage

IV - LES ESSAIS EN TRACTION

Nous avons tous un jour ou l'autre réalisé la flexion d'une planchette de cagette.pour la casser. Le phénomène d'endommagement est à première vue la rupture en traction. En réalité, la dégradation s'amorce en premier lieu dans la zone en compression mais elle est pratiquement pas décelable à l'œil nu. Lors de la flexion en grandes rotations, la contrainte en traction devient très élevée pour compenser le déplacement de la ligne neutre vers la face tendue (cf figure 5). Ceci est du au comportement plateau du bois en compression dans la zone plastique (7, 15, 22).

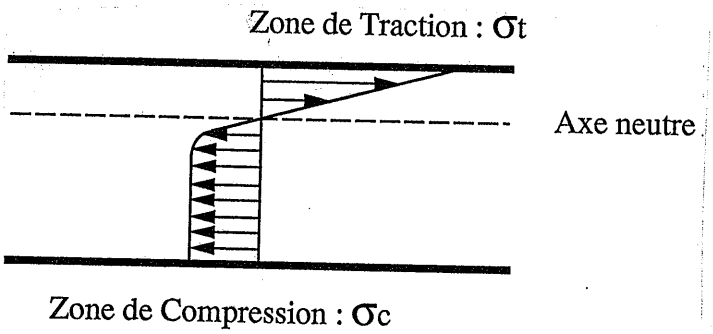


figure 5 : distribution des contrainte en flexion *grandes rotations*

L'objectif de ce chapitre est de vérifier qu'une compression radiale importante n'altère pas trop gravement les qualités mécaniques dans les autres directions. Le caractère testé ici est la contrainte de rupture en traction. Cette propriété a été retenue pour son importance dans le processus de flexion. Nous parlerons de *contrainte de rupture spécifique* pour les éprouvettes comprimées. Elle correspond à la force mesurée ramenée à la section initiale du placage. Le processus consiste à comprimer radialement un certain nombre de placages puis à les tester en traction longitudinale ou tangentielle.

IV - 1. La compression radiale

IV - 1.1. Matériel et méthode

La compression est réalisée grâce ce une presse à vis de marque Instron équipée d'une cellule permettant le contrôle de la force et capable de supporter une charge de 5 tonnes. Les placages sont comprimés à l'état saturé (H≈ 200%) et chaud. Le chauffage s'effectue dans un four à micro ondes (emballés dans une feuille de papier cellophane pour éviter tout séchage). Toutes les compressions sont réalisées à une vitesse constante de 50 mm/mn. Une moitié des lots est comprimée à 50%. Les autres le sont à 63%.

Suite à la sollicitation radiale, le phénomène de recouvrance très important que nous voulons éviter nous impose de pratiquer un séchage sous contrainte. Celui-ci a lieu dans un four pendant 48 h à 105°. Cette mobilisation du matériel implique d'opérer par lot d'une vingtaine de plaquettes de dimensions 70*170 mm entre lesquelles est intercalé une feuille de cellophane qui se révèle nécessaire pour la séparation ultérieure des éléments du bloc une fois densifié (cf photo n° 1). Le contrôle de la force se fait grâce à un enregistreur permettant de tracer la courbe force-temps. Connaissant la section et la vitesse constante de déplacement, on peut donc remonter au diagramme contrainte-déformation.

IV - 1.2. Résultats

Les compressions se sont déroulées sans ruine notable du matériau jusqu'à 63%. Les courbes obtenues sont cohérentes avec la littérature à ce sujet, à savoir l'existence d'une zone élastique suivie d'une partie plateau et pour finir, la densification (cf figure 6). La forme de nos courbes est différente (déformations importantes pour des efforts moindres) en raison de la température et du taux d'humidité élevés auxquels sont réalisés les essais (les courbes normalisées étant effectuées sec à l'air, H≈12% et à 20°C).

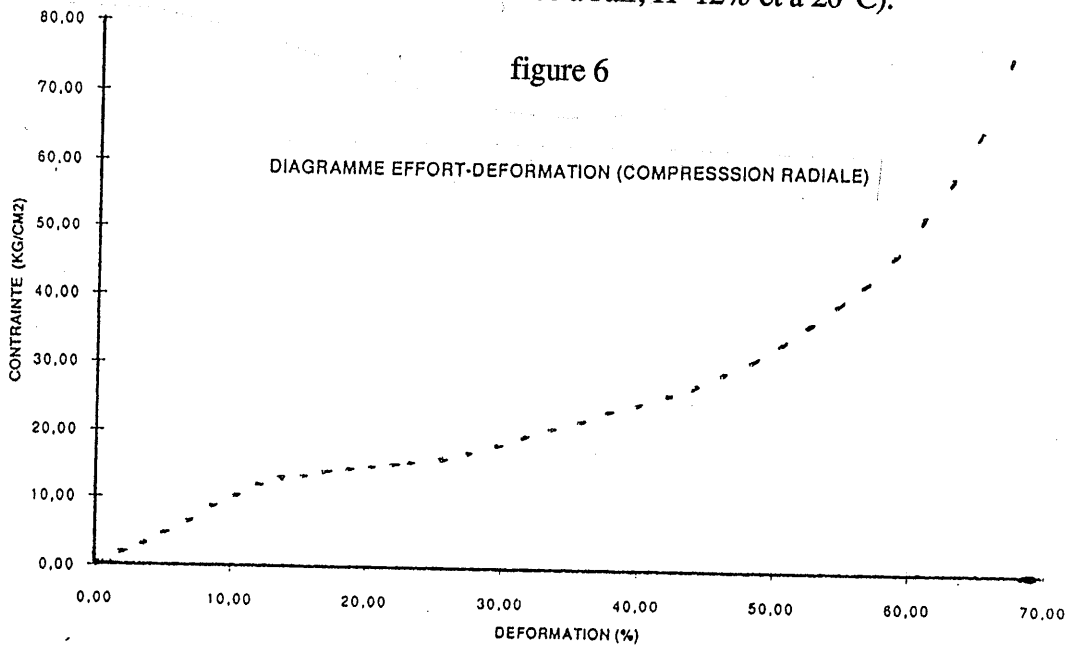


figure 6

Une compression à 70% a été réalisée. L'utilisation du phénomène de relaxation des contraintes a, dans ce cas, été nécessaire pour ne pas dépasser les capacités de la presse. Elle a montré la limite à partir de laquelle le matériau se dégrade de manière importante et irréversible dans la direction tangentielle (photos n° 2).

On peut parler ici d'écoulement plastique. Notre matériau est très inadapté pour ce genre de phénomène. Cependant, lors de la phase de densification, le bois a tendance à se comporter comme un matériau quasi incompressible (cf figure 7). Un écoulement transverse suit et la dégradation intervient rapidement sous l'effet de trop grandes déformations.

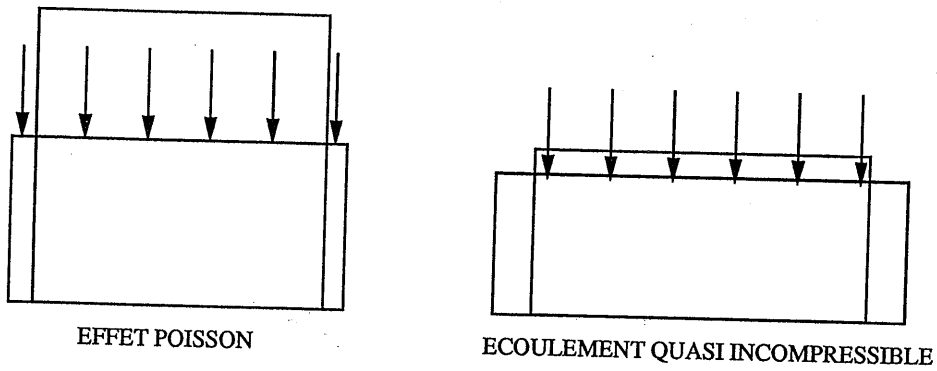


figure 7

On parlera ici de pseudo effet Poisson. Elle se fait d'autant plus volontiers dans la direction tangentielle que le matériau y est beaucoup moins rigide que dans le sens longitudinal. Dans la zone élastique, on trouve classiquement pour le peuplier un rapport de 1 à 20 entre les coefficients de Poisson pour les 2 directions (12) :

$\nu_{RT} \approx 0,7 \qquad \nu_{RL} \approx 0,04$

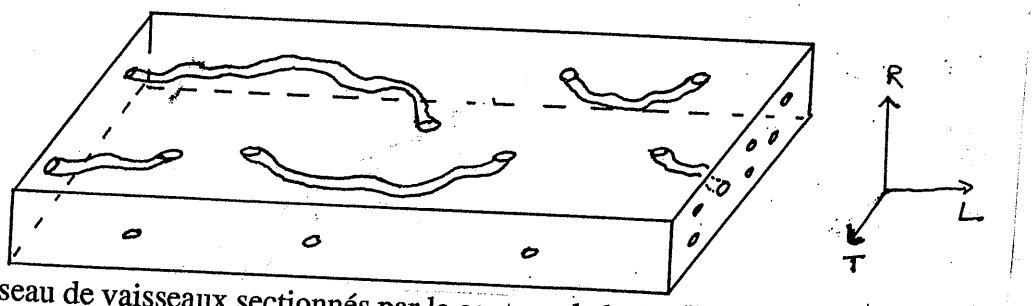
Ces chiffres n'ont aucune réalité dans la zone plastique où nous opérons mais donnent un ordre d'idée des différences de comportement. La déformation n'est pas supportée dans la direction tangentielle qui se trouve être la plus fragile (fissuration...). La rupture intervient alors. (Dans notre cas, nous pouvons mesurer une déformation transverse d'environ 9% pour une compression radiale de 60%)

La deuxième observation que l'on peut faire est que la compression n'est pas uniforme dans toute l'épaisseur. En effet, les placages situés aux abords de la presse sont plus fins que ceux positionnés au centre du lot. Nous attribuons ce phénomène au effets de bord(frottements sur les plateaux de la presse + chauffage intense). Ceci avait déjà été remarqué par Arima lors de ses expérimentations (1).

Enfin nous avons remarqué que la durée du séchage sous contrainte est beaucoup plus importante dans le cas d'un lot de placages comprimés superposés les uns sur les autres que dans le cas d'un pavé massif de mêmes dimensions. Il est difficile d'en expliquer la raison mais on peut avancer l'hypothèse de la discontinuité du matériau et du nombre important d'interfaces. Le papier cellophane disposé entre les placages peut être mis en

cause et ralentir les transferts mais on peut avancer une autre hypothèse : lors du processus de déroulage, le couteau sectionne un grand nombre de vaisseaux et autres "tuyauteries" provoquant alors de nombreuses ruptures de colonnes (cf figure 8). Nous serions donc en présence d'un réseau de canalisations de longueur assez faible. Ceci pourrait expliquer la présence de poches d'eau libre entre les placages dont l'évacuation serait rendue plus difficile lors de la compression radiale ou de la première phase du séchage, celle de la migration capillaire.

figure 8



Réseau de vaisseaux sectionnés par le couteau de la dérouleuse

IV - 2. La traction longitudinale

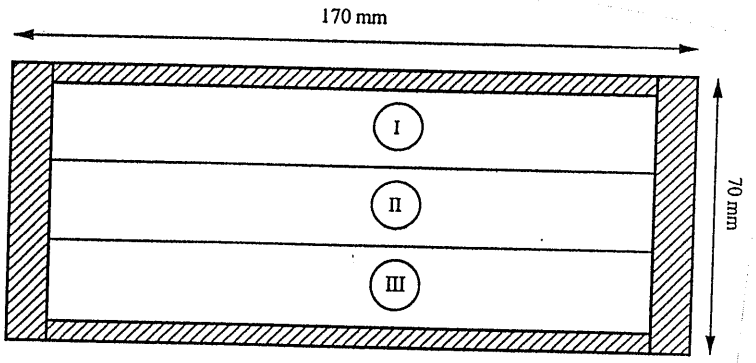
IV - 2.1 Matériel et méthode

Les placages sont issus d'une fabrique d'emballages légers, la société Sud-Europe Emballages, l'une des plus importantes en France dans ce domaine. La provenance, (position dans l'arbre), n'a malheureusement pas pu être contrôlée mais l'échantillonnage nous pousse à penser que la probabilité pour que les planchettes ne soient pas toutes issues du même arbre, voire du même billon, est faible. Leur épaisseur, constante, est de 3,5 mm.

IV - 2.1.1. la préparation des éprouvettes

Des plaquettes comprimées, ne sont tirées que 3 éprouvettes de dimension 20*150 mm, les côtés étant soigneusement épurés afin de s'affranchir des effets de bord (cf figure 9). Dans le cas ou un doute subsiste, seules 2 éprouvettes sont taillées (cf photo n°.3)

figure 9



IV - 2.1.2. les essais de traction

Les essais de traction sont réalisés sur la même machine Inston. Les éprouvettes sont marquées pour matérialiser l'emplacement des mors. Une zone de sécurité est fixée à proximité de ces derniers : tout essai dont la rupture se produit dans ce secteur est éliminé

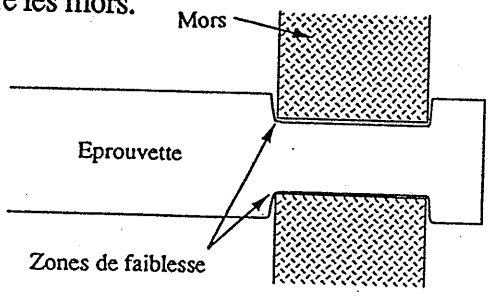
du calcul. A ce titre, il faut remarquer que les éprouvettes non comprimées ont du être usinées grâce à un gabarit. (cf photo 3).

La force F nécessaire à la rupture est directement lue sur une table traçante. Nous appelons *contrainte de rupture spécifique* cette force ramenée à la section avant compression.

IV - 2 2. Résultats

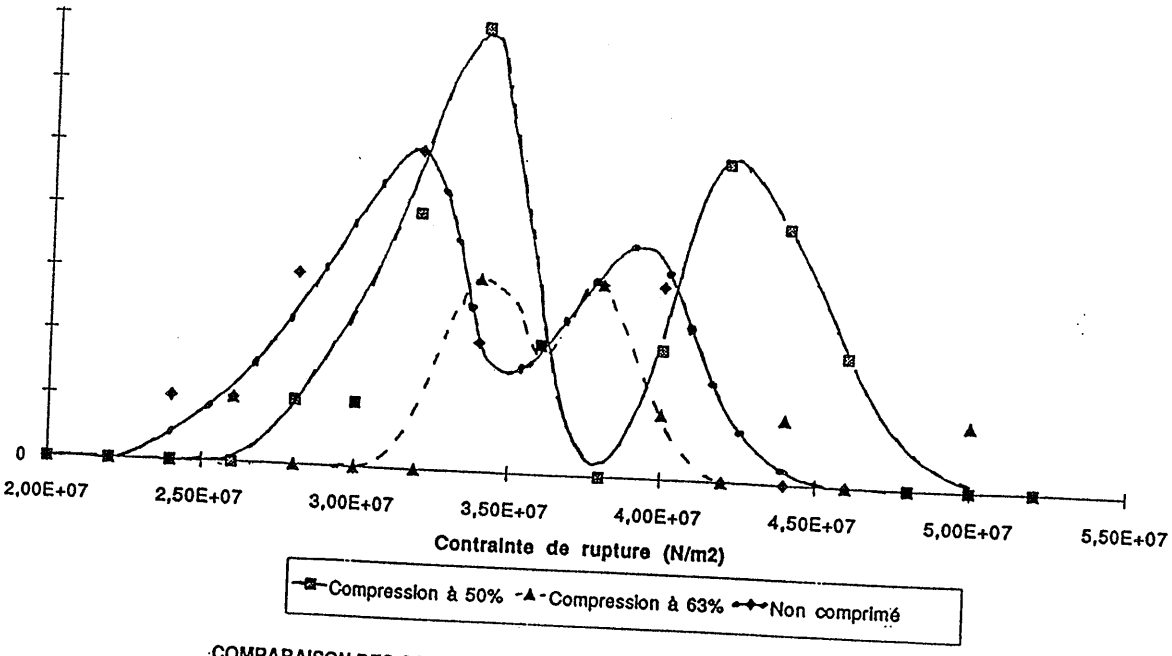
L'essai de traction d'éprouvettes non comprimées n'est pas une expérimentation aisée. Le problème de la fixation par les mors est d'autant plus important que notre bois est très poreux et donc facilement compressible dans la direction radiale (cf figure.10). Un serrage trop important comprime et endommage rapidement le matériau. La rupture intervient alors à 100% entre les mors.

figure 10



A l'inverse un serrage trop lâche permet à l'éprouvette de glisser et l'essai se solde, là aussi, par un échec. Pour pallier cet inconvénient nous avons usiné les éprouvettes dans le but d'imposer à la rupture de s'effectuer dans une certaine portion de section constante (cf photo n° 3). Les mesures ont confirmé que les éprouvettes n'ont pas subit de dégradation importante lors de la compression radiale (cf figure 11). La charge de rupture est d'environ 31 MPa. Ces valeurs sont cohérentes avec celles de la littérature (4). On retrouve une corrélation classique avec la densité (cf figure 12).

figure 11



COMPARAISON DES CONTRAINTES DE RUPTURE DES LOTS AYANT SUBI DIFFERENTS TAUX DE COMPRESSION

Photo n° 1 : Lot de placages entre les plaques de la presse avant compression

Photo n° 2 : Endommagement tangentiel du à une forte compression radiale

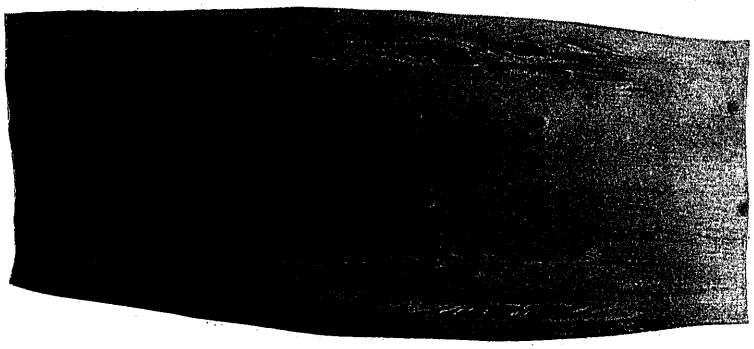


Photo n° 3 : Rupture en traction longitudinale de placages non comprimés

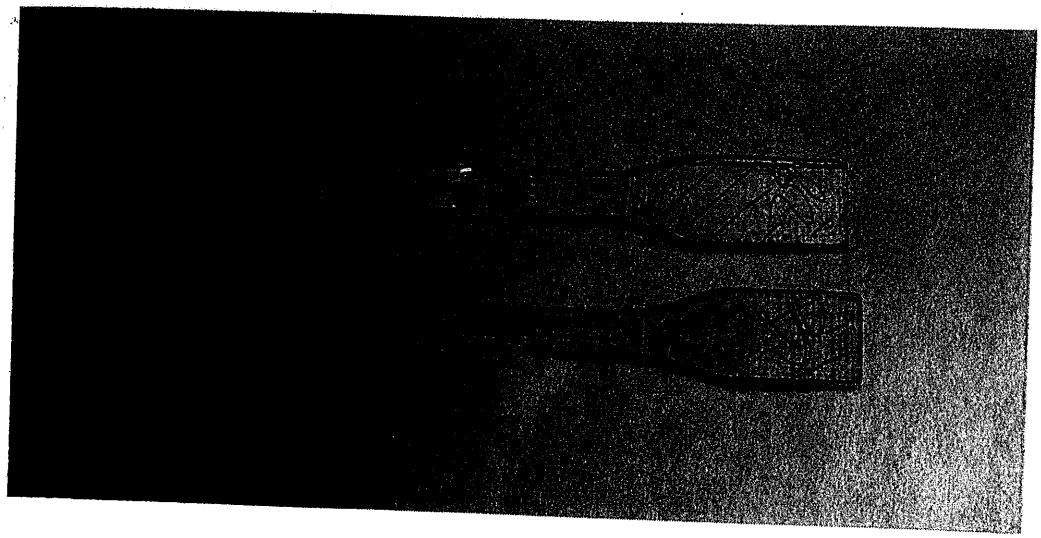
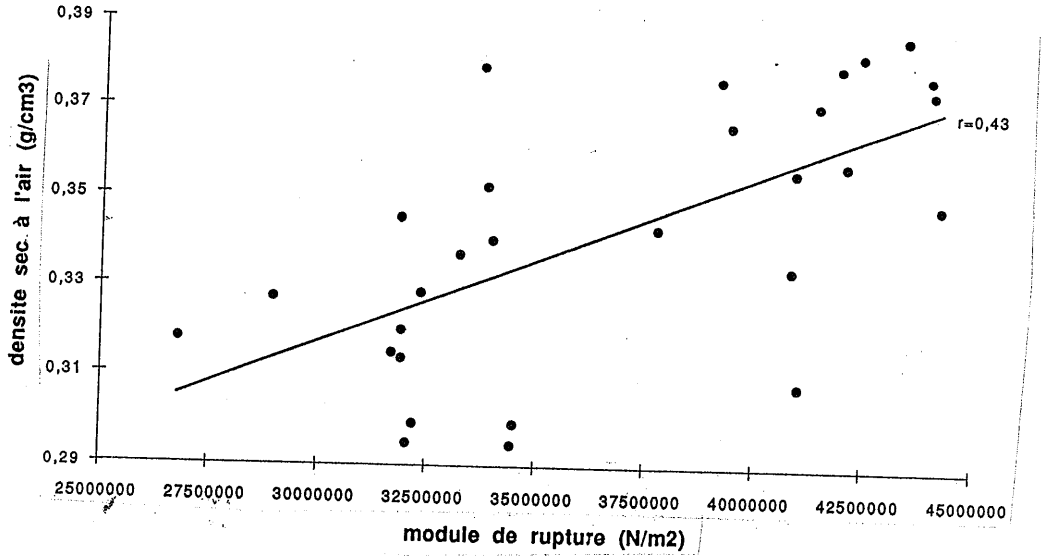


figure 12

Relation densité-rupture



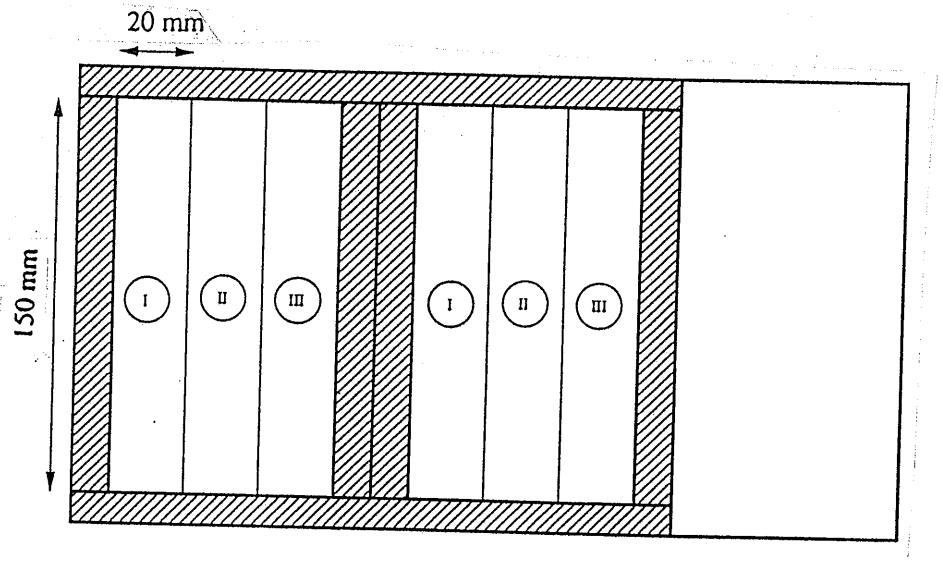
Les parties présentant des zones de bois de tension flagrante (placage pelucheux) sont éliminées du calcul mais l'on peut souligner que leur résistance est faible en regard à leur densité. Ce phénomène n'est pas encore bien expliqué mais il semble que la mauvaise cohésion entre le réseau de cellulose de la couche G et la couche secondaire S_2 de la paroi soit en partie responsable de cette fragilité. Celle-ci s'exprime d'autant plus que les manipulations s'opèrent à l'état sec à l'air. Les retrait engendrés par ce séchage étant différents pour les deux milieux (25), la cohésion n'en est qu'amoindrie.

IV - 3. La traction tangentielle

IV - 3.1. Matériel et méthode

Les placages sont réalisés sur la dérouleuse du laboratoire permettant ainsi un contrôle de la provenance. Dans un souci de comparaison plus rigoureux, les éprouvettes sont taillées pour que chaque échantillon pressé puisse être comparé à son homologue non comprimé. La feuille de déroulage est donc découpée en trois parties dans sa largeur : la première destinée à être comprimée radialement, la deuxième destinée à être son témoin de comparaison et la dernière destinée à des observations diverses telles que la mesure de densité. Trois éprouvettes sont taillées dans les deux premières parties (cf figure 13).

figure 13



IV - 3.2. Résultats

Les résultats d'une campagne d'essais de traction tangentielle de placages fissurés est toujours délicate à interpréter. Les efforts en traction ne se répartissent plus dans toute la section mais seulement dans la zone non fissurée : les efforts ne peuvent être transmis entre les deux lèvres de la fissure (il y a discontinuité du matériau). La rupture doit donc théoriquement se produire à l'endroit où la section efficace est la plus faible, c'est-à-dire où la fissuration est la plus importante. Le phénomène est en réalité beaucoup plus complexe : En fait, une fissure crée une concentration de contrainte théorique infinie (24). L'essai n'est pas une traction pure mais une propagation de fissure. Dans la théorie de la fissuration, on introduit un facteur d'intensité K_I qui dépend essentiellement du rapport profondeur de fissure / épaisseur de la plaque (2) (cf figure 14).

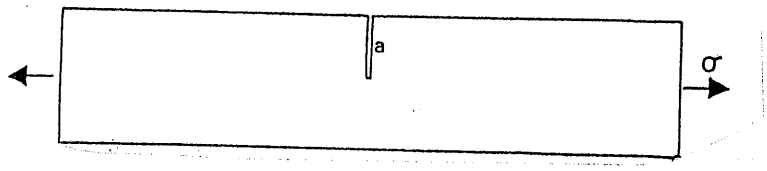


figure 14 (2)

La fissure se propage dans le matériau lorsque ce facteur devient supérieur à une valeur critique caractéristique de la tenacité du matériau, notée K_{Ic}. Cette dernière n'est pas toujours bien connue dans le bois mais pour le peuplier, dans la direction TR, la valeur de 0,3 MPa $\sqrt{m}$ peut être retenue (24). La notion de facteur K_I permet de calculer la réelle distribution des contraintes (2) (cf figure 15):

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} * f(a / b)$$

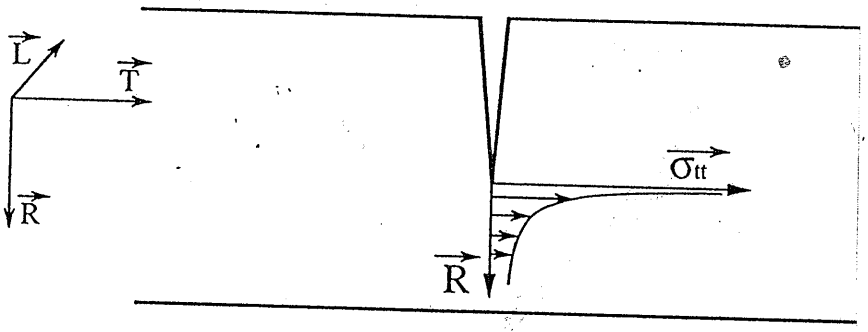


figure 15 Concentration de contrainte due à la présence d'une fissure

La fonction *f* dépend de nombreux paramètres tels que la forme, la taille et la position de la fissure (angle d'insertion) En outre, dans le bois, les vaisseaux des feuillus sont reconnus pour jouer un rôle important dans l'arrêt des fissures (9) . Ainsi, si l'on veut prendre en compte tous les phénomènes physiques qui interviennent réellement, le problème devient alors très complexe et relève surtout de la mécanique de la rupture. Ces nombreuses remarques nous font émettre des réserves quand à l'analyse des résultats en terme d'essai de traction. L'analyse qui consiste à calculer la contrainte comme étant le rapport F/S est donc une simplification extrême mais inéluctable pour notre étude simple à caractère comparatif.

Néanmoins, les résultats ne semblent pas montrer de dégradation notable des placages lors de la compression radiale (cf figure 16.). La corrélation trouvée avec la densité semble s'opposer au fait que lors du processus de déroulage, la profondeur de fissure est habituellement plus grande pour du bois plus dense (18). En ce qui concerne la résistance mécanique à la rupture, l'augmentation de la densité est donc mise en balance avec la profondeur de fissure. Pour les placages fissurés, une tendance à la dégradation des placages les plus denses parait se dégager (cf figure 17).

figure 16

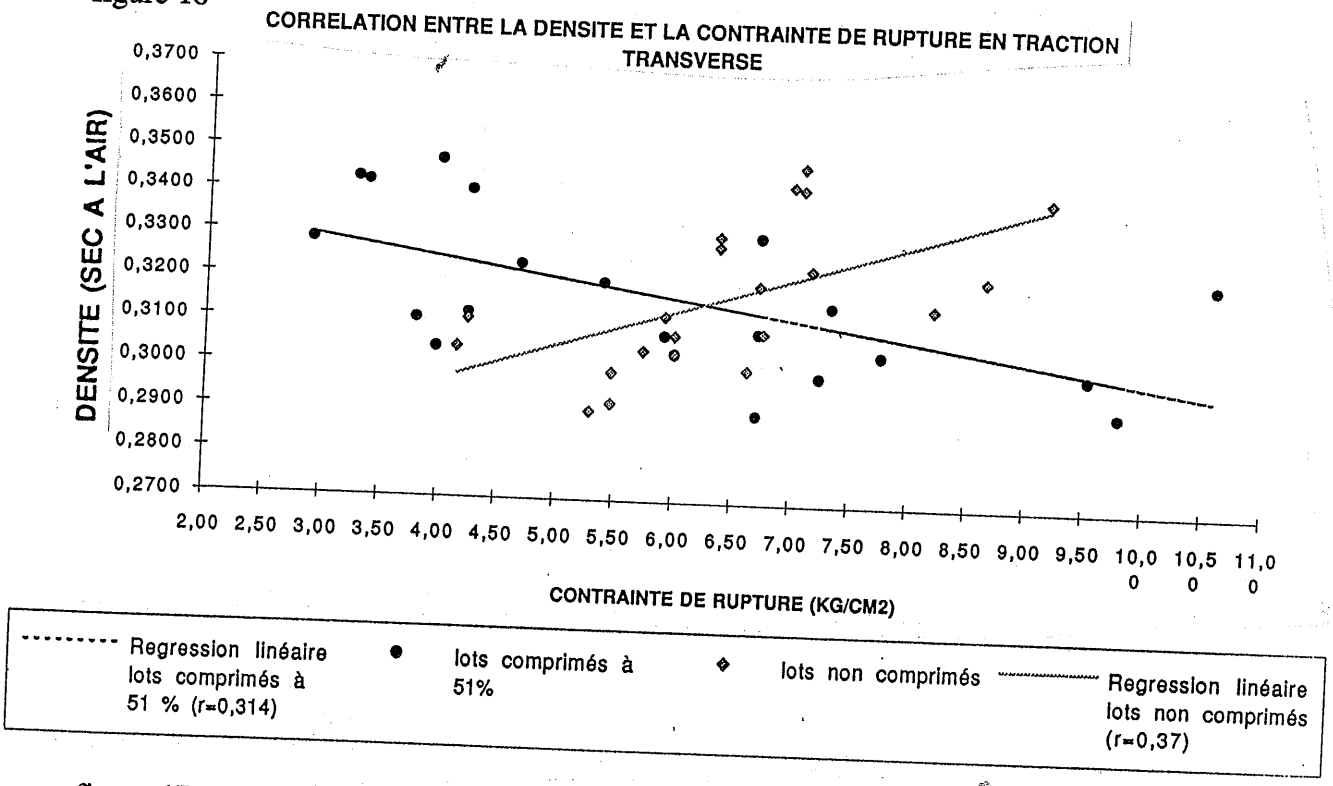
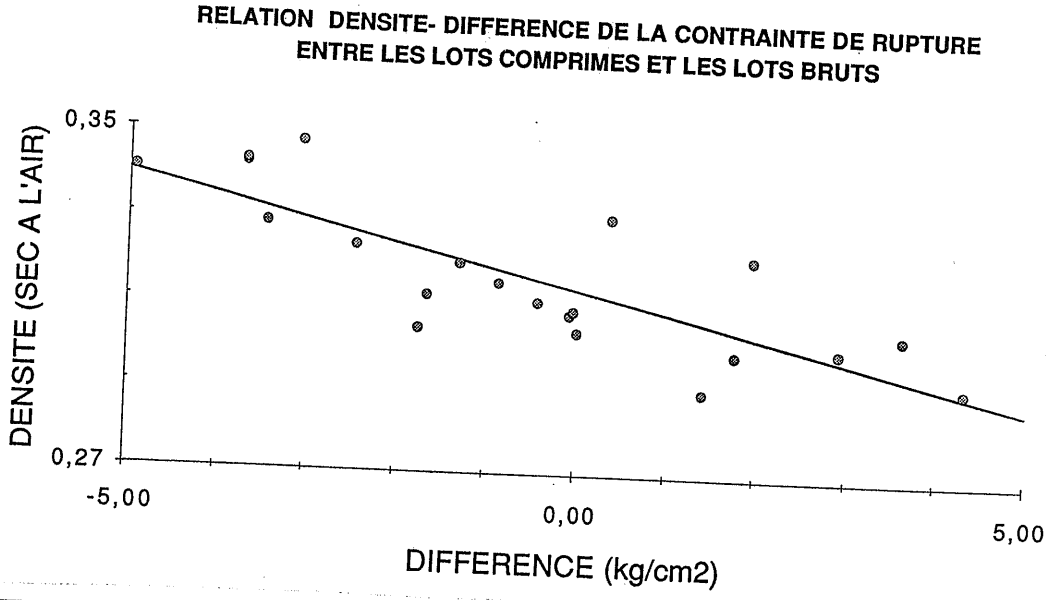


figure 17



V - LES ESSAIS DE FLEXION

Ceux-ci ont pour objectif d'étudier le comportement du matériau densifié lors d'une sollicitation, comme cela sera le cas dans le procédé envisagé, en flexion grandes rotations.

V - 1. Matériel et méthode

Les plaquettes utilisées sont issues de compressions à divers taux de déformation. Nous disposons donc de placages de différentes épaisseurs mais toujours issus initialement des lots de 2 et 3,5 mm.

Tous sont découpés en bandes d'environ 10 mm de largeur puis sont ensuite enroulés autour d'un cylindre. Le succès de l'essai est prononcé si aucune rupture en traction n'est observée. Les échantillons sont ensuite observés avec une binoculaire nous donnant ainsi de nombreuses informations sur les phénomènes produits.

V - 2. Résultats

Le rayon de courbure que l'on peut espérer obtenir n'est pas seulement lié à l'épaisseur du placage mais aussi au taux de compression radiale auquel il a été soumis. En effet, un échantillon brut de 2 mm est moins apte à la flexion que son homologue de même épaisseur mais comprimé et dont l'épaisseur initiale était de 3,5 mm. On peut différencier deux problèmes totalement différents :

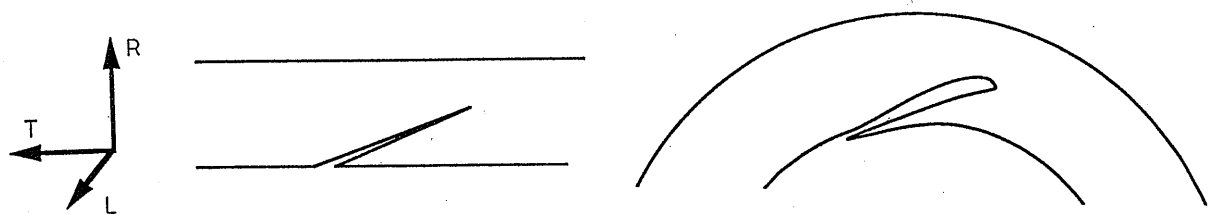
- la flexion tangentielle
- la flexion longitudinale

V - 2.1. La flexion tangentielle

Elle ne peut se concevoir que face fissurée placée vers l'intérieur du cercle décrit. En effet, une flexion réalisée avec les fissures dirigées vers l'extérieur serait le meilleur moyen pour provoquer leur propagation.

Lors de la manipulation, nous avons pu visualiser une déformation de la fissure engendrant le glissement d'une partie sur son homologue (cf figure 18).

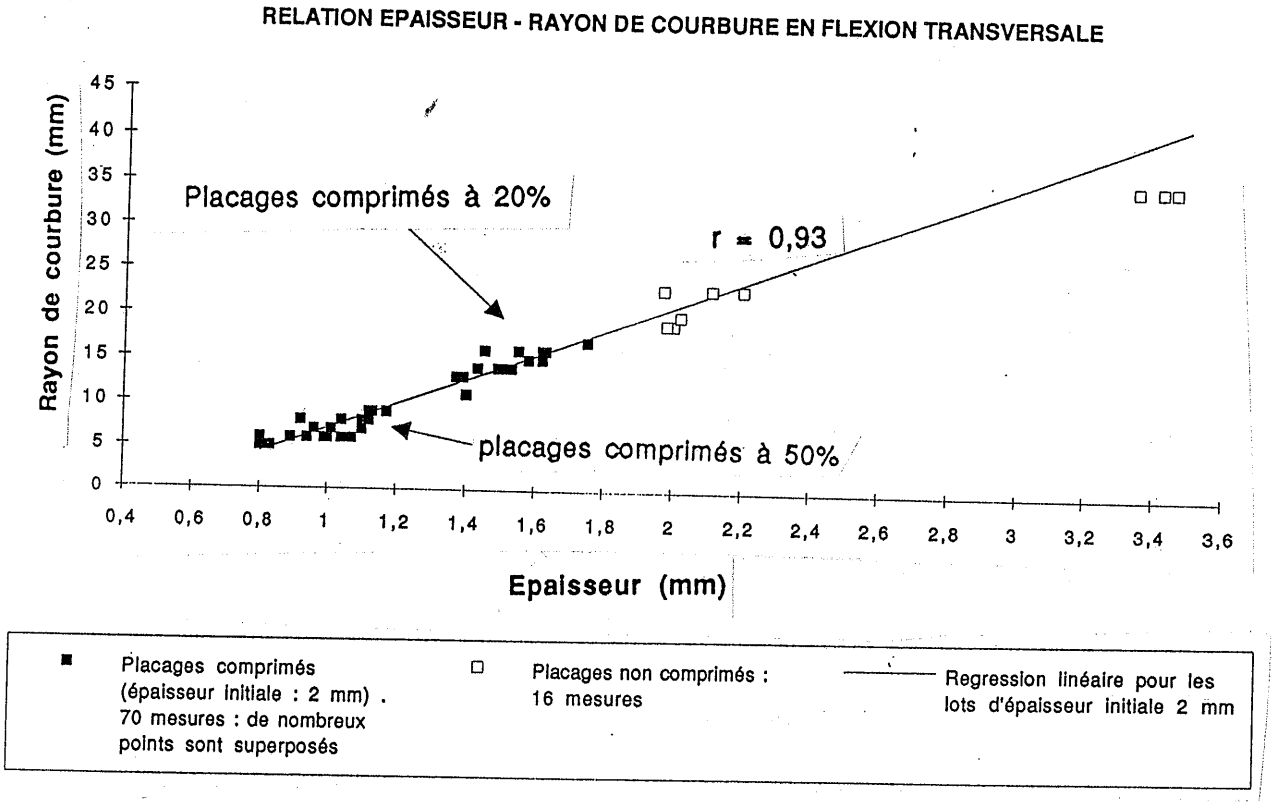
figure 18 Déformation de fissure (flexion tangentielle)



Ce glissement résulte de la non compression tangentielle du matériau qui ne peut transmettre d'effort par l'intermédiaire de la fissure. Le déplacement imposé par la géométrie courbe ne se fait donc que par l'intermédiaire d'un mouvement d'ensemble.

Les résultats montrent une relation linéaire entre les rayons de courbure obtenus et le taux de compression du placage (cf figure.19).

figure 19



La rupture se produit essentiellement en traction. Le phénomène est en fait, ici aussi, une propagation de petites fissures situées sur la face externe du placage (cf figure 20). Elles sont dues à un phénomène que l'on retrouve lors du processus de déroulage : l'effet Horner (17). On rencontre cet incident principalement pour les bois tendres, comme c'est ici le cas du peuplier I-214.

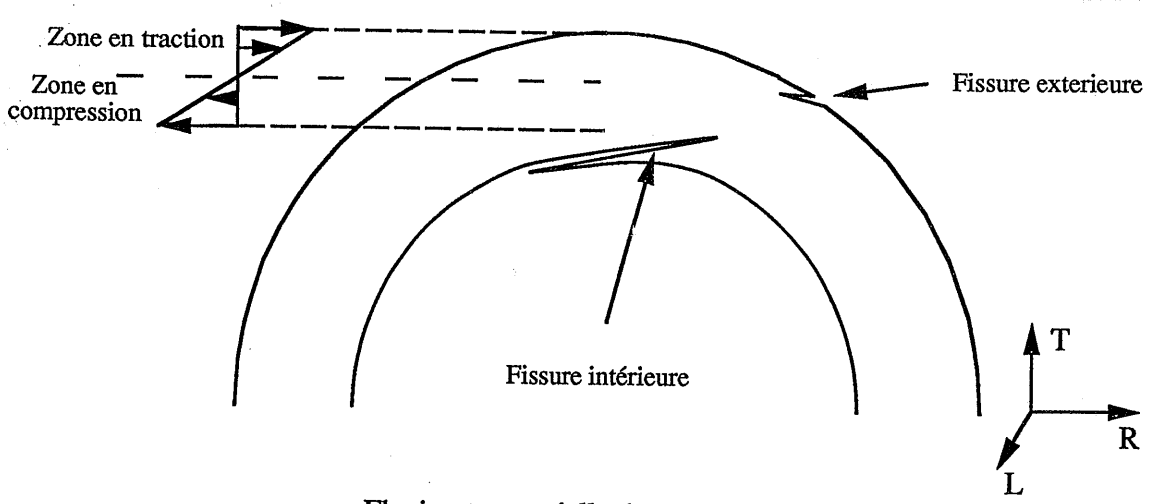
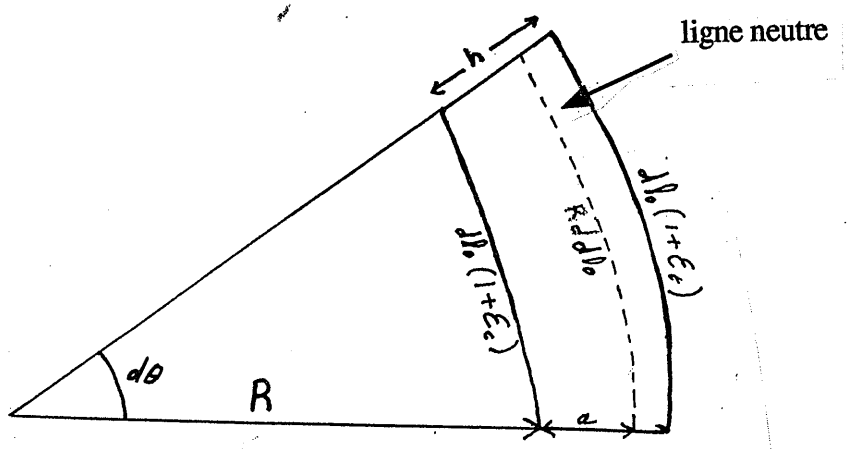


figure 20 Flexion tangentielle dans un placage fissuré

V - 2.2. La flexion longitudinale

Le rayon de courbure minimum, que l'on peut obtenir lors d'une flexion longitudinale, n'est théoriquement dépendant que des deux paramètres mécaniques du bois que sont les déformations maximales admissibles en traction et en compression longitudinale. C'est en fait l'amplitude, $\varepsilon_T - \varepsilon_C$, entre les deux valeurs qui régit le problème (cf figure 21):

figure 21



$$\frac{dl_0}{R+a} = \frac{dl_0(1+\varepsilon_t)}{R+h} = \frac{dl_0(1+\varepsilon_c)}{R}$$

La flexion longitudinale pouvait, à priori, être réalisée indifféremment la face fissurée vers l'intérieur ou l'extérieur. C'est effectivement le cas pour les placages non comprimés. Au contraire, les placages passés sous presse montrent une aptitude bien supérieure à la flexion lorsqu'ils se présentent face fissurée vers l'intérieur. Nous pouvons alors observer la création d'une multitude de micro-flambements sur la face en compression. Ceux ci n'apparaissent pas (ou de manière beaucoup plus marginale) dans les configurations non comprimé ou fissures vers l'extérieur. Nous avons cherché les raisons de cette asymétrie dans l'histoire des contraintes du copeau lors de son déroulage. Grâce aux travaux réalisés dans ce domaine par B.Thibaut (23), nous avons pu effectivement tracer l'histoire des contraintes dans le copeau et mettre en évidence le fait que les deux faces du placage ne subissent pas le même état de contraintes. Mais ceci ne peut expliquer une si grande différence de comportement. L'observation à la binoculaire nous a ici apporté de nombreux renseignements. Les flambements ne sont pas situés de façon aléatoire mais disposés en bandes tangentielles. Ces bandes ont une longueur à peu près constante, environ 2 mm, de l'ordre du pas entre deux fissures. L'instabilité débute à l'angle de la fissure pour se propager vers la suivante. En observant de plus près ce phénomène, il apparait que la solution vient de la géométrie même des fissures. Le fait de comprimer radialement le placage diminue leur angle d'insertion tendant ainsi à dégager une zone de faible épaisseur de type poutre à section parallélépipédique sous la face du placage (cf figure 22):

Flambement local (flexion longitudinale)

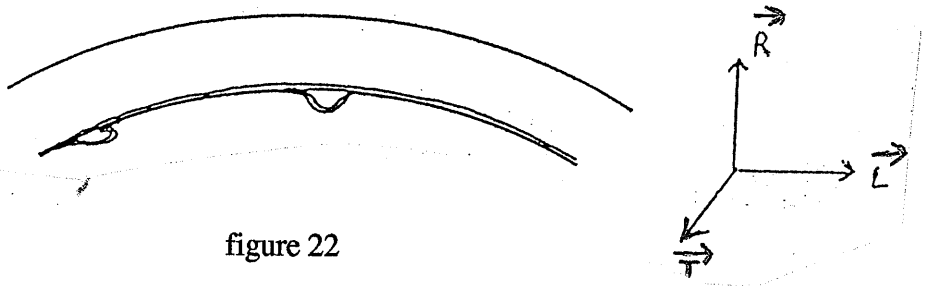


figure 22

La première conséquence de la compression radiale est une diminution de l'angle de fissuration (cf figure 23), initialement d'environ 45°, dans les proportions suivantes :

$$\mathrm{tg}\theta_2 = (1-\pi)\mathrm{tg}\theta_1 \qquad \text{avec} \quad \pi = \frac{e_1 - e_2}{e_1} = \text{taux de compression}$$

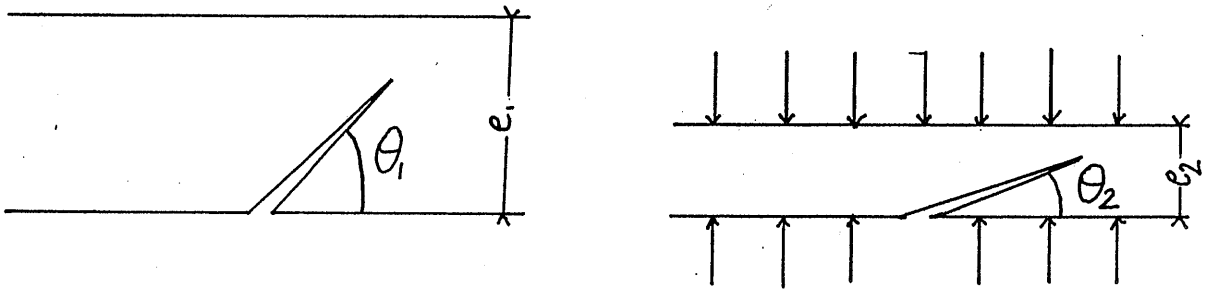
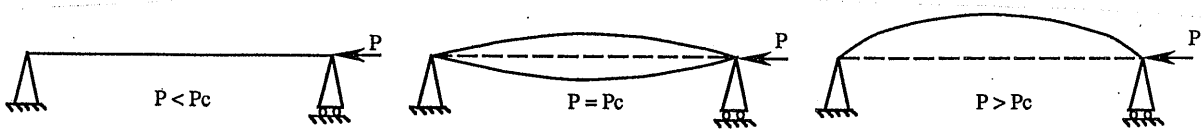


figure 23

Cette partie, assimilable à une poutre soumise à une compression longitudinale, devient ainsi apte à flamber faisant par la même occasion chuter la contrainte et remonter légèrement la ligne neutre de flexion. L'influence sur la zone en traction s'en ressent directement. Les résultats sont satisfaisants car le gain en terme de rayon de courbure est supérieur à celui aquis simplement par une réduction d'épaisseur. Il faut certainement mettre en relation la capacité des fibres à flamber avec leur structure anatomique. En effet, dans la théorie des instabilités élastiques, l'aptitude d'une poutre à flamber est directement liée à l'élancement et à l'inertie de section (cf figure 24). Ce phénomène est régi par l'équation différentielle :

$$EI\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -Py \quad \text{où y est le déplacement transverse induit}$$

figure 24



APPARITION DE L'INSTABILITE NON LINEAIRE : LE FLAMBAGE

Habituellement, on parle de charge critique mais il serait plus opportun d'employer ici la notion de déformation critique que l'on pourrait introduire comme suit :

$$F_c \neq \frac{EI}{l^2} \text{ or } \sigma_c = \frac{F_c}{S} \text{ et } \varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \Rightarrow \varepsilon_c \neq \frac{I}{Sl^2}$$

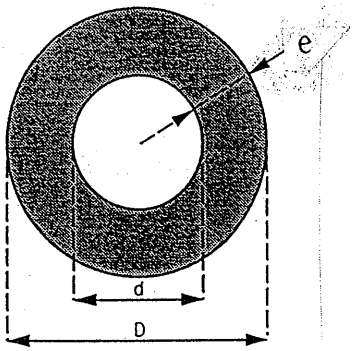
I : l'inertie de flexion

S : section

l : longueur

Suivant les conditions d'encastrement, la valeur de la charge critique varie de façon importante mais reste toujours proportionnelle à EI/l^2. La longueur des fibres apparait ici explicitement. La forme de la section et l'épaisseur des parois interviennent aussi de manière importante dans l'expression de I. Dans le cas du peuplier I-214, si l'on considère que les fibres et vaisseaux ont des sections de type tubulaires, I s'écrit :

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi D^4}{64}(1-\alpha^4) \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{d}{D}$$



On voit dès à présent apparaitre l'influence des caractéristiques anatomiques du bois.
Les résultats indiquent un relation linéaire entre le rayon de courbure obtenu et le taux de déformation (cf figure 25).

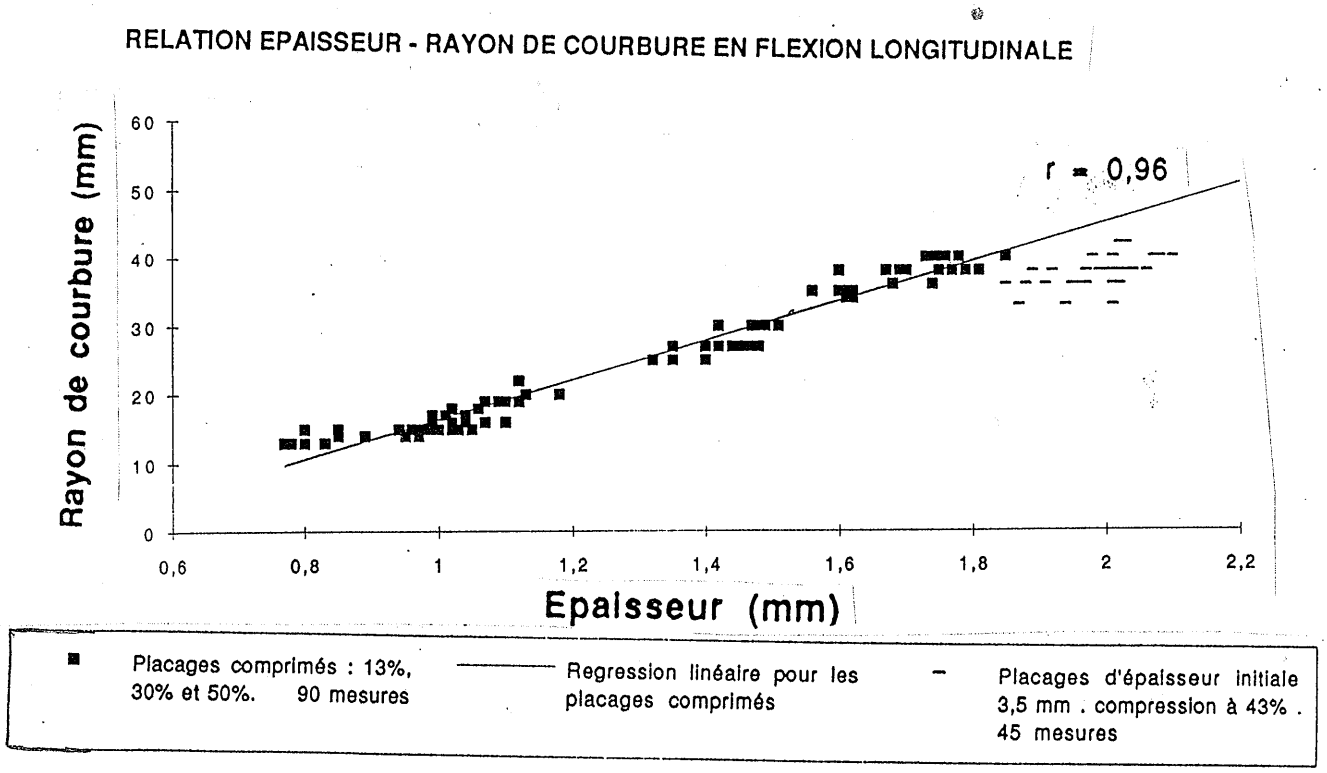
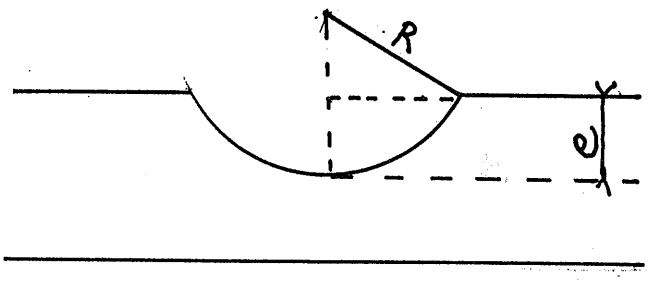


figure 25

La compression radiale a un double intérêt : réduction de l'épaisseur et possibilité de création et de propagation de zones de micro-flambements grâce à la formation de zones minces par la diminution de l'angle des fissures. A ce titre, le procédé de déroulage peut influencer.le phénomène En effet, les travaux de Movassaghi (18) montrent qu'une augmentation de la vitesse de coupe tend à amoindrir cet angle.

VI - LE PROBLEME DU POINÇONNAGE

Lors de la compression locale, nous imaginons bien qu'un enfoncement trop important conduit à un endommagement irréversible et nuisible : à l'extrême limite, un déplacement de 100% devient l'équivalent d'un coup de massicot! Sans aller jusqu'à la rupture, la géométrie même du poinçon impose au bois de se mettre en traction. L'étude de ce problème d'enfoncement d'un outil rigide dans le bois n'est pas simple. Dans le cas où le poinçon cylindrique, différents auteurs ont donné des solutions au problème du contact élastique sans frottement (22). Cependant, l'hypothèse utilisée selon laquelle on néglige le rayon R du cylindre devant l'épaisseur h de la plaque ne peut être appliquée ici : nous testons parfois R=20 et h=2 mm. Nous sommes donc devat un vide du entre autre à la méconnaissance du comportement mécanique du bois humide soumis à des contraintes à des niveau de déformation élevés en compression et en cisaillement Nous avos donc fait un premier calcul basé sur le rayon de courbure de l'objet (cf figure 26) et sur son enfoncement dans le bois qui nous permet de donner une estimation de la déformation engendrée. Les hypothèses de glissement parfait et de souplesse extrême faites ici ne correspondent pas à la réalité physique mais donnent par là même des valeurs surestimées (cf figure 27).



Hypothèse de déformation

figure 26

$$\varepsilon = \frac{R \text{ Arcos}\left(1-\frac{e}{R}\right) - \sqrt{2Re - e^2}}{\sqrt{2Re - e^2}}$$

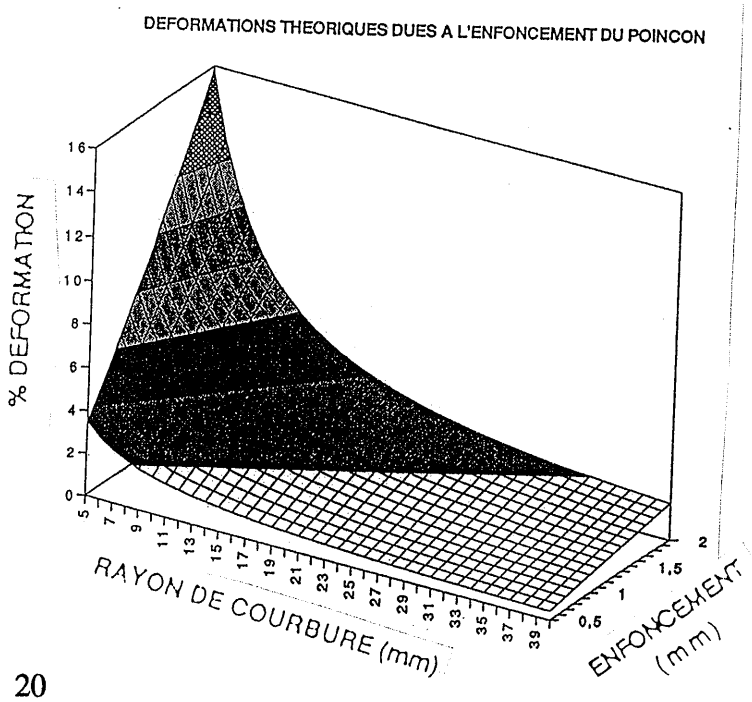
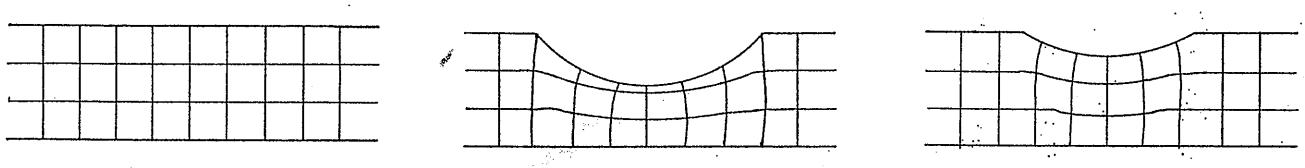


figure 27

VI - 1. Matériel et méthode

Nous traçons, sur la tranche de petites éprouvettes, un quadrillage de façon à dégager trois couches dans l'épaisseur (cf figure 28). Les poinçons utilisés ont un rayon de 5 ou 10 mm. Les quadrillages sont photographiés avant et après le poinçonnage. Le processus s'effectue avec du bois saturé et chaud. L'enfoncement *e* est un paramètre variable.

figure 28



Avant poinçonnage | Pendant poinçonnage | Après poinçonnage

VI - 2. Résultats

On distingue nettement deux problèmes : l'axe du cylindre descend parallèlement ou perpendiculairement au sens des fibres. Dans le premier cas, la dégradation intervient rapidement. On assiste alors à un défibrage du même type que celui rencontré précédemment lors des compressions importantes des placages (cf § VI). Les photos tendent à montrer que lors de la déformation, le bois épouse bien la forme du poinçon. Par contre, dans le deuxième cas, on peut observer un décollement assez important. Ceci a pour conséquence un taux de déformation transverse moins élevé. L'explication vient de l'anisotropie du matériau. Celui-ci a une rigidité bien plus importante dans la direction longitudinale ($E_L >> E_T$). Le bois, peu déformable dans cette direction, adopte alors un profil dont les rayons de courbures sont plus faibles que dans la première configuration (cf figure 29).

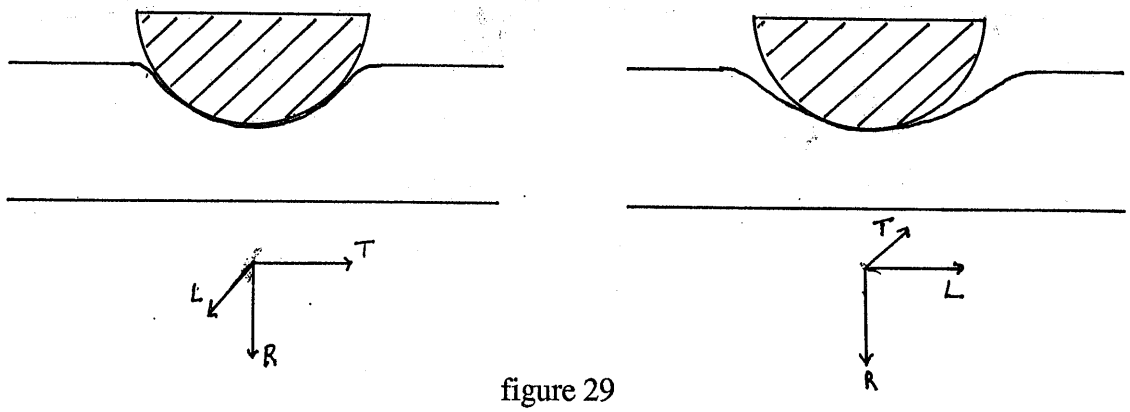


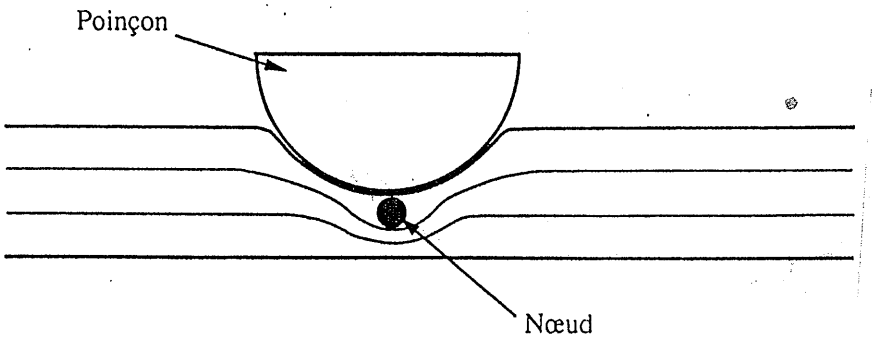
figure 29

La deuxième observation importante concerne les zones de plastification. On peut en effet parler ici d'écoulement plastique. Celui-ci se produit lors de grandes déformations quand la compression se déroule dans la phase plateau. Sur les photographies, on peut constater dans le premier cas une très nette différence d'écrasement radial entre les trois couches : il semble que celle située juste à proximité du poinçon se déforme deux à trois fois plus que les autres dans la direction radiale.

Cette différence de comportement est, là encore, due à l'anisotropie du bois. En effet, lors de l'enfoncement de l'outil, il se produit une plastification du matériau. Dans le premier cas, elle intervient rapidement dans la direction T. Au contraire, dans le second cas, le bois, plus rigide dans la direction longitudinale ($E_L >> E_R$), plastifie plus volontiers dans la direction radiale. Ceci explique les observations faites selon lesquelles, dans le premier cas, la "couche" supérieure est très déformée radialement et les deux suivantes de manière beaucoup plus faible alors que dans le deuxième cas, la déformation semble s'être repartie sur les trois étages.

Cette étude ne peut être réaliste si l'on ne tient pas compte du frottement bois-outil. Celui-ci est décrit par sur la relation entre les deux composantes de la résultante, perpendiculaire et tangentielle à la surface du poinçon. Dans le cas du bois, le rapport $\mu = T/N = tg\ \phi$, appelé coefficient de frottement obéit à la loi de Coulomb.Pour des vitesses faibles, comme c'est ici le cas, une valeur de 0,6 correspondant à un angle de 30° parait être tout à fait raisonnnable (23). Ce frottement engendre des contraintes de traction importantes à même de provoquer une rupture.

La présence de singularités que sont les nœuds est néfaste. Beaucoup plus denses que le bois alentour, ils sont quasi indéformables (cf figure 30). Leur compression se traduit donc par un déplacement d'ensemble comprimant d'autant plus les couches inférieures qui dépassent alors le taux de déformation critique à partir duquel la détérioration se manifeste. Ceci est d'autant plus domageable qu'il faut éviter à tout prix une dégradation du bois dans la direction de la future flexion et surtout à proximité de la face tendue.



Influence d'un nœud sur la compression locale

figure 30

VII - HISTOIRE D'UN ECHEC

Après le poinçonnage, lors du déchargement de l'outil, la recouvrance s'exprime de manière d'autant plus importante que l'opération a été réalisée avec un bois saturé et chaud. Pour éviter le phénomène, il nous semblait indispensable d'opérer la flexion avant d'ôter le poinçon.

VII - 1. Matériel et méthode

Les placages sont poinçonnés à l'aide d'un cylindre en aluminium monté sur la presse Instron. Une lamelle métallique destinée à absorber une partie des efforts en traction lors de la flexion est installée entre le bois et le bâti (cf figure 4).

VII - 2. Résultats

Le poinçonnage, par son principe même, bloque toutes les déformations du matériau situé entre le bâti et l'outil. La flexion devient dès lors impossible. Une autre raison, géométrique, s'ajoute encore à cette remarque. La matière située près du poinçon ne peut se déplacer vers celui-ci (cf figure 32). La situation de l'outil est comparable à celle d'un nœud incompressible situé sur la face en compression. Le pliage avec cette technique de flexion autour d'un poinçon est donc une voie sans issue.

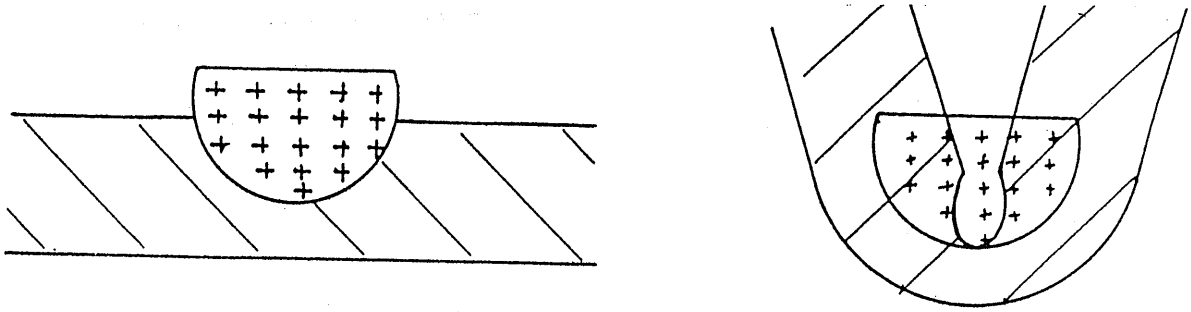


figure 32

On peut cependant envisager une installation plus complexe qui réaliserait la flexion grâce à des verins hydrauliques au fur et à mesure que le poinçon s'enfonce dans le placage. Ce dispositif n'est pas inimaginable à l'échelle industrielle mais cependant relève plus dun problème technologique que de la recherche fondamentale.

VIII - SOLUTION FINALEMENT ADOPTEE

VIII - 1. Matériel et méthode

Le système du poinçon utilisé lors de l'étude précédente est conservé pour appliquer une compression radiale importante dans le domaine plastique. Pour éviter de rencontrer les problèmes liés au poinçonnage (cf § VI), nous utiliserons un cylindre de gros rayon (R=20 mm) et le taux d'enfoncement sera limité à 50% sur des placages de 2 mm d'épaisseur.
La flexion est ensuite réalisée immédiatement après déchargement pour éviter une manifestation trop importante du phénomène de recouvrance.

La compression s'opère à l'état saturé (H≈ 200%) et chaud. La flexion est réalisée juste après déchargement. Une lame d'aluminium est plaquée contre la face extérieure dans le but d'absorber une partie des efforts en traction.

Des observations à la binocculaire et au microscope éléctronique à balayage nous permettent de visionner les phénomènes qui se produisent à l'échelle des fibres et des vaisseaux.

VIII - 2. Résultats

Le résultat produit par un tel procédé est très différent de ce que nous pensions initialement réaliser. La flexion en grandes rotations s'effectue bien dans une portion de l'épaisseur. La zone en traction se déforme faiblement limitant les risques de rupture. La zone en compression flambe très rapidement créant localement un pli (cf photo n° 4). On parle difficilement de rayon de courbure. Les ruptures en traction sont peu fréquentes ou très superficielles (< 10% de l'épaisseur) et ne semblent pas nuire gravement à la solidité de l'objet (cf photo n° 5). A l'inverse du procédé précédent qui relevait plus du principe de formage dans le sens où la configuration obtenue l'était de manière définitive, la flexion réalisée ici reste réversible. Il est possible de plier et déplier un certain nombre de fois avant que par fatigue, la rupture se manifeste (cf figure 33).

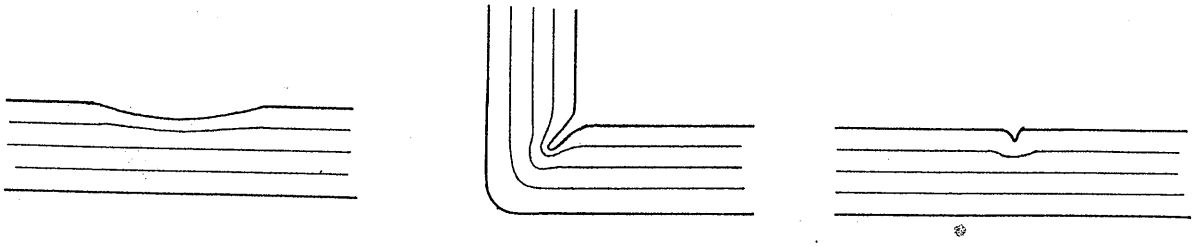


figure 33

VIII - 3. Discussion-explication

Nous l'avons vu précédemment, un pliage "idéal", sans rupture en traction, est rendu d'autant plus réalisable que la partie en compression flambe. Dans la théorie du flambement des poutres, il est établi qu'un défaut de rectitude diminue fortement la charge critique nécessaire au phénomène. L'idée développée ici s'appuie sur ce fait. La déformation résiduelle après déchargement permet ainsi d'obtenir le défaut de rectitude recherché. Nous avons mesuré que la déformation est encore présente à concurrence de 20% de la compression initiale (50%) au bout de 10 secondes.

Le second intérêt de la pré-compression consiste à faire flamber une première fois radialement les parois cellulaires.Celles-ci sont alors localement endommagées offrant ainsi une résistance moindre lors d'une prochaine déformation (cf figure 34). Ainsi lors de la flexion, le flambage longitudinal peut s'exprimer sans rencontrer de résistance

notoire, c'est-à-dire sans avoir à fournir d'energie importante pour comprimer radialement les couches internes qui s'opposaient auparavant à un déplacement dans cette direction.

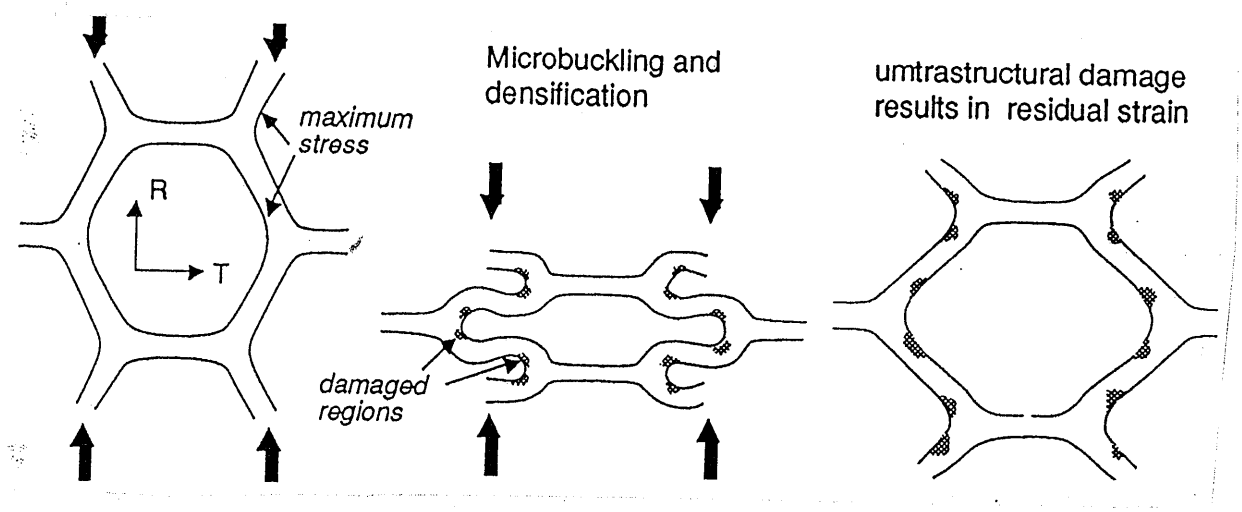


figure 34

On remarque la déformation radiale très importante des vaisseaux lors de la sollicitation radiale (cf photo 8, 9). Leurs parois, fines (≈6-7 µm) en regard de leur diamètre (≈100 µm) et de leur longueur (de l'ordre du millimètre), les rendent aptes à flamber radialement et longitudinalement. Leur intervention dans le phénomène est donc très importante. L'homogénéité du bois de peuplier est donc à ce titre un point très positif nous assurant la présence de nombreux vaisseaux de diamètre assez constant dans toute le cerne.

Le flambage, nous l'avons vu précédemment, est fortement dépendant de la valeur du moment d'inertie I. Dans notre cas, en considérant que nous sommes en présence d'une structure tubulaire, cette quantité vaut, nous l'avons vu précédemment :

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi D^4}{64}(1-\alpha^4) \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{d}{D}$$

dans le cas de nos vaisseaux, l'épaisseur *e* des parois est très faible devant le diamètre. On peut donc écrire : $\frac{d}{D} \approx 1$ et l'expression devient alors :

$$I = \frac{\pi D^4}{64}\left(1-\left(1-\frac{2e}{D}\right)^4\right) \approx \frac{\pi D^4}{64}\left(\frac{8e}{D}\right) = \frac{\pi D^3 e}{8}$$

Le moment d'inertie des vaisseaux est donc considérablement réduit par rapport aux fibres dont l'épaisseur des parois ne peur être négligée devant le diamètre, permettant ainsi l'apparition rapide des instabilités non linéaires. Le matériau semble se comporter globalement comme un empilement de tubes à parois minces capables individuellement de grandes déformations. Localement le taux de compression radiale atteind 75% dans la partie la plus proche du pli. Les cavités sont alors totalement comblées. Il semble que vaisseaux et fibres écrasés radialement ne réagissent plus comme des tubes mais que leurs parois se comportent comme des plaques minces capables de rayon de courbures très faibles (cf figure 35).

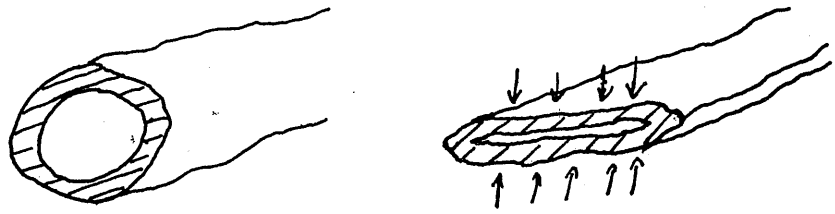


figure 35

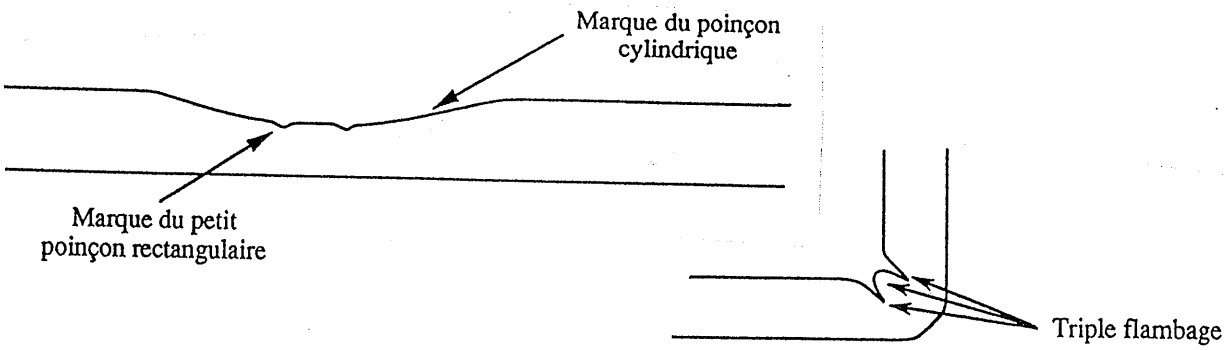
En effet, les photographies montrent ces parois de 10 µm d'épaisseur ayant réalisé des courbes du même rayon. Cela représente une amplitude de déformation $\varepsilon_T - \varepsilon_C$ de 100% !!! (cf photo n° 6) Les paramètres physiques que sont l'humidité et la température, sont certainement indissociables du phénomène en ramollissant considérablement les constituants des parois cellulaires.

On pourrait s'attendre à une fonction importante des rayons ligneux lors de l'écrasement radial mais les photographies ne révèlent aucun phénomène particulier allant dans ce sens.

Le procédé peut être amélioré en contrôlant l'endroit exact où le pli se réalise. Il suffit pour cela de marquer légèrement à l'aide d'un poinçon à angle aigu la zone où l'on désire que cela se produise. Cette manipulation doit être effectuée entre la compression et la flexion. L'effet est positif car le pli s'amorce toujours dans cette zone pré définie et plus rapidement que précédemment.

Dans le soucis de limiter les zones en grandes déformations, nous avons mis au point un second procédé qui semble réduire les risques de rupture en traction. On provoque une deuxième zone de flambement à proximité de la première, créant ainsi un pli en deux temps (cf figure 36). Les déformations sont ainsi réparties sur deux sites très proches l'un de l'autre (un angle à 90° est donc remplacé par deux angles à 45°) (cf photos 7,8, et 9).

figure 36



Ces procédés ne peuvent être appliqués que dans le cas d'une flexion longitudinale. Cependant, nous avons testé l'influence d'une pré-compression radiale sur la flexion tangentielle. Les résultats sont satisfaisants dans la mesure où le rayon de courbure chute à 2, voire 1,5 mm. Nous ne pouvons que constater ce phénomène mais nous ne nous

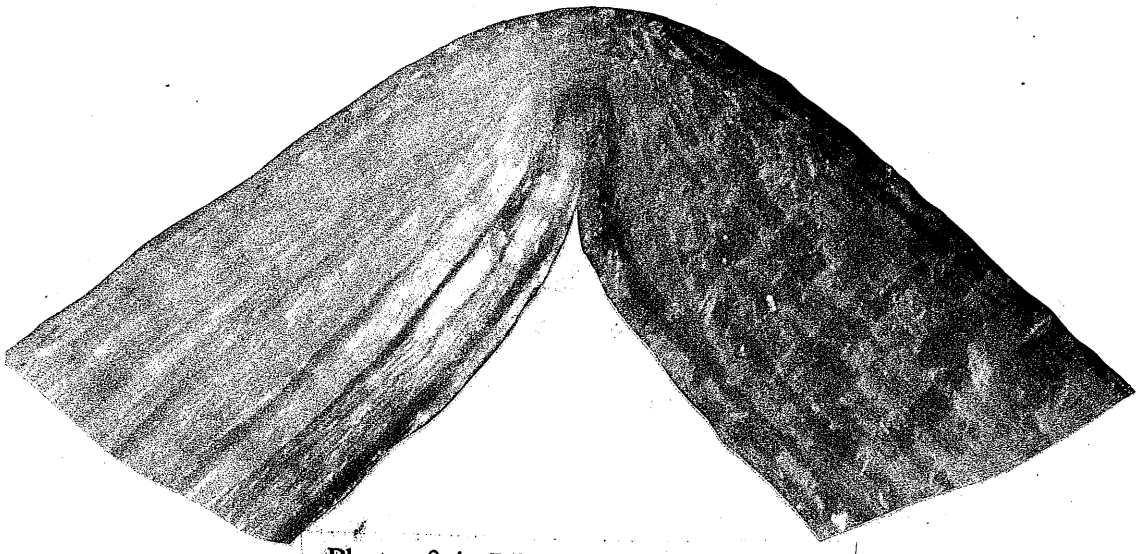


Photo n° 4 : Pliage simple (binoculaire)

Photo n° 5 : Pliage simple (microscope éléctronique) (*50)

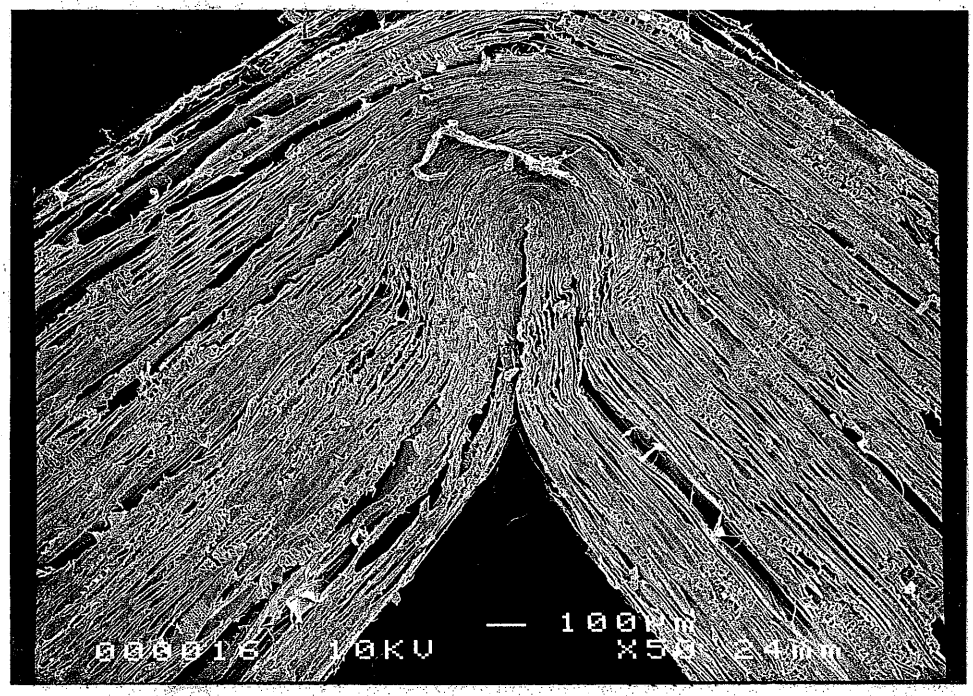


Photo n° 6 : Pliage simple fond du pli de la photo n° 5 (microscope éléctronique) (*190)

Photo n° 4 : Pliage simple (binoculaire)

Photo n° 5 : Pliage simple (microscope éléctronique) (*50)

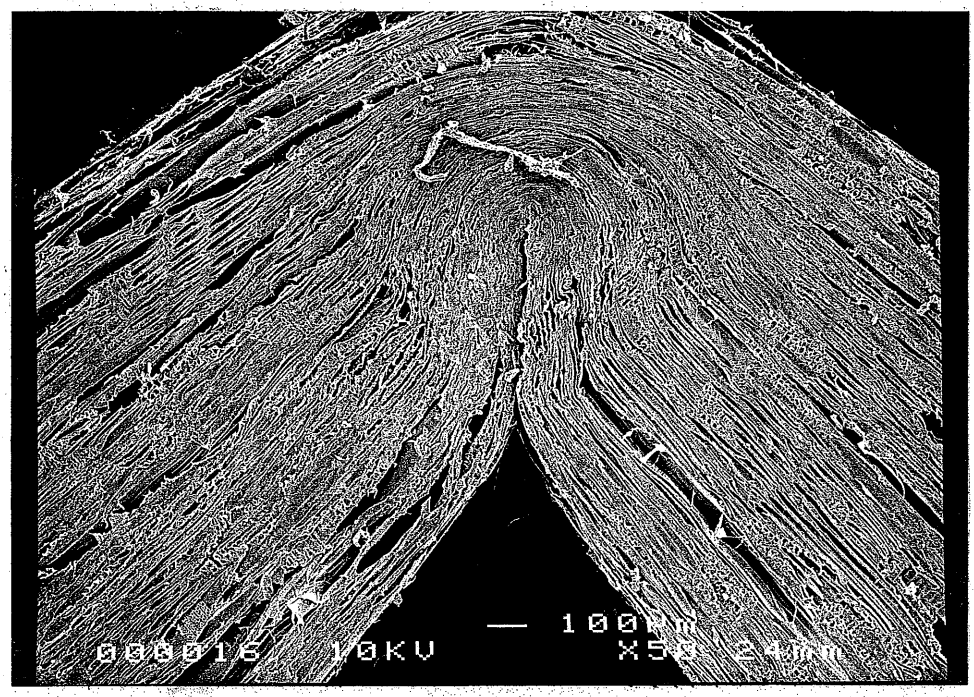


Photo n° 6 : Pliage simple fond du pli de la photo n° 5 (microscope éléctronique) (*190)

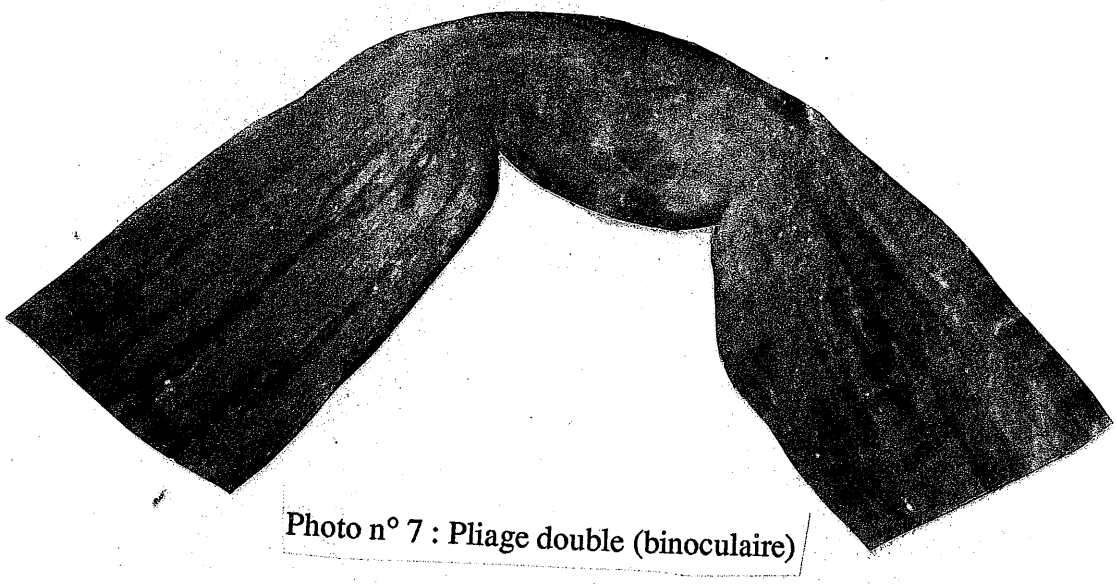


Photo n° 7 : Pliage double (binoculaire)

Photo n° 8 : Pliage double (microscope éléctronique) (*43)

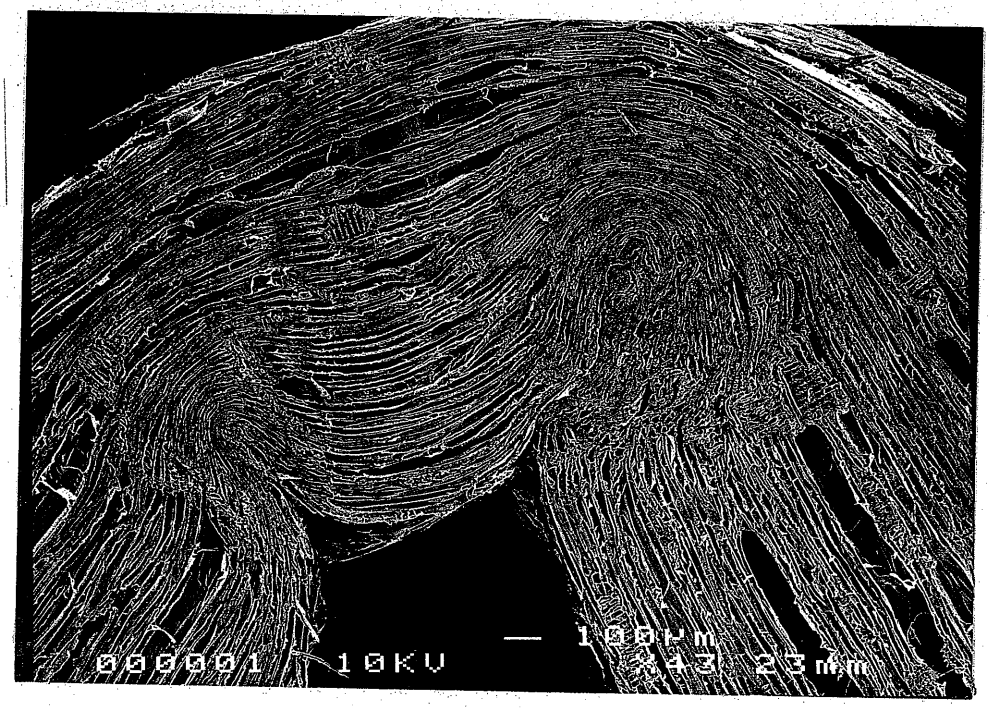


Photo n° 9 : Pliage double fond d'un pli de la photo n° 8 (microscope éléctronique) (*90)

pouvons encore en donner une explication hormis l'assouplissement des parois cellulaires à la suite de la compression radiale.

Influence du mode opératoire :

L'efficacité de la lamelle métallique est indiscutable et il semble difficile d'imaginer un procédé sans cet accessoire. Des essai ont été réalisés avec des bandes en acier dont l'épaisseur variait de 1 à 0,05 mm. Les résultats obtenus (rupture en traction à 100%) montrent que l'acier, contrairement à l'aluminium, n'est pas apte à épouser le profil de l'éprouvette en bois avec un rayon de courbure aussi faible que celui que nous obtenons. Ceci jusqu'à 0,2 mm. Sous ce seuil, la courbe est bien suivie mais l'efficacité est nulle : l'épaisseur n'est plus suffisante pour absorber les efforts en traction et faire remonter la ligne neutre de manière significative.

Une série d'essais a été réalisée à température ambiante et/ou sec à l'air. Tous se sont soldés par un échec confirmant ainsi toute la littérature à ce sujet.

Le processus n'est pas indifférent à la vitesse à laquelle on opère.Le caractère visco-élastique, d'autant plus important que le bois est humide et chaud, conseille l'exécution la plus lente possible. N'oublions cependant pas que le bois refroidit assez rapidement. C'est donc un compromis qu'il faut rechercher pour l'obtention d'un bon résultat.

IX - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Au démarrage de ce travail, nous nous étions proposés d'étudier l'influence de différents paramètres physiques, mécaniques et anatomiques sur le pliage tel que nous l'envisagions. Chemin faisant, cela est apparu comme une ambition démesurée compte tenu de l'impasse dans laquelle le procédé que nous pensions utiliser nous a mené. Il nous a donc fallu montrer les raisons de cet échec et l'inutilité de poursuivre des recherches dans cette voie. Pourtant, les essais de flexions des placages comprimés radialement nous avaient laissé espérer des résultats intéressants en terme de rayon de courbure. L'aptitude des cellules du bois à flamber se révélait une propriété qu'il fallait essayer d'utiliser. Cela nous a conduit à la mise au point d'un premier procédé de pliage. Sa variante nous a donné des résultats encore plus satisfaisants dans le sens où les ruptures superficielles qui parfois apparaissaient encore ont disparu. Le microscope éléctronique s'est révélé être le moyen le plus efficace pour l'observation des phénomènes mécaniques à l'échelle des cellules. Il a aussi permis de faire le lien entre ces déformations et certaines caractéristiques anatomiques du bois. Les paramètres importants qui intervenant dans le processus sont : la longueur, la forme et l'épaisseur des parois des cellules (vaisseaux et fibres), la porosité et la nodosité. Une étude approfondie du matériau bois reste indispensable pour une meilleure compréhension de ses propriétés physico-mécaniques.

Les procédés mis au point semblent prometteurs car simples dans leur principe, ils peuvent facilement, après quelques études préalables d'optimisation, être appliqués industriellement. Entre autres sujets d'études intéressants citons le problème du poinçonnage du bois. Il s'agit de bien comprendre ce qui se passe lors de l'enfoncement

de l'outil afin de trouver un compromis entre une fragilisation désirée dans la direction radiale et la sauvegarde des propriétés mécaniques essentielles à la solidité du pli dans les directions longitudinales et tangentielles.

En fait, face au vide presque complet des études dans ce domaine, nous avons essayé de poser une première pierre élémentaire en montrant que le pliage du bois n'est pas une utopie. Cependant, tout reste à faire sur ce sujet qui requiert la jonction des connaissances de l'anatomiste et du mécanicien.

X - REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 - Arima, T. 1973 : Inflence de la température sur le comportement viscoélastique du bois . Mémoire de thèse. Tokyo. (en Japonais).
2 - Bui, H. D 1978 : Mécanique de la rupture fragile. Editions Masson.
3 - Cech, M.Y., Huffman, D.R. 1970 : Dynamic Transverse Compression Treatment of Spruce to Improve Intake Preservatives. Forest Product Journal. Vol. 20, N° 3, pp 47-52
4 - Chantre, G. 1994 : Relations entre les caractéristiques des placages et certaines propriétés du bois. AFOCEL.
5 - Centre Technique du Bois 1970 : La fabrication des emballages légers en bois Cahier N° 84.
6 - Collardet, J., Besset, J. 1992 : Feuillus des zones tempérées. Ed Vial & C.T.B.A., pp 239-260
7 - François, P. 1992 : Plasticité du bois en compression multiaxiale. Thèse Université Bordeaux I.
8 - Fukuhara, Y. 1965 : On the Deformation Compression Perpendicular to the Grain of Wood. Bulletin of the Tokyo University Forests. N° 61, pp 103-197.
9 - Gibson, L.J. & Ashby, M. F. 1988 : Cellular Solids. Structure & Properties. Pergamon.
10 - Goulet, M., Cech, M.Y., Huffman, D.R. 1968 : Perméabilité et résistance mécanique du bois d'épinette comprimé transversalement. Note Technique N° 2. Université Laval.
11 - Gril, J., Norimoto, M. 1993 : Compression of wood at hight temperature. COST 508 - Wood mecanics. Workshop on "Wood : plasticity and damage". Limerick.
12 - Guitard, D. 1987 : Mécanique du matériau bois et composites. Cepadues Edition.
13 - Iida, I., Norimoto, M., Imamura, Y. 1984 : Hygrothermal Recovery of Compression Set. Mokuzai Gakkaishi. Vol. 30,N° 5, pp 354-358.
14 - Jacquot, C., Trenard, Y., Dirol, D.1973 : Atlas d'anatomie des bois des angiospermes. Tomes I-II. C.T.B.A.
15 - Mandel, J. 1978 : Propriétés mécaniques des matériaux. Editions Eyrolles. pp 117-136.
16 - Millett, M. A., Gerhards, C. C. 1972 : Accelerated Aging. Wood Science. Vol. 4, N°4, pp 193-201.
17 - Mothe, F. 1988 : Aptitude au déroulage du bois de douglas. Consequences de l'hétérogénéité du bois sur la qualité des placages. Thèse I.N.P.L.
18 - Movassaghi, E. 1985 : Influence des paramètres microdensitométriques sur les efforts de coupe et la qualité des placages de douglas et de châtainier obtenus par déroulage. Thèse I.N.P.L. Nancy
19 - Norimoto, M., Ota, C. , Akitsu, H., Yamada, T. 1993 : Permanet fixation of bending deformation in wood by heat treatment. Wood Research. N°79, pp 23-33.
20 - Peck, E. C. 1957 : Bending solid wood to form. Agricultue Handbook, N°25.
21 - Stevens, W. C., Turner, N. 1948 : Solid and laminated wood bending. His Majesty's Stotonery Office, London, pp 6-34.
22 - Timoshenko, S. 1948 : Théorie de l'élasticité. Librairie Polytechnique. Beranger.
23 - Thibaut, B. 1988 : Le processus de coupe du bois par déroulage. Thèse d'état. Montpellier.
24 - Valentin, G., Kaddour, G., Adjanohoun, G. 1990 : Sur la tenacité du bois. G.E.R. Grenoble.
25 - Wicker, M. 1979 : Le bois de tension. Annales biologiques. Tome XVIII. Fasc. 5